

Synthèses

L'agronomie aujourd'hui

T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney,
J. Roger-Estrade, coord.

Préface de M. Sebillotte



éditions
Quæ

L'agronomie aujourd'hui

L'agronomie aujourd'hui

Thierry Doré
Marianne Le Bail
Philippe Martin
Bertrand Ney
Jean Roger-Estrade,
coordinateurs

Éditions Quæ
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection Synthèse

Reproduction sexuée des conifères et production de semences
en vergers à graines,

Gwenaël Philippe, Patrick Baldet, Bernard Héois, Christian Ginisty,
2006, 572 p.

La photosynthèse

Processus physiques, moléculaires et physiologiques,

Jack Farineau, Jean-François Morot-Gaudry,
2006, 412 p.

L'armillaire et le pourridié-agaric des végétaux ligneux,

Jean-Jacques Guillaumin, coord.,
2005, 504 p.

Remerciements

Les auteurs de cet ouvrage remercient chaleureusement tous ceux qui en ont permis la réalisation. Alain Bône, Alice Baux, Hélène Bombrun ont pris une part importante dans la recherche documentaire. Stéphanie Pineau et Inra Éditions ont réalisé avec soin et efficacité l'énorme tâche que représente la mise en page des documents et le secrétariat d'édition, ainsi que la préparation du CD-Rom, aidés en cela par Alain Bône et Sophie Crochard. Pour la rédaction de chacune des parties ont été mobilisés de nombreux coauteurs, experts dans leur domaine, sans la contribution desquels la réalisation de cette synthèse eût été difficile. Denis Angers et Anne Légère (Agriculture et Agroalimentaire Canada), Stéphane Bellon, Marc Benoît, Nadine Brisson, Philippe Debaeke, Christian Gary, Françoise Lescourret, Nathalie Munier-Jolain, Loïc Pagès et Didier Picard (Inra), Éric Malézieux et Florent Maraoux (Cirad), Gilles Thévenet (Arvalis-Institut du végétal), ont assuré, malgré des délais souvent très courts, une relecture fine des différents chapitres. Michel Sebillotte nous a fait l'honneur d'accepter, malgré ses nombreuses occupations, de préfacer l'ouvrage. L'Ina P-G, et les départements « environnement et agronomie » et « sciences pour l'action et le développement » de l'Inra, ont soutenu financièrement cette édition. Enfin, cet ouvrage doit beaucoup aux discussions que ses auteurs ont quotidiennement avec leurs collègues et avec les étudiants auxquels ils sont confrontés. Et bien sûr, à tous ceux, chercheurs, professionnels ou enseignants, qui font que l'agronomie continue à évoluer ! Que tous trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

T. Doré, M. Le Bail, P. Martin, B. Ney, J. Roger-Estrade

Table des matières

Préface , par Michel Sebillotte.....	1
Introduction générale	23
Définitions et contours de l'agronomie	23
Enjeux et évolutions marquantes pour l'agriculture et les espaces agricoles et ruraux	24
Rendre compte des évolutions récentes de l'agronomie	28
I. ITINÉRAIRE TECHNIQUE, SYSTÈME DE CULTURE : DE LA COMPRÉHENSION DU FONCTIONNEMENT DU CHAMP CULTIVÉ À L'ÉVOLUTION DES PRATIQUES AGRICOLES	
Introduction	33
Trois approches agronomiques pour appuyer l'évolution des pratiques agricoles	33
Itinéraires techniques et systèmes de culture : une vision systémique du champ cultivé	36
Itinéraires techniques et systèmes de culture : la finalisation des pratiques agricoles et la prise en compte des logiques d'action	38
Les évolutions des travaux dans le domaine des systèmes de culture	40
1. La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture	43
Importance d'une approche intégrée du fonctionnement du champ cultivé	43
L'évolution des techniques	48
Prise en compte de différents pas de temps et échelles d'espace dans la conception et l'évaluation des systèmes de culture	50
2. Systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole	57
Cadre conceptuel de représentation des décisions dans l'exploitation agricole	58

Des niveaux de décision hiérarchisés dans l'exploitation	58
Des cadres conceptuels de représentation des décisions techniques	60
Décisions et systèmes de culture dans l'exploitation agricole	61
Modèle conceptuel de gestion technique d'une sole de culture dans l'exploitation	61
Gestion des ressources dans l'exploitation et constitution des systèmes de culture	64
Diversité des exploitations agricoles, des décisions et des systèmes de culture	68
Diversité locale des situations d'exploitations agricoles	69
Cycle de vie, trajectoire d'exploitations et évolution des décisions	71
Quelles utilisations pour l'action de ces connaissances ?	73
3. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture	77
L'évaluation des performances du champ cultivé	78
Objectifs et démarche	78
Les approches statistiques multivariées	79
Le modèle conceptuel	80
Les modèles numériques du fonctionnement d'une culture	81
Les indicateurs de diagnostic	82
L'évaluation multicritère des systèmes de culture	83
Les indicateurs de performances des systèmes de culture	84
Les indicateurs d'impacts environnementaux	85
L'identification et l'agrégation des indicateurs : exemples et problèmes posés	86
Les méthodes de conception de nouveaux systèmes de culture	87
La démarche de conception des systèmes de culture	87
Concevoir à partir d'un diagnostic agronomique	89
Concevoir à partir de dires d'expert (le prototypage)	91
Concevoir à partir de modèles	92
Conclusion	97
Pour en savoir plus	98

II. ANALYSE ET MODÉLISATION DU PEUPLEMENT VÉGÉTAL CULTIVÉ

Introduction	101
4. Le peuplement végétal cultivé	103
L'approche thermodynamique et la production de biomasse	103
Flux de carbone entre le peuplement végétal et l'atmosphère	105

L'eau et le peuplement végétal : flux et efficience pour la production de biomasse	111
L'approche fonctionnelle	113
Caractérisation et indicateurs du statut hydrique instantané de la plante	114
La répartition des assimilats dans la plante	118
Répartition des assimilats dans la plante au sein d'un couvert	127
L'approche architecturale	130
Principe de la modélisation	132
Simulation du peuplement	133
5. La parcelle, lieu d'interactions entre différentes populations	137
Effets des bioagresseurs (agents pathogènes et mauvaises herbes)	137
Estimation des dommages des bioagresseurs	138
Classification des bioagresseurs selon leur mode d'action	138
Modélisation des interactions entre peuplements végétaux cultivés et bioagresseurs	142
Modélisation de la dynamique et du fonctionnement de peuplements végétaux complexes	145
Les premiers modèles de dynamique de populations associées	146
Prendre en compte la disponibilité des ressources dans des modèles de dynamique des populations	147
Modélisation écophysologique de peuplements plurispécifiques	148
6. Les modèles en écophysologie pour l'action en agronomie et la création variétale	151
Modèles pour la gestion multicritère des peuplements végétaux	151
Critères de qualité et d'impact environnemental pour gérer les peuplements végétaux	152
Démarches pour la modélisation multicritère du fonctionnement des cultures	154
Utilisations des modèles pour améliorer la gestion des peuplements	156
Modèles écophysologiques pour la génétique quantitative et l'innovation variétale	159
Quels modèles écophysologiques ?	160
Couplage entre modèles écophysologiques et génétiques	162
Méthodologie de la sélection variétale assistée par modèle écophysologique	163
Conclusion	167
Pour en savoir plus	168

III. EFFETS DES SYSTÈMES DE CULTURE SUR L'ÉVOLUTION DES ÉTATS DU MILIEU CULTIVÉ

Introduction	171
7. La composante chimique	177
Le carbone et l'azote	179
Couplage des cycles de l'azote et du carbone	179
Effets de la culture sur les cycles du carbone et de l'azote	183
Les facteurs déterminant la disponibilité de l'azote dans le système sol-plante	184
Maîtrise du cycle de l'azote en cours de culture : le bilan prévisionnel	186
Maîtrise du cycle de l'azote en période d'interculture	187
Le phosphore et le potassium	190
Spéciation, compartimentation dans les sols et modalités de prélèvement par les racines	191
Cycle du phosphore et du potassium dans l'agrosystème en relation avec le système de culture	193
Diagnostic sur la biodisponibilité et raisonnement de la fertilisation en phosphore et en potassium	195
8. La composante biologique	199
Le contrôle des bioagresseurs	201
Maîtrise des adventices	204
Contrôle des maladies et des ravageurs	213
Effets des systèmes de culture sur la biomasse du sol	218
Nature et fonctions de la biomasse du sol	218
Effets des systèmes de culture sur la biomasse des sols cultivés	219
Indicateurs de la qualité biologique des sols	223
9. La composante physique	225
Systèmes de culture et gestion de l'eau	225
Le bilan hydrique	225
Adaptation des systèmes de culture à la contrainte hydrique	228
Systèmes de culture et évolution de la structure du sol	230
Facteurs d'évolution de la structure autres que le travail du sol	231
Maîtrise de l'état physique des sols	237
Conclusion	245
Pour en savoir plus	248

IV. APPROCHE AGRONOMIQUE
DES SYSTÈMES TECHNIQUES PERTINENTS
DANS LES QUESTIONS D'ENVIRONNEMENT ET DE QUALITÉ DES PRODUITS

Introduction	251
10. Systèmes de culture et territoires : cas des questions environnementales	253
Évolution de la prise en compte des questions environnementales	253
Une histoire récente liée aux évolutions réglementaires	253
L'émergence du spatial	254
Un contexte pluriacteur et multidécideur	255
Analyse des relations entre territoire d'exploitation et paysage	256
Le paysage rural	256
Territoires d'exploitations agricoles et paysage	256
Impact des espaces décisionnels sur les espaces écologiques pertinents	268
Comment relier espaces écologiques fonctionnels et espaces décisionnels ?	269
Impact des espaces décisionnels sur les fonctionnements écologiques	273
Outils d'aide à la formulation de solutions	278
11. Agronomie et qualité dans les filières de production végétale	285
Un cadre conceptuel pour analyser les systèmes techniques finalisés par la maîtrise de la qualité	287
Le bassin d'approvisionnement	288
Trois dimensions pour décrire le fonctionnement d'un système local d'approvisionnement.....	288
Les deux temps du système local d'approvisionnement	289
L'organisation de la production à l'échelle du bassin d'approvisionnement	291
Définition des questions agronomiques en matière de qualité	291
Innovations techniques adaptées au système local d'approvisionnement	292
Place des référentiels finalisés par la qualité dans les exploitations agricoles	298
Scénarios d'organisation de bassins d'approvisionnement	303
Qualification des pratiques	303
Concevoir des référentiels	304
Évaluer les effets prévisibles des référentiels sur les systèmes de culture	307
Conclusion	309
Pour en savoir plus	310

Conclusion générale 311

Références bibliographiques 315

Index 361

Liste des auteurs 365

Préface

Penser et agir en agronome

Penser et agir en agronome, comme on pense et agit en physicien, en géographe (Frémont, 2005)... L'ambition de l'enseignant agronome, particulièrement dans l'enseignement supérieur où il est aussi chercheur, n'est-elle pas de conduire les étudiants dont il a la charge à pouvoir le faire ? Donc, à leur montrer la spécificité de la discipline « agronomie » qui s'intéresse en particulier au champ cultivé et à l'agriculteur qui le cultive¹ ?

Ancien titulaire de la chaire d'agronomie de l'Institut national agronomique Paris-Grignon (Ina P-G), je salue ce livre dont l'initiative revient au professeur Thierry Doré, l'un de mes successeurs. Les étudiants y trouveront les évolutions récentes de « la discipline scientifique qu'est l'agronomie » comme il le précise dans son introduction générale. Son mérite est aussi de fournir des points de repère aux agronomes, entre autres dans leurs débats, aussi bien internes qu'avec les autres disciplines scientifiques. Ces débats sont les témoins de la vitalité de l'agronomie, de savoirs non figés, toujours en évolution. Ils sont nécessaires car il n'y a de discipline que dans la mesure où une communauté existe². Les auteurs de cet ouvrage, enseignants et chercheurs, se caractérisent par leur volonté de dire l'agronomie d'aujourd'hui, tout au moins telle qu'ils tentent de la constituer par les connaissances qu'ils produisent. Bien qu'ils ne soient pas les seuls à « faire » de l'agronomie, à la « vivre » comme champ de travail, ils occupent une place privilégiée dans la construction des connaissances de la discipline « agronomie », tout particulièrement ceux qui l'enseignent et lui donnent ainsi visibilité et légitimité. Ce livre ne traite pas des savoirs des « utilisateurs », entre autres des agriculteurs qui ne sauraient cultiver la terre en mobilisant les seules données de cet ouvrage. Il ne traite pas non plus des savoirs professionnels des enseignants ou des chercheurs, pourtant si importants pour la transmission et la spécificité de la discipline³. Or, et j'y reviendrai, les connaissances et les savoirs sont le fruit de nos pratiques qui ne

1. « Agronomie » et « agronome » sont définis au sens strict et non au sens large, ce dernier étant par exemple celui qui donne son nom à l'Institut national agronomique Paris-Grignon (Ina P-G) qui forme des agronomes au sens strict, mais aussi des zootechniciens, des économistes « ruraux »...

2. La création de la Société européenne d'agronomie (Esa, <http://www.esagr.org>), en 1990, marque ainsi une date importante.

3. Latour, 1995, pour les chercheurs, Desgagné, 2005, pour les enseignants... Quels sont les savoirs de ceux qui « pratiquent » l'agronomie sans vouloir forcément la codifier en un corpus ayant valeur prescriptive ? S'articulent-ils, et comment, aux connaissances produites par les chercheurs ? Ce sont aussi des questions de recherche.

peuvent être isolées ni de l'histoire, ni de leur contexte (Latour, 1987). Se pencher sur ce qu'est « penser et agir en agronome », clarifier nos pratiques « de savoir, de mémoire et de pouvoir » (Noiriel, 1996)⁴, deviennent des enjeux, auxquels s'attachera cette préface.

L'agronomie ne disposait pas de livre de référence actualisé ni de manuel. L'enseignant du supérieur se « méfie » du manuel qui, presque par définition, date et emprunte un ton dogmatique. Le manuel tend à « occulter tout indice de la phase spéculative qui avait constitué la raison d'être de la théorie et fait sa spécificité, dans un premier stade » écrit Holton (1981). Ici, nous sommes plus en présence d'un livre que d'un manuel, d'autant plus d'actualité que l'agronomie est fortement sollicitée par les nombreux problèmes que nos sociétés vont devoir affronter. Pour clarifier nos pratiques d'agronome, ce qui a toujours été nécessaire (Sebillotte, 1974a), je propose, après un rappel historique, de développer ce que j'entends par « penser et agir en agronome », pour revenir à l'enseignement de l'agronomie avant de clore sur quelques perspectives d'avenir.

► Perspective historique

Les connaissances se construisent tant à partir des progrès théoriques qui engendrent en permanence de nouveaux questionnements, que des problèmes que rencontrent les sociétés, par exemple ceux auxquels ont à faire face les agriculteurs dans l'exercice de leurs activités. Cependant, la manière dont s'oriente cette production de connaissances dépend largement des points de vue adoptés par ceux qui en ont la charge, et donc de l'ambiance qui règne autour d'eux, même s'ils veulent (et doivent) s'en démarquer. À cet égard, les problèmes rencontrés par les agriculteurs qui traduisent, entre autres et à chaque époque, les rapports que les sociétés entretiennent avec la nature, constituent un contexte qui marque le contenu des productions des agronomes et des livres d'agronomie, autant que le public auquel ils entendent s'adresser. L'analyse, sur une longue période, de ce contexte pour l'agriculture et du public auquel s'adressent les livres d'agronomie permet d'identifier les filiations et les ruptures historiques du « penser » et de l'« agir » dans la discipline.

Autrefois...

Durant presque deux millénaires, les livres s'adressent au propriétaire-agriculteur, depuis *Les travaux et les jours* d'Hésiode (VIII^e-VII^e siècle avant J.-C.), en passant par Xénophon et son *Économique* (vers 380 avant J.-C.), jusqu'à Olivier de Serres, lui-même agriculteur au Pradel (Ardèche), avec son *Théâtre d'agriculture et mesnage des champs* (1635). Leur préoccupation est de dire comment gérer la fertilité des champs et les forces de travail (hommes et animaux) pour en tirer un profit « en bon père de famille ». Ces livres sont bâtis à partir des pratiques des propriétaires-agriculteurs jugés les meilleurs, mises en perspective de manière didactique par les

4. Les « écrits de pouvoir », en général non publiés, correspondent aux fonctions de direction, de gestion ou d'expertise dans l'enseignement et la recherche, les « écrits de savoir » sont les écrits scientifiques et les « écrits de mémoire », les textes de vulgarisation — ceux destinés au grand public.

auteurs. Ce sont des livres de gestion « durable » fondée sur l'observation et sur les savoirs professionnels.

Au XVIII^e siècle, un tournant est pris. Tull (1731) en Angleterre, Duhamel du Monceau (1750-1761) en France, entre autres, abandonnent pour partie l'empirisme pour justifier leurs conseils. Toujours guidés par la *volonté de déboucher sur l'action*, le premier bâtit une théorie de l'alimentation des plantes et en déduit des conséquences, entre autres pour le travail du sol, et le second introduit l'idée d'expérimentation, en particulier pour tester les idées de Tull. Ils jettent les premières bases de démarches scientifiques. L'Académie d'agriculture de France, créée à cette époque en France, débat quant à elle de ce qui peut être considéré comme « vrai ».

Les progrès de la chimie à la fin du XVIII^e siècle entraînent une envolée des connaissances. Par exemple, Théodore de Saussure (1804), Liebig (1840), et d'autres, montrent au laboratoire que les plantes peuvent s'alimenter uniquement à partir d'éléments minéraux, contredisant les tenants d'une alimentation par l'humus⁵. C'est l'émergence d'un nouveau courant théorique qui mobilisera tous les grands savants du XIX^e siècle. Mais il faut vérifier le bien-fondé de ces affirmations dans la durée et hors du laboratoire : la création, en 1839, de la station expérimentale de Rothamsted, en Angleterre (Harpenden, Hertfordshire)⁶ répond à cette exigence. Elle est née de l'association d'un chimiste et d'un fabricant d'engrais qui y trouvent tous les deux leur intérêt : théorique pour l'un, économique pour l'autre. À cette même période, la chimie est mise également au service du contrôle des teneurs en azote des guanos importés du Chili, ce qui entraîne la naissance de la première station agronomique en France, à Nantes.

Face à toutes ces avancées des sciences, de Gasparin⁷ se préoccupe d'accorder une place, au sein de celles-ci, à celle qui fixera des lois pour les pratiques des agriculteurs. Il publie en 1843, en cinq tomes, un vaste *Cours d'agriculture*, définissant l'agriculture comme une « science technologique ». Il y développe le concept de « système de culture » ; mais n'y trouve-t-on pas aussi, en émergence, l'idée de la « parcelle cultivée » comme objet scientifique ? Son remarquable effort de synthèse est cependant abandonné. Il ne convainc pas le monde agricole⁸, et les dynamiques disciplinaires qui explosent au cours du XIX^e siècle dans de nombreux pays du monde l'emportent (physiologie végétale, génétique, pédologie...). Comme l'attente de livres prescrivant des recettes à appliquer est toujours aussi forte, les ouvrages de vulgarisation, mêlant empirisme et teinture scientifique, continuent à fleurir, mais

5. Pour ces derniers auteurs, les corps organiques ne pourraient être que le fruit d'une « force vitale » représenté par l'humus lui-même issu de la décomposition de végétaux. Les *Recherches chimiques sur la végétation* de Nicolas Théodore de Saussure (1804) réfutent les théories de l'humus : la plante puise des sels minéraux qui sont dissous dans le sol. Saussure montre l'importance cruciale de ces sels en faisant pousser des plantes sur un milieu inorganique.

6. C'est la plus ancienne station expérimentale au monde. Voir le site Internet : <http://www.era.iacr.ac.uk>, entre autres la rubrique « Broadbalk continuous wheat ».

7. Il sera le premier titulaire de la chaire d'agriculture du nouvel Institut national agronomique à Paris, recréé en 1876 après une création fugace en 1852. C'est aussi un propriétaire terrien.

8. Heuzé, professeur à Grignon, dit à peu près dans son livre *Les assolements*, en 1862 : « Il s'agit de savoir si l'on veut faire de l'argent avec l'agriculture, ou, comme monsieur de Gasparin, de l'agriculture avec de l'argent ! ».

en ayant perdu ce qu'aurait dû produire la pensée de de Gasparin et de quelques autres. À titre d'exemple, le sol prend une place démesurée par rapport au climat⁹, ce qui entraînera de nombreuses dérives et la discussion sans fin de pseudo-concepts, comme celui de « vocation des sols ».

Hier...

Ainsi, l'agronomie était marquée d'ambiguïté du fait de sa liaison avec l'agriculture. Il fallait nourrir l'humanité, valoriser les avancées des sciences et des technologies, mettre en valeur de nouveaux territoires, assurer aux agriculteurs les moyens d'entrer dans la course à la productivité... Trouver des solutions était, dans la pensée collective, le rôle de l'agronomie. La conquête de l'ouest des États-Unis, la mise en valeur des terres dans les pays tropicaux ou en Europe fourmillent d'exemples qui illustrent cette ambiguïté, cette mise des connaissances au service d'intérêts divers et financiers qui s'alimentaient de slogans et/ou induisaient des justifications erronées de certaines pratiques¹⁰. Au débat entre théories s'était substituée la résolution de problèmes comme cadre privilégié de production des connaissances !

C'est la situation, à quelques variantes près, dans le monde entier vers 1950. Par exemple, l'Institut national agronomique à Paris avait alors une chaire d'agriculture¹¹ qui enseignait l'agriculture générale (étude des règles générales applicables à la mise en culture des sols) et l'agriculture spéciale, ou « phytotechnie » (étude des règles particulières à la culture des différentes plantes) (Dumont, 1960). On améliorait des règles, on produisait des recettes, on plaquait des explications. La pensée agronomique était, de fait, pilotée par les problèmes qui se manifestaient dans les parcelles mais, paradoxalement, cet objet même de recherche, la parcelle, était perdu de vue.

L'apport de Stéphane Hénin, particulièrement en France¹²

L'apport essentiel de Stéphane Hénin à l'agronomie française a été de permettre définitivement la clarification des rapports entre agronomie et agriculture. Cette « rupture épistémologique », pour reprendre les termes de Gaston Bachelard qui a encadré sa deuxième thèse¹³, est l'une des sources de l'originalité de l'évolution de la pensée agronomique française à partir des années 1960.

9. Il faudra, en France, attendre mon cours polycopié de 1979 de sept tomes pour voir renverser l'ordre d'exposition de l'agronomie et partir du peuplement végétal pour n'examiner qu'ensuite le milieu physique et biologique, examen commençant par le climat et non par les sols.

10. Salmon *et al.*, 1953 décrivent fort bien ce qui s'est passé aux États-Unis dans la première moitié du xx^e siècle, entre autres pour la mise en valeur des terres lors de la conquête de l'Ouest. Ils discutent en particulier de la manière dont se forment des idéologies, par exemple sur le rôle de la charrue (« la pluie suit la charrue », est le slogan !), de la jachère...

11. La confusion avec l'agriculture en tant que pratique des agriculteurs est toujours présente. Il sera d'ailleurs difficile d'obtenir, en 1973, la création d'une chaire d'agronomie, et non plus d'agriculture, à l'Ina P-G.

12. Voir Sebillotte, 1993a.

13. Soutenue en 1944 avec pour titre *Essai sur la méthode en agronomie*, elle a été publiée récemment (Hénin, 1999).

Hénin venait de la recherche. Après une première thèse sur la structure du sol et sa stabilité, il voulait travailler scientifiquement la question des techniques culturales¹⁴. Devenu professeur à l'Ina en 1958, son enseignement se détache totalement d'une volonté de codifier les pratiques des « meilleurs agriculteurs » pour s'intéresser aux mécanismes. Venu du laboratoire, il travaille essentiellement à l'échelle de la station culturale¹⁵, même s'il extrapole ses résultats à la parcelle lorsqu'il donne des conseils en matière de travail du sol après avoir examiné un profil cultural avec une méthode qu'il a créée avec son équipe (Hénin *et al.*, 1960). Professeur, il est obligé de s'ouvrir à d'autres échelles, à une autre vision du monde. Ainsi « utilisera-t-il » l'Académie d'agriculture, dont il est membre, pour développer ses réflexions, entre autres celles issues de son activité d'enseignant dans laquelle il se sent responsable d'un « champ disciplinaire ». De nombreux aspects de méthode sont ainsi élaborés, et c'est du haut de cette tribune qu'il réclame, déjà, un « observatoire de la terre ». En définitive, peu compris de ses collègues, il quittera l'Ina au bout de huit ans. Son immense mérite aura été de permettre le début d'une prise de conscience : l'agronomie n'est pas une agriculture « savante ». Ses apports à l'agronomie, en particulier ses méthodes, furent considérables, même si l'on peut dire aujourd'hui qu'il fut plus agronome « par emprunt » : l'agronomie constitua au mieux, pour lui, une « écologie appliquée » (Maquart *et al.*, 1971). La parcelle comme objet scientifique lui manquait, et peut-être n'eut-il pas suffisamment le désir épistémologique de construire l'agronomie autour d'objets, de méthodes et de concepts *spécifiques*.

Cette période fut marquée par de remarquables avancées dans la connaissance du fonctionnement du peuplement végétal, dans ses rapports avec le climat, le sol, les ennemis des cultures, en particulier en Angleterre, en Australie et aux États-Unis. De manière significative, les esprits changeaient ainsi que les rapports au monde. Les prémices des disciplines écologiques se dégagent, non sans peine à travers des travaux de chercheurs, mais aussi à travers leurs livres grand public dans lesquels ils prennent clairement position en faveur de l'environnement, contre les pollutions, les méthodes dites « modernes », qu'il s'agisse de production d'énergie ou de production agricole... Il faudrait un livre entier pour citer ces différents apports¹⁶ !

14. Formé chez A. Demolon, il venait de créer à l'Inra le « laboratoire des techniques culturales », à Versailles.

15. Portion de parcelle de quelques centaines de mètres carrés considérés comme homogènes.

16. Citons, hors de France et à titre d'exemple, les travaux d'Eugene Odum aux É-U (Odum, 1953). Son livre *Fundamentals of Ecology*, destiné précisément à appuyer ses cours, influencera des générations d'écologistes et d'agronomes ; il accordait une grande place à la pensée holistique qui envahissait par ailleurs les sciences humaines. C'est lui qui osera suggérer que l'écologie fasse partie du cursus de son université ! Citons également les travaux de Penman (par exemple 1963) et de Monteith (par exemple 1973) en Angleterre, qui apporteront aux agronomes les moyens de mettre des valeurs sur les concepts d'« évapotranspiration potentielle » et d'« évapotranspiration réelle », si utiles pour raisonner la conduite des cultures. Pendant le même temps, une physiologie végétale proche des préoccupations des agronomes se constituait. Citons le livre *An Introduction to Crop Physiology* de Milthorpe et Moorby (1974), qui s'appuie sur les nombreux travaux étrangers, dont ceux de Watson (toujours par exemple 1952), Russel (par exemple 1973), Evans et Wardlaw (par exemple 1976), Baldwin (par exemple 1976), de Wit (par exemple 1978)... Parmi les grands livres prenant position pour l'environnement, citons ceux de Carson (1962) avec son *Silent Spring*, de Commoner (1971) et son *The Closing Circle: Nature, Man, and Technology*. Je n'oublierai pas Wischmeir et Smith (synthèse en 1978) et leurs travaux remarquables sur l'érosion, dans lesquels ils ont utilisé les nombreux résultats d'essais des stations expérimentales américaines pour aboutir à une équation universelle de pertes en terre et en dériver des conseils pour l'ensemble des É-U.

► Penser et agir en agronome

Une représentation de l'activité scientifique

Les agronomes sont hommes et femmes de terrain, ils travaillent pour partie au champ, et pour y agir. J'ai insisté sur l'importance épistémologique de la *déconnexion* de l'agronomie d'avec l'agriculture ; comment, alors, le chercheur agronome produit-il la science agronomique, comment arrive-t-il aux résultats présentés dans cet ouvrage ? Pour éclairer ces aspects, je représente de manière simplifiée l'activité scientifique par la *figure 1*, ci-dessous. Celle-ci nous rappelle que la production scientifique est toujours le fait de chercheurs inscrits dans une histoire et dans un contexte et ayant un point de vue, que ces chercheurs ont des objets et des méthodes adaptées, qu'ils produisent des concepts et des théories, ces dernières étant évolutives, ce que signifie la flèche 4 de cette figure.

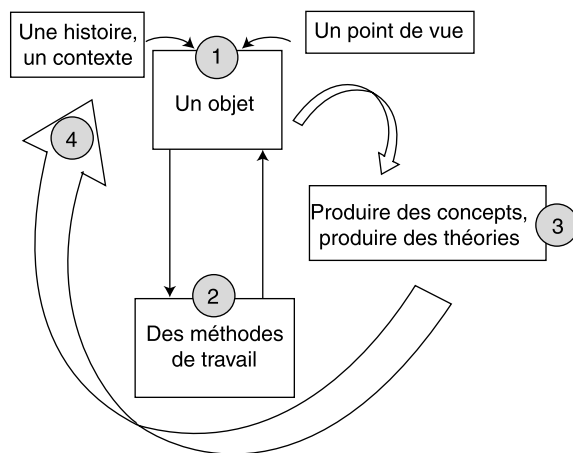


Figure 1. L'activité scientifique.

Les trois objets de l'agronome

Ainsi, nous serons chercheurs en agronomie si nous avons des objets, des méthodes, des concepts et des théories spécifiques.

Le premier objet : la parcelle

Le premier objet de l'agronome est la parcelle, fruit de l'activité de l'agriculteur. Cette portion d'espace, elle-même insérée dans un espace plus vaste — réseau de parcelles et d'éléments non cultivés qui forment un paysage —, reçoit, parce qu'elle est cultivée, des objectifs de production, quantitatifs et qualitatifs. L'agronome doit donc non seulement pouvoir comprendre ce qui se passe dans les parcelles des agriculteurs — et pas seulement dans ses parcelles expérimentales — mais aussi fournir des conseils d'action, ce qui suppose qu'il soit capable de faire un diagnostic et des pronostics, d'estimer des potentialités (Boiffin, Sebillotte, 1982). En effet, l'un des grands apports de la science agronomique des dernières décennies est de relier des objectifs de production à des « besoins » de la culture et, ainsi, de fournir

des bases objectives pour la détermination des techniques culturales, par exemple pour la fixation des doses d'engrais azoté à apporter.

Les objectifs de production végétale, majoritairement alimentaires ou industriels, comme les moyens techniques pour obtenir cette production, évoluent au cours du temps ; le milieu lui aussi se transforme sous l'action directe de l'homme, jusques et y compris le changement climatique ; il en est de même des exigences de la société. La parcelle cultivée, fondement de l'agronomie, est ainsi un objet en perpétuelle transformation. À titre d'exemple, les teneurs en matières organiques des sols cultivés français n'ont jamais été aussi basses du fait des faibles restitutions organiques permises par les systèmes de culture actuels. Il en résulte des comportements nouveaux de ces objets « parcelles ». L'agronome doit aussi se prononcer sur la nécessité de modifier ou non ces teneurs, et ses prescriptions s'inscriront dans un contexte de connaissances et de moyens techniques différents de celui des décennies antérieures. L'agronome est ainsi, en permanence, au carrefour d'histoires : celle de la parcelle, celle des connaissances, celle des contextes. Il se trouve donc lié tant aux actions passées qu'à celles du futur qu'il prescrit : les actions culturales structurent et sont structurées par le travail de l'agronome ! On voit la nécessité de penser la parcelle cultivée comme un système.

Pour étudier la parcelle, l'agronome a besoin de méthodes. L'observation visuelle n'étant pas suffisante, il en crée de spécifiques et/ou emprunte celles d'autres disciplines en vue de caractériser les différentes composantes d'une parcelle : chaque plante et l'ensemble auquel elle appartient — le peuplement végétal — ; le sol, sa surface et sa profondeur ; les autres êtres vivants... Un exemple d'emprunt est l'analyse du végétal. Cette dernière a été élaborée par les chimistes, mais les normes d'interprétation sont spécifiques à l'agronome. Quand pourra-t-il parler de carence et, dans cette éventualité, faudra-t-il agir ? La réponse à cette question fluctue selon les conditions économiques, les préoccupations environnementales... Aujourd'hui, les agronomes recherchent les possibilités pour le peuplement cultivé de supporter certaines carences à certaines phases de son développement, sans compromettre la production (Jeuffroy et Bouchard, 1999). Pour répondre à ces carences, ils ont dû se rendre capables de juger des états du peuplement végétal au regard des objectifs de production, compte tenu des évolutions ultérieures possibles du milieu écologique. Ils forgent donc des indicateurs, toujours plus performants et faciles d'emploi, utilisés dans les démarches de diagnostic agronomique pour identifier les facteurs limitants de la production et dater leurs périodes d'expression (Sebillotte, 1980a ; Meynard et Sebillotte, 1983)¹⁷.

Un exemple de méthode spécifique concerne l'appréhension de l'hétérogénéité parcellaire, temporelle et spatiale. Pendant longtemps, les agronomes de tous les pays du monde ont cru qu'il suffisait de réduire la taille de leurs parcelles expérimentales, d'opter pour des plans expérimentaux sophistiqués¹⁸ et de répéter leurs

17. Les indicateurs en agronomie sont largement traités dans les première et deuxième parties de cet ouvrage.

18. On doit citer les apports considérables de R.A. Fisher qui travailla à Rothamsted de 1919 à 1933. À partir des dispositifs expérimentaux et de leurs résultats (par exemple Fisher, 1924), il fait faire de très grands progrès aux inférences statistiques et publie, en 1935, son ouvrage de base sur les plans expérimentaux : *Design of Experiments*.

traitements plusieurs années et en différents lieux, pour contrebattre les effets de la variabilité, qu'elle provienne de la parcelle elle-même (sol, milieu biologique...), du climat, des opérations culturales et des réactions des plantes cultivées. Mon parti pris a toujours été d'accepter cette hétérogénéité comme constitutive et d'essayer de la cerner¹⁹ plutôt que de l'esquiver. La méthode du tour de plaine (Sebillotte, 1969) a permis d'appréhender l'hétérogénéité intra- et interparcellaire. L'agronome, en effet, est confronté au redoutable problème de réaliser la synthèse finale des synthèses des états du peuplement végétal et du milieu écologique faites au niveau de chaque station d'observation, pour « composer » un diagnostic parcellaire et aboutir à des prescriptions. Comment procéder ? Il faudrait trouver la combinaison qui minimise l'ensemble des risques de se tromper face aux aléas climatiques, sur chacune des stations culturales qui composent la parcelle. La solution est souvent obtenue « à vue de nez », et sa qualité est tributaire du savoir professionnel ! Paradoxalement, les évolutions technologiques de l'informatique embarquée sur les machines agricoles et les progrès de la modélisation peuvent apporter une solution partielle en adaptant certaines des techniques culturales aux états *locaux* du peuplement végétal et du milieu écologique constatés à chaque instant du trajet des machines. Diagnostic et prescription ne se font plus « à la parcelle » mais « station par station ». C'est clairement l'ambition de ce que certains appellent l'« agriculture de précision ».

La meilleure connaissance de l'objet que permettent les méthodes, progressivement élaborées par les agronomes, conduit ces derniers à formuler des concepts, pour pouvoir parler de ces objets dans un langage théorique qu'il faut construire pour asseoir la discipline. J'ai créé le concept d'« itinéraire technique » (Sebillotte, 1974a, 1978) pour traduire le fait que plusieurs combinaisons de techniques culturales étaient possibles pour atteindre un même objectif de production. C'était la réponse au constat que chaque technique (de travail du sol, de semis, de fertilisation...) doit tenir compte des états créés par les précédentes et des pronostics sur le climat à venir et, qu'à son tour, elle conditionne les techniques suivantes. L'ensemble des techniques appliquées à une culture constitue lui-même un système : la définition d'une technique culturale se fait nécessairement en référence aux précédentes et à leurs effets sur le milieu et sur le peuplement végétal. L'agronome devrait toujours prescrire des itinéraires techniques, et non une collection de techniques culturales définies indépendamment les unes des autres et des états du milieu. Ainsi, pour l'agronome moderne, les interactions sont constitutives de son travail et il refuse la *conception additive* qui a longtemps prévalu dans la vulgarisation française, mais aussi dans les grands centres internationaux de recherche qui proposaient tous des « paquets technologiques » à la vulgarisation²⁰ (Aubry *et al.*, 1986, Byerlee *et al.*, 1991).

Insistons sur le concept central de l'agronomie, celui de « système de culture »²¹. Présent chez de Gasparin, il devait être adapté aux progrès des connaissances. S'il

19. Par exemple, un peuplement végétal est hétérogène, entre autres, du fait des individus qui le composent : différences d'états de croissance et de développement, distance entre les pieds... (Masle et Sebillotte, 1981).

20. En forte opposition avec l'agronomie française qui rejette l'idée de modèle de développement unique, encore portée par des institutions comme le FMI... (Stiglitz, 2002).

21. La partie 1 de cet ouvrage lui est dédiée. Elle développe entre autres la conception de nouveaux systèmes de culture par la voie de la modélisation à partir de nombreux et intéressants travaux récents.

n'évoquait que la « rotation culturale » à l'origine, il m'a semblé nécessaire d'y introduire le nouveau concept d'« itinéraire technique » pour tenir compte de la grande variabilité actuelle des manières de cultiver des agriculteurs, et pour le rendre plus opératoire. En effet, un concept est une « brique » du langage théorique d'une science et, dans le cas de l'agronomie, un outil pour analyser les pratiques des agriculteurs. Ce concept permet ainsi d'aborder la manière dont les agronomes *pensent la mise en valeur des parcelles*, et la manière dont les agriculteurs *réalisent la mise en valeur de territoires*. C'est ce qui explique sa place centrale en agronomie.

Les théories organisent les connaissances et permettent aux agronomes d'analyser des situations réelles, et/ou de prescrire des actions culturelles. Nous l'avons vu, un progrès décisif a été réalisé lorsque l'on a pu relier des objectifs de production à des quantités d'azote à mobiliser pour la culture du blé. Cette idée a lentement mûri, depuis la première approche par un économiste (Lecouteux, 1855) qui voulait fournir des principes d'action, pour finalement ne s'imposer que dans les années 1980, suite aux travaux de Rémy et Hébert (1977). Les progrès réalisés depuis dans de nombreux domaines complémentaires ont permis de construire une théorie de la fertilisation azotée de portée très générale qui englobe, entre autres, la fourniture d'azote par le sol²². Elle s'accompagne d'indicateurs d'action spécifiques qui permettent de remplacer l'ancien indicateur de la verse utilisé par les agriculteurs pour régler les doses de fertilisants azotés, celui-ci étant devenu inadéquat, entre autres du fait de l'utilisation de nouvelles techniques réduisant l'élongation des tiges, et d'améliorations variétales augmentant la résistance à la verse. Renouvelée, la théorie de la fertilisation a permis de traiter sérieusement des relations entre production et conservation de l'environnement et de dépasser les approches précédentes (Boiffin *et al.*, 1981 ; Meynard, 1985 ; Sebillotte et Meynard, 1990).

Les théories ont pour vocation de rendre « universelles » les connaissances produites. Elles peuvent y arriver par deux voies : travailler sur des objets génériques, stylisés, c'est-à-dire théoriques au sens de n'exister que dans le cadre de la théorie elle-même, ou se complexifier suffisamment pour pouvoir être testées dans le contexte de la réalité quotidienne et permettre d'y agir. L'agronomie emprunte, par nécessité, surtout la deuxième voie. Aussi les agronomes pratiquent-ils un véritable comparatisme, mobilisant concepts et méthodes sous des latitudes variées pour vérifier la solidité de ce qu'ils élaborent (Sebillotte, 2001b), à l'image de ce que d'autres ont fait pour expliquer la répartition des systèmes de culture à travers le monde (Duckham et Masefield, 1969). Aujourd'hui, la construction des théories se nourrit beaucoup des modèles de plus en plus sophistiqués produits par les agronomes et par les disciplines qui leur sont proches²³. Par exemple, dans les questions d'érosion déjà évoquées, les travaux des années 1960 reposaient sur une corrélation entre un index d'énergie des pluies et les pertes en terres mesurées sur des parcelles expérimentales. Aujourd'hui, on sait passer par une étape intermédiaire : les comportements de surface des sols qui se « ferment » progressivement, ce qui permet une

22. Voir les nombreux développements dans cet ouvrage, aux parties 2 et 3.

23. Voir la partie 2 de cet ouvrage qui développe ces questions, entre autres celle du couplage entre disciplines pour répondre à différents objectifs d'action.

compréhension beaucoup plus fine des mécanismes de l'érosion (Boiffin, 1984). Mais, pour dépasser les affirmations normatives qui fixaient un potentiel érosif à une combinaison « climat-culture-nature du sol » et pour rendre possible la compréhension des phénomènes érosifs sur le terrain, il a fallu des travaux qui rendent compte des effets sur l'érosion de la position des parcelles dans le territoire du bassin versant (Papy et Boiffin, 1989 ; Papy et Souchère, 1993).

Enfin, l'agronome qui ne raisonnerait les connaissances sur la parcelle agricole que par les résultats de la station expérimentale doit mesurer les limites de son outil d'investigation. Ainsi, lorsque des agriculteurs se posent la question de la possibilité de la monoculture, c'est dans leurs conditions que la réponse doit être apportée ! D'où l'importance de la question du *test des modèles en conditions « réelles »*. Mais aussi la nécessité de mettre au point des méthodes spécifiques pour appréhender la réponse à une telle question, à travers les résultats des parcelles des agriculteurs qui pratiquent la monoculture, comparés à ceux, de la même région, qui ne la pratiquent pas ! Il a donc fallu inventer de nouveaux dispositifs d'enquête-action combinant enquête et expérimentation, et se pencher sérieusement sur la question de la comparaison des parcelles, de la valeur des témoins (Manichon et Sebillotte, 1973). Différents travaux ont, par exemple, largement expliqué les effets pervers du travail en toutes petites parcelles où, précisément, la prétention était de prendre toutes les précautions pour éviter des artefacts, pour cultiver et observer des « situations théoriques » (Manichon et Roger-Estrade, 1990). Des méthodes ont été développées pour appréhender la dimension régionale (Boiffin *et al.*, 1981 ; Doré *et al.*, 1997). Ces travaux dans les parcelles des agriculteurs permettent de *tester le pouvoir explicatif* des concepts et des théories de l'agronomie.

Le deuxième objet : l'agriculteur cultivant ses parcelles

L'agronome a pour ambition de voir les connaissances qu'il produit utilisées par l'agriculteur. Or, il constate rapidement que celui-ci ne raisonne pas comme lui, qu'il a sa propre rationalité. Cette différence de rationalité s'impose comme une interrogation théorique — « *les gens ont de bonnes raisons de faire ce qu'ils font* » —, et prolonge les travaux des agronomes qui considéraient l'exploitation agricole comme un système (voir par exemple Osty, 1978). Les agronomes ne peuvent traiter d'irrationnel, *a priori*, ce qu'ils ne comprennent pas. L'agriculteur cultivant sa parcelle est devenu le *deuxième objet scientifique* de l'agronome.

Il a fallu, là aussi, des méthodes. La sociologie nous a appris le piège majeur de l'enquêteur qui fait les réponses en se substituant à celui qui est enquêté. Mais, très vite, les agronomes ont dû forger des méthodes d'enquête spécifiques pour pouvoir rester critiques sur les réponses de l'agriculteur. Un savoir technique s'impose pour « décoder » les réponses. Les travaux des chercheurs en psychologie cognitive ont aussi beaucoup apporté et en particulier, à l'époque, ceux sur les raisonnements des contrôleurs aériens (Spérandio, 1980). L'agriculteur n'est-il pas souvent dans une situation voisine : pressé par le temps et devant compter sur son expérience pour choisir une conduite ?

Comme pour la parcelle, des concepts ont été forgés pour rendre compte des faits empiriques : comment l'agriculteur mobilise-t-il son expérience ? Comment l'a-t-il constituée en savoir professionnel ? Comment celui-ci évolue-t-il au gré de ses

réussites et de ses échecs²⁴ ? Les logiques d'action de l'agriculteur ont ainsi été modélisées par ce que nous avons appelé le « modèle pour l'action de l'agriculteur »²⁵. La construction d'un savoir professionnel est contextuelle, elle a pour objectif de permettre l'action, ici et maintenant, et non de produire des connaissances à vocation universelle²⁶. Cela conduit à distinguer deux types de diagnostic (Sebillotte, 1990) : celui, interne, de l'agriculteur fondé sur son expérience, son savoir professionnel et donc sur son histoire, et celui, externe, de l'agronome fondé sur ses connaissances théoriques et la manière dont il les mobilise. La confrontation de ces deux diagnostics, essentielle, nous emmène au cœur de la compréhension de la soi-disant « irrationalité » des acteurs et à la source de questionnements que les chercheurs refoulent souvent comme non scientifiques. En témoigne l'incompréhension fréquente des agronomes confinés au niveau de la parcelle lorsque des innovations qu'ils proposent pour résoudre des problèmes ne sont pas adoptées par les agriculteurs ! On retrouve ce travers chez de nombreux chercheurs confinés dans leur laboratoire (Callon *et al.*, 2001). Ainsi, ces savoirs professionnels nous renvoient à nos propres connaissances agronomiques. L'agriculteur est bien le deuxième objet scientifique de l'agronome, ce qui distingue clairement ce dernier d'un écologue appliqué !

L'analyse et la modélisation de l'action conduite par les agriculteurs aident ainsi à fixer des exigences pour que nos connaissances agronomiques soient « assimilables » par ces acteurs. Elles déterminent *la distance à parcourir pour rendre ces connaissances utilisables dans la pratique agricole*, donc les questions auxquelles il faut apporter une réponse pour passer d'un *acte technique théorique* à une *opération culturale*. Par exemple, épandre cinquante kilogrammes d'azote à l'hectare a des effets différents selon que le sol est sec ou humide en surface, semer du maïs à une densité donnée suppose que l'on sache respecter les écartements entre deux passages successifs du semoir, ce qui exigera des procédures spécifiques non incluses dans le choix théorique de la densité du peuplement, travailler le sol avec un instrument aratoire ne dit rien des états structuraux du sol créés, ceux-ci ne peuvent être définis qu'*a posteriori*... L'agronome doit passer d'un univers de représentations à un autre qu'il lui faut connaître²⁷. On comprend pourquoi des références pour l'action ne peuvent être de simples transpositions des théories. Mais en retour, ceci montre toute la difficulté du test d'un modèle théorique dans les conditions de la pratique !

24. Ces questions sont posées dans la partie 1 de cet ouvrage.

25. Sebillotte et Soler, 1990. Nous l'avons d'abord appelé « modèle général » pour souligner son existence chez tous les agriculteurs que nous avons étudiés (Cerf et Sebillotte, 1988 ; Sebillotte et Servettaz, 1989).

26. D'ailleurs, l'agriculteur se heurte à une difficulté spécifique puisqu'il n'est presque jamais en situation de vraies « répétitions », au sens statistique, du fait de la variabilité des terrains et du climat : il n'observe donc que rarement les conséquences de ses actions sur des situations identiques au départ (Sebillotte, 1978).

27. La recherche des logiques d'action est particulièrement importante lorsque des agronomes procèdent à des typologies d'agriculteurs, font des études comparatives de systèmes de culture entre régions et entre pays, ou lorsqu'ils étudient les modalités d'adoption d'une innovation.

Le troisième objet : le territoire

Les agronomes de la parcelle comme ceux qui prennent pour objet l'agriculteur savent que, faute de se référer à des espaces plus vastes, ils parlent mal de la lutte contre les ennemis des cultures, de la dissémination du pollen et de ses effets sur l'évolution des espèces sauvages et des variétés cultivées, ou encore de l'environnement comme de la gestion de bassins de collecte pour approvisionner des usines — nous l'avons vu pour l'érosion. L'espace devient une dimension primordiale pour penser les actions sur les parcelles et dans les exploitations agricoles. Mais l'organisation de cet espace, son utilisation, hier simples retombées de l'activité de production agricole, sont aujourd'hui objet de débats et nécessitent donc des recherches.

Pour rendre compte de ce qui se passe, une discipline peut devoir intégrer la dimension spatiale, voire territoriale d'un problème pour le traiter correctement. Une fraction de la partie 4 de cet ouvrage l'illustre abondamment pour l'agronomie, mais plusieurs des recherches exposées ne se contentent-elles pas d'étendre le registre du premier objet de l'agronome ? Ce dernier peut-il en rester là ? Non, comme certains travaux relatés en témoignent. Certes, la tentation est forte de rapprocher territoire et parcelle, ces deux objets, somme d'actions passées, présentes et à venir, n'existant qu'en se construisant dans le temps en fonction d'un projet, d'autant plus que ces derniers travaux ne sont pas inutiles !

Mais le territoire est un construit social, celui des institutions, des acteurs individuels... Ainsi font irruption, à côté des problèmes d'échelles spatiales, ceux liés à l'existence d'institutions et d'acteurs individuels ayant des usages, des attentes, des responsabilités différents vis-à-vis de l'espace et qui sont obligés de « s'organiser ». La complexité provient, entre autres, du fait que les actions qui construisent le territoire sont liées à de multiples réseaux d'informations, de relations, d'actions-réactions (voire sont commandés par eux) dans lesquels se combinent des influences déterminées par la proximité ou la contiguïté spatiale (dimension horizontale) et des influences déterminées par des niveaux d'organisation socio-économique englobants, par des liens aux marchés... (dimension verticale). La nécessité d'une gestion collective des territoires s'impose de plus en plus et oblige les acteurs à composer, à rechercher des compromis pour définir des projets plus ou moins communs, donc à définir, de fait, des échelles spatiales et des pas de temps qui structurent ces projets, perpétuellement en train de se faire et se défaire.

Le territoire à construire, le « territoire-projet » naît ainsi comme *objet scientifique indépendant et nouveau* qui n'appartient, de fait, à aucune discipline particulière : c'est un *objet scientifique transdisciplinaire*²⁸ qui exige un collectif pluridisciplinaire. Les chercheurs sont ainsi engagés dans de nouvelles pratiques de recherche, dans des confrontations-coopérations entre différentes disciplines. Cet objet a pour origine les acteurs, appelés ici « partenaires de la recherche », puisque c'est eux qui font appel aux chercheurs pour leur projet. Ces traits particuliers justifient de développer quelques aspects de méthodes, d'autant plus que beaucoup des problèmes du futur impliquant l'agronomie relèveront de ces approches transdisciplinaires.

28. Dans l'interdisciplinarité les questions posées aux autres disciplines viennent de la discipline elle-même tandis que, dans la transdisciplinarité, les questions viennent de la volonté de pouvoir agir à partir des résultats des recherches.

Quelles méthodes utiliser ? Ayant traité de ces questions ailleurs (Sebillotte, 2000, 2002a), précisément à l'occasion de la conception et de l'animation de programmes de recherche « pour et sur » le développement territorial, je serai bref. La première étape de la mise en œuvre du dispositif est la construction du partenariat, c'est-à-dire la détermination des problèmes et des questions « de la pratique » sur lesquels partenaires et chercheurs acceptent de travailler ensemble. Mais quel regard porter sur les questions recensées ? Prenons un exemple typique : les pollutions par les éléments minéraux d'origine agricole dans une région d'élevage. Un premier regard consiste à vouloir traiter le problème à sa source, donc à évaluer et à comprendre les pratiques des agriculteurs ; l'agronomie avec ses deux premiers objets y répond en partie. Mais un deuxième regard est possible qui consiste à se demander pourquoi ces pollutions s'amplifient depuis quelques décennies ? Les hypothèses à formuler portent alors sur plusieurs domaines d'explication potentielle : multiplication des élevages « hors sol », utilisation pour les animaux d'aliments produits hors de la région²⁹, insuffisance des conseils aux agriculteurs, modalités du calcul micro-économique... Seul un collectif de chercheurs peut adopter ce regard. Un troisième regard peut aussi exister : il consiste à se demander ce qui relie ces phénomènes et les orientations générales du développement agricole. Quels sont les rôles de la course à l'amélioration de la productivité du travail, de l'intensification, de la politique agricole commune européenne, de l'orientation des recherches... ? À nouveau, seul un collectif de chercheurs pourra adopter ce regard mais il sera, au moins partiellement, différent du précédent. Ces trois regards soulignent l'une des difficultés des recherches sur les territoires : à quelle échelle spatiale traiter le problème, et à quel niveau d'organisation ? Selon le regard adopté par les partenaires et les chercheurs, les questions posées seront différentes. Mais, clairement, l'agronomie de la parcelle et celle de l'agriculteur seront insuffisantes, quelle que soit l'étendue des connaissances théoriques qu'elles pourraient mobiliser en matière d'environnement.

La seconde étape de mise en œuvre du dispositif consiste à construire les objets scientifiques des recherches en utilisant le principe de *quasi-décomposition du système des questions*. Pour ce faire, on distingue des sous-systèmes qui n'ont entre eux que des interactions faibles et sont donc quasiment indépendants dans le court terme, alors qu'« à long terme, le comportement de chacun des sous-systèmes n'est affecté par le comportement des autres que d'une façon agrégée » (Simon, 1991). Pour être étudié, chacun de ces sous-systèmes exigera l'intervention de différentes disciplines, et donnera lieu à la constitution d'un collectif de chercheurs qui devront travailler étroitement ensemble parce que l'objectif demeure de déboucher sur l'action. Ces chercheurs devront alors construire une *représentation théorique temporaire* de l'objet qui les rassemble, par nature transdisciplinaire et créée par cette volonté de déboucher sur l'action. Cette représentation devient le modèle à tester par le collectif de chercheurs.

29. Une grande partie des éléments minéraux contenus dans les effluents d'élevage proviennent des matières riches en protéines et des céréales souvent produites dans d'autres régions du monde et de France, et dont l'utilisation est favorisée par la politique agricole commune de l'Union européenne, entre autres depuis 1992.

Les trois métiers des agronomes

J'ai dégagé les trois objets qui, de manière variée, sont à la base de l'activité de production des connaissances en agronomie : la parcelle, l'agriculteur et le territoire. Pour les aborder, les agronomes ne mobilisent ni les mêmes concepts et théories, ni les mêmes méthodes. Pour moi, il s'agit là des métiers spécifiques de l'agronomie (figure 2) (Sebillotte, 2002b). Ces trois métiers sont indissociables et interagissent les uns avec les autres. Mais, j'y insiste, *c'est par leur articulation constante que l'agronomie peut prétendre apporter sa contribution aux relations science-société, à travers des mouvements incessants de questions-réponses entre eux*. Reconnaître l'existence de métiers différents, lorsque l'on affirme la nécessité d'une communication permanente entre ces métiers pour assurer une « vie disciplinaire », a selon moi plus d'avantages que d'inconvénients. Cela permet, entre autres, que chaque agronome ait des échanges approfondis, pertinents et riches de futur : d'une part au sein de sa discipline et, d'autre part, avec les disciplines qui correspondent à son travail spécifique.

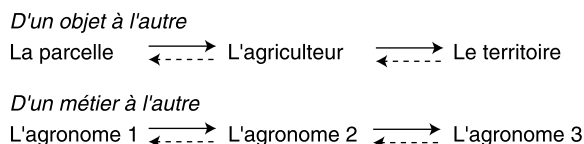


Figure 2. Les trois métiers des agronomes.

Ces trois métiers correspondent à trois épistémologies de l'agir du chercheur (Sebillotte, 2001a, 2002a). En effet, les trois objets nécessitent trois types de pratiques de recherche qui se combinent différemment selon les cas : celles de la recherche confinée dont l'objet est défini complètement par le chercheur au laboratoire, celles de la recherche de terrain dont l'objet s'impose au chercheur, il lui est donné, celles de la recherche-intervention dont l'objet est évolutif en fonction des interactions que le chercheur entretient avec lui (Hatchuel, 2000). L'unité profonde de ces trois métiers réside dans la volonté d'agir sur et dans le réel constitué par les plantes cultivées et le milieu écologique, avec des moyens divers — techniques culturales, génotypes et phénotypes... — pilotés en vue d'obtenir différentes productions — du grain de blé au paysage — d'une part, tout en respectant des contraintes venues des hommes d'autre part. Pour cela, l'agronomie mobilise de nombreux résultats et de nombreuses méthodes d'autres disciplines pour son propre développement théorique ; elle se nourrit comme d'autres de concepts « nomades » (Stengers, 1987).

► Enseigner l'agronomie

Il n'y a de science qu'« enseignable », il n'y a de science que dans le cadre d'un langage qui se construit par des phases successives de rectification et d'épuration, en forgeant concepts et théories. Les enseignants-chercheurs peuvent transmettre ces derniers de manière dogmatique ou faire percevoir la « vie » de la discipline, tâche d'autant plus ardue que les trois métiers d'agronome n'exigent pas exactement

les mêmes aptitudes ni les mêmes attitudes. Selon moi, former des agronomes — et pas seulement des chercheurs — suppose, au-delà de la possession des concepts, des théories et des méthodes, de les rendre capables de problématiser (Andler, 1987), *en agronome*, une question qui se pose, donc de penser et agir en agronome. Ils doivent, pour cela, avoir été placés dans des situations qui leur permettent de percevoir qu'avec les connaissances et les outils reçus³⁰, ils sont devenus capables de le faire.

L'épistémologie, socle de la conception de la formation

Avec de tels objectifs, je pense nécessaire d'adopter un point de vue épistémologique et de structurer l'enseignement comme le parcours des différentes étapes de la *figure 1*, en mettant les étudiants en situation concrète d'agir, de traiter un problème à chacune de ces étapes (exercices divers, stages...). Les étudiants doivent y découvrir, entre autres, que les concepts du langage théorique ont un double rôle : participer à la construction des objets et des théories scientifiques d'une part, permettre l'analyse du réel et de sa diversité d'autre part.

Pour cela, il convient de distinguer des faits, des résultats et des connaissances. Un *fait* correspond à un constat d'existence, à l'état d'un système, à quelque chose qui commence par exister indépendamment de nous. Des différences d'état structural du sol dans une parcelle, d'état sanitaire de la végétation cultivée, etc., relevées quand nous parcourons une parcelle, sont des faits. Lorsque le fait procède, sans ambiguïté, d'une action identifiable, que l'on peut en établir la genèse, il devient *résultat* — comme lorsque l'agronome comprend comment l'état structural s'est élaboré sous l'influence du milieu et des techniques culturales. Mais il y a des degrés dans les résultats³¹ et, par exemple, tracer une courbe expérimentale en constitue souvent le premier. C'est le début d'une explication possible et la source d'hypothèses. La démarche expérimentale, chère aux agronomes et aux sciences biologiques, produit des résultats. Une *connaissance scientifique* correspond, elle, à des résultats et à des faits dont l'interprétation et la compréhension supposent qu'ils soient placés dans un cadre théorique spécifié et explicite — celui de l'agronomie en l'occurrence. Cette référence à la théorie est nécessaire pour que le fait et le résultat acquièrent le statut de « scientifiques ». Il y a ainsi une étroite relation entre la construction du fait scientifique et l'élaboration de la théorie. Cette construction plus ou moins simultanée constitue le socle de l'activité scientifique (Bartholy *et al.*, 1978). Quand les agronomes sont de simples expérimentateurs, quelle que soit la sophistication statistique de leurs plans d'expérience, ils ne produisent pas de connaissance agronomique, même s'ils contribuent à résoudre des problèmes de production, d'environnement... La théorie joue ainsi un rôle central : « elle est l'instrument qui permet la découverte des faits [scientifiques] » (Bernard, 1856)³². C'est elle qui permet de « voir » (pour voir il faut entrevoir), de

30. Qui intègrent aussi, c'est évident, les règles communes à toutes les sciences.

31. Avant de devenir un résultat bien établi, souvent alors dénommé « fait scientifique ». La revue *Sciences et Avenir* consacre un numéro hors série, très pédagogique, entre autres à une discussion sur ce passage d'un fait ordinaire à un fait scientifique (10 brèves histoires de faits scientifiques, n° 142, avril-mai 2005).

32. Voir les beaux commentaires de Prochiantz, 1990.

trouver de l'ordre dans le désordre du réel (Holton, 1981, à propos d'Einstein), donc de se poser des questions dans le cadre du langage de la science, de formuler des hypothèses à tester. La difficulté pour les enseignants est d'inculquer ces différents aspects, de les transformer en réflexes chez les étudiants, sans pour autant brider leur imagination. Il faut les amener à partager l'idée, par exemple, que pourchasser les hypothèses implicites qui encombrant bien des discours à prétention scientifique n'est pas stérile mais fécond !

Les concepts évoluent. Bachelard insiste beaucoup : « La richesse d'un concept se mesure à sa puissance de déformation. [...] Pour englober des preuves expérimentales nouvelles, il faudra alors *déformer* les concepts primitifs, étudier les conditions d'application de ces concepts et surtout incorporer *les conditions d'application d'un concept dans le sens même du concept*. [...] Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation. »³³ Les exemples sont nombreux en agronomie. Pensons au concept de « fertilité » (Sebillotte, 1982 ; Sebillotte et Godard, 1993), toujours au centre de nombreux débats passionnés. Aider les étudiants à voir clair, à démêler les affirmations erronées des vraies questions est une tâche essentielle pour leur formation. Un objectif majeur de la formation est de leur montrer que la grande difficulté est de définir ce terme et de pouvoir enregistrer des différences d'indicateurs de fertilité sur le terrain, par exemple sous l'effet de différences de systèmes de culture dont certaines conséquences ne peuvent se mesurer que sur le long terme (Sebillotte, 1993b). Cette difficulté s'accroît encore lorsque les concepts sont empruntés à d'autres disciplines, lorsqu'ils sont donc définis dans d'autres cadres théoriques, dans la mesure où leur transposition sans prudence à l'agronomie est porteuse de bien des erreurs. Les enseignants ont un fort devoir de vigilance dans ce domaine. Il devient tellement habituel dans la vie courante de ne pas faire attention aux mots ! Un moyen de clarifier les choses est de faire faire aux étudiants des « dissertations » en agronomie, par exemple en les conduisant à cheminer sur des déformations de concepts, sur les méfaits de corrélations abusivement tirées, etc. (Sebillotte, 1974b). L'étude de travaux passés est aussi très formatrice : comment, dans le contexte d'une époque, les problèmes étaient-ils posés, quelles hypothèses étaient faites, quels protocoles de travail étaient inventés... ? De ce point de vue, l'analyse de thèses est extrêmement enrichissante. C'est une voie privilégiée pour aborder *la science en train de se faire*, pour sortir d'une vision dogmatique, normative des connaissances, pour appréhender le rôle de l'imagination et des filtres qui conduisent un chercheur à ne pas voir, ou à privilégier une vision particulière³⁴. Insistons enfin, avec Bachelard, sur le caractère polémique de la science qui se construit contre l'opinion commune, sur des ruptures épistémologiques³⁵. Dans un air du temps qui pousse aux consensus mous, voir au relativisme scientifique

33. Bachelard, 1960, p. 61 ; les termes sont soulignés par l'auteur.

34. Holton (1981) montre bien ce rôle de l'imagination ainsi que de ces convictions intimes du chercheur, ce qu'il nomme des « *themata* », aux pages 224-271 et 375-415.

35. C'est l'une des raisons pour lesquelles j'avais introduit dans la formation des agronomes à l'Ina P-G une initiation à l'épistémologie. Construite sur la lecture de textes majeurs, elle était suivie de travaux d'application sur la détection des obstacles épistémologiques présents dans des ouvrages de vulgarisation ou dans des textes scientifiques.

(Matalon, 1996), les agronomes doivent retrouver le sens de la polémique, sans mépris, et faire vivre celui des filiations et des ruptures pour comprendre comment les connaissances se capitalisent.

L'observation

Sous différentes formes, l'observation est commune aux trois métiers de l'agronome. Il faut donc apprendre aux étudiants à voir et à exploiter ce qu'ils voient. La pratique du terrain est à privilégier dans ce domaine. Aussi, je regrette que le temps qui lui est consacré dans les instituts de formation de nombreux pays diminue sous la pression de différentes contraintes (emploi du temps, spécialisation de plus en plus précoce, ambiance dominée par la modélisation quantitative, études de cas sur documents...).

Les étudiants doivent « parcourir » des parcelles, les voir évoluer au fil du temps, comparer des cultures de la même espèce végétale en différents lieux. Comment comprendre autrement les rôles respectifs du temps et du climat sur une culture, par exemple ? C'est sur le terrain que l'on mesure la difficulté du test des théories et des modèles en agronomie, parce que l'on y perçoit physiquement, et c'est irremplaçable, la complexité des objets étudiés ! Bien conduite, l'étude des hétérogénéités des surfaces dans une parcelle permet d'illustrer auprès des étudiants les étapes du raisonnement, pour aboutir à la formulation d'hypothèses ou à un diagnostic... C'est aussi le moyen de les préparer à l'action, en leur faisant toucher du doigt ce qui relève des certitudes et ce qui procède de l'hypothèse. Il leur est ainsi loisible de comprendre ce qu'est un raisonnement plausible (Polya, 1965), et que toute décision comporte un risque — qu'il s'agisse de décider d'une intervention culturale ou de bâtir un protocole expérimental³⁶. Les enseignants, qui forment surtout de futurs non-chercheurs, doivent en effet apprendre à ces derniers comment utiliser les expériences, par exemple celles des agriculteurs qui adoptent des innovations. Cela exige des dispositifs spécifiques d'enquête-action (Sebillotte, 1975).

Ainsi, l'observation de terrain s'associe automatiquement à un travail mental de confrontation de ce qui est observé à un savoir préexistant (la théorie), et de préparation d'une action à venir. C'est donc l'un des moyens pour l'agronome de forger les référentiels qui forment et structurent son expérience et de tester par l'action le bien-fondé de ses explications. Ce dernier point est capital pour la formation : ce que l'on dit n'est pas gratuit, l'agronome engage son savoir dans l'action. L'observation de terrain a ainsi une valeur formatrice plus générale : elle apprend à détecter ce qui ne va pas dans une culture, les symptômes d'une anomalie dans un tableau de chiffres, sur un diagramme... L'agronome se forme ainsi à pourchasser les hypothèses *ad hoc*, si couramment employées pour étayer des affirmations lorsque le réel semble ne pas se conformer à l'explication !

36. La puissance d'un dispositif pour ne pas conforter les idées originelles, voilà une préoccupation épistémologique et un champ de recherche à développer pour aborder la complexité.

Une discipline liée à l'action

Dans de nombreux milieux scientifiques, parler d'une discipline liée à l'action jette le discrédit sur le discours qui est interprété comme l'abandon de toute ambition scientifique. Comment transmettre aux étudiants que ce point de vue est erroné et que le chercheur passe son temps à agir : qu'il opte pour une variable, une hypothèse plutôt que pour d'autres, qu'il choisit tel protocole expérimental et non tel autre... ? C'est pourquoi je demande une *épistémologie de l'agir du chercheur*, plus utile encore pour l'agronome puisque ses objets sont en perpétuelle évolution, car fruits des actions des hommes qui créent à chaque instant une réalité nouvelle ! De plus, ces objets, éminemment complexes, sont difficiles à cerner, puisque soumis aux aléas du climat et à toutes sortes d'incertitudes. Celles-ci ont pour origine notre ignorance (l'insuffisance de nos connaissances)³⁷, l'imprécision de nos modèles prédictifs (voir la prédiction du changement climatique), et plus encore cette imprévisibilité irréductible de bien des phénomènes, ne serait-ce que la nature des contraintes que les sociétés imposeront demain aux producteurs ! Car telle sera bien la question finale : *accepterons-nous, demain, ce monde que nous faisons aujourd'hui ?* Pensons-nous que la science saura répondre de manière « acceptable » et en temps utile à tous les problèmes ?

Les enseignants ne peuvent éliminer ces interrogations puisque les étudiants les leur posent. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, les agronomes pensaient que la voie de l'artificialisation croissante de l'agriculture était la seule possible. Depuis, ils ont pu constater que beaucoup de problèmes qui n'existaient pas sont devenus d'actualité, telle, pour ne prendre qu'un exemple, la résistance croissante des ennemis des cultures aux molécules pesticides (Chauvel *et al.*, 2001, Neve *et al.*, 2003). La conception des systèmes de culture du futur impose aux chercheurs et aux enseignants ce détour par des interrogations sur le monde et le développement que nous voudrions collectivement (voir l'introduction générale de cet ouvrage).

Mon insistance sur l'action, partagée par les auteurs de l'ouvrage, a pour conséquences de placer le diagnostic et le pronostic au cœur des méthodes à acquérir par le futur agronome, ainsi que de délimiter plus précisément les systèmes étudiés. La question de l'extrapolabilité des connaissances est centrale et doit se coupler à une analyse des risques encourus. Plus généralement, la réflexion sur les risques d'inefficacité ou d'effets négatifs des technologies est primordiale pour l'avenir. Les agriculteurs des régions sèches le savent : sans irrigation, la variabilité climatique les condamne. Pourtant, à terme, cette solution n'est pas partout viable. Si, comme les modèles de changement climatique le laissent prévoir, le réchauffement se double d'une augmentation de la variabilité climatique, en particulier des pluies, la nécessité de sérieux progrès dans la conception des systèmes de culture s'impose, progrès qui concerneront aussi d'autres disciplines : la génétique et l'amélioration des plantes avec ses outils modernes, la science du sol, l'économie... Ainsi, l'intérêt des techniques doit être étudié à différents pas de temps, à diverses échelles spatiales.

37. Qu'il s'agisse de la vie des êtres vivants du sol, des effets réels des organismes génétiquement modifiés sur l'environnement, de la possibilité d'évolutions réversibles lorsqu'un écosystème est dégradé, des comportements des hommes dans leurs relations à l'avenir et dans leur confrontation au caractère fini de notre planète...

Les agronomes ont pour mission, du fait de leur place privilégiée pour cerner, en particulier, les enjeux agronomiques et environnementaux, de produire ces analyses critiques et d'éclairer les décideurs, notamment face aux effets de mode.

Les approches transdisciplinaires ; l'ouverture aux autres disciplines et aux problèmes des sociétés

Les approches transdisciplinaires supposent une grande ouverture aux autres disciplines et aux problèmes des sociétés. C'est une gageure dans la courte durée de la formation initiale, et pourtant n'est-ce pas l'enjeu de demain ? Si les spécialistes que nous formons sont incapables de comprendre les présupposés épistémologiques des autres chercheurs, donc de savoir comment ils pensent (Changeux et Ricœur, 1998 ; Jacob, 1997), comment espérer que l'on traite correctement du développement durable, pour ne prendre que cet exemple d'un système d'actions à penser comme tel !

Le débat est vif entre les tenants d'une forte spécialisation initiale du chercheur (métier de l'agronome n° 1) avant qu'il n'élargisse progressivement son champ (métier de l'agronome n° 3). J'ai toujours défendu l'idée que ce cheminement était possible, mais qu'il fallait aussi former des chercheurs capables d'aborder les problèmes transdisciplinaires dès le début de leur carrière. Aujourd'hui, je crois que cette dernière voie est plus que jamais nécessaire, et que la trop lente avancée des travaux sur l'environnement, sur le développement durable, est en partie liée à l'insuffisance de recherches transdisciplinaires : les démarches systémiques ne viennent pas spontanément de l'approfondissement disciplinaire, mais de la culture, du regard que le chercheur pose sur les choses (*figure 1*). Ainsi, le développement durable ne peut être la recherche d'une solution durable à de nouveaux problèmes figés (Sebillotte, 2003). C'est d'abord une posture épistémologique par laquelle nous admettons que les problèmes seront toujours nouveaux du fait d'une *incertitude radicale sur les interactions* qui seront à l'origine des problèmes à résoudre.

Les enseignants qui forment les agronomes de demain, qui travailleront souvent pour le développement des territoires, ont pour mission de permettre cette ouverture. Elle passe par l'acquisition d'une culture minimale en économie, en géographie, en histoire, en sciences de la conception, en sociologie... L'agronome ne peut rester dans le seul giron de ses disciplines cousines ! Mais pour être à l'écoute, il faut soi-même être solide, dominer l'histoire et l'épistémologie de sa propre discipline : donc vivre intensément les relations entre les trois métiers de l'agronome. La transdisciplinarité n'est surtout pas le renoncement à sa discipline d'appartenance ! Allons plus loin, c'est la construction de l'avenir qui doit mobiliser tous les agronomes. C'est elle qui fera vivre ensemble ses trois métiers, indissociables pour œuvrer à un monde meilleur (Sebillotte, 2005).

» Et demain...

L'ouvrage d'agronomie que nous avons sous les yeux présente plusieurs traits remarquables. Très bien documenté, empruntant ses références à l'ensemble de la

littérature mondiale, il fait le point des progrès conséquents des dernières décennies. Il servira de référence et sera très utile, entre autres aux étudiants.

J'ai construit mon propos en essayant de mettre en perspective ce qui se « cache » derrière les chapitres de l'ouvrage, pour ainsi multiplier le caractère opératoire des connaissances exposées en les replaçant dans une histoire et dans *une science en train de se faire*. Les défis de demain, en partie présentés au début de l'ouvrage, sont nombreux. Pour les relever, les agronomes devront continuer à s'ouvrir aux autres disciplines et accepter de travailler avec elles sur des objets transitoires. Mais ils devront consacrer aussi, me semble-t-il, plus d'efforts à la construction de leur discipline, à la réflexion conceptuelle et méthodologique. Certes, les problèmes de la société nous appellent, mais c'est l'existence d'une discipline consciente de son histoire, de sa genèse, de ses forces et de ses faiblesses théoriques comme de ses différents métiers qui permettra de répondre aux problèmes de nos sociétés de demain, qui fera des agronomes de véritables partenaires des autres disciplines et des acteurs à part entière du développement des sociétés. Nous avons l'impérieux devoir de bâtir l'épistémologie de notre agir collectif d'agronomes, de réfléchir à nos pratiques d'enseignants et de chercheurs. Le premier défi n'est-il pas de faire vivre la communauté des agronomes, chercheurs, enseignants et praticiens, le second étant de montrer aux étudiants qui se spécialisent en agronomie les aptitudes et les attitudes qui les rendront efficaces dans le futur à construire ? Leur rôle est ainsi essentiel, tant par les questions qu'ils posent aux enseignants que comme bâtisseurs d'avenir qui fixeront, pour partie, les exigences éthiques.

Il leur faudra encore plus d'imagination car cet avenir sera beaucoup plus complexe, plus incertain que celui des Trente Glorieuses. C'est le troisième défi : contribuer au développement durable, donc apprendre à faire du durable avec du non-durable, rentrer dans un processus de « convivialité » avec la nature, ne plus rechercher de solution définitive, de modèle à imiter... Les agronomes de demain devront ainsi, d'une part, retrouver ce qui était fécond dans l'esprit de ceux qui, autrefois, essayaient de reproduire les pratiques des agriculteurs qui réussissaient et, d'autre part, faire fructifier leurs nouveaux savoirs professionnels et les nouvelles connaissances agronomiques. Les agronomes joueront un rôle majeur dans le monde à venir s'ils restent aussi des hommes et des femmes de terrain, tournés vers l'action et n'oublient pas le chemin de l'étude des pratiques de tous ceux qui s'attellent à la résolution des problèmes nouveaux.

Forts de leur expérience et de leur histoire qui leur aura appris que « maximiser » l'emploi des facteurs de production (les engrais, l'eau...) n'est pas forcément la bonne voie, qu'il a fallu inventer le concept d'« itinéraire technique », les agronomes proposeront celui d'« itinéraire de mise en valeur durable d'un territoire », concept transdisciplinaire. Centrée sur l'action, l'agronomie les place en effet dans une position de médiation entre, d'une part, tous ceux qui utilisent l'espace pour produire, se créer, vivre... et qui, *ipso facto*, le transforment en retour et, d'autre part, les chercheurs des disciplines qu'il faut convoquer pour apporter des solutions aux problèmes nés des projets de ces acteurs, solutions temporaires mais acceptables au regard de la science et des attentes citoyennes. C'est avec eux, acteurs et chercheurs, que les défis seront relevés ! Cependant, si les ressources de la planète sont finies, elles sont surtout réparties de manière très hétérogène : le développement

ne sera durable que dans la mesure où, comme le dit Sen (2000), les hommes sauront intégrer le local dans le global et valoriser les complémentarités des territoires pour plus de liberté et plus de justice sociale.

Michel Sebillotte,
professeur émérite à l'Ina P-G,
membre de l'Académie d'agriculture de France

Introduction générale

Thierry DORÉ

Le but de cet ouvrage est de présenter la discipline scientifique qu'est l'agronomie. Il s'agit de montrer à la fois les connaissances produites et la manière dont ces connaissances peuvent être utilisées dans l'action. Qu'est-ce que l'agronomie aujourd'hui ?

► Définitions et contours de l'agronomie

L'agronomie¹ a pour objet d'étude premier le champ cultivé, considéré à la fois comme objet physique et comme objet d'application d'un raisonnement : celui des techniques par un agriculteur. La dimension physique est celle sur laquelle est centrée la définition de l'agronomie par Stéphane Hénin, qui la qualifiait d'« *écologie du champ cultivé* ». Cette définition insiste sur le caractère systémique de cet objet, auquel renvoie notamment l'emploi du terme « écologie ». La définition de Michel Sebillotte, « [l'] *étude, menée simultanément dans le temps et dans l'espace, des relations au sein de l'ensemble constitué par le peuplement végétal et le milieu physique, chimique et biologique et sur lequel l'homme agit pour en obtenir une production* » (Sebillotte, 1977), décale quant à elle l'attention vers l'action de l'homme.

Considérées ensemble, ces deux définitions indiquent les deux centres de gravité autour desquels tourne la discipline : d'une part la connaissance du fonctionnement d'un système complexe — le champ cultivé ou « agrosystème » —, et d'autre part le raisonnement de l'action dans le domaine de la production végétale. Ces définitions distinguent également l'agronomie des autres disciplines « contiguës » comme la physiologie végétale, la science du sol ou l'écologie qui, pour avoir des intersections avec l'agronomie, n'en ont pas pour autant le même objet d'étude ni le même

1. On traitera ici de l'agronomie *sensu stricto* et non de l'agronomie *sensu lato*, dont l'histoire a été décrite par Boulaine (1992) et qui rassemble l'ensemble des connaissances scientifiques, technologiques, économiques et sociales ayant rapport avec l'agriculture.

objectif. Inversement, et de manière plus implicite, elles indiquent que l'agronomie est une discipline qui intègre des connaissances issues d'autres disciplines, voire d'autres champs disciplinaires, nécessaires pour comprendre le fonctionnement de ce système complexe et/ou fonder un raisonnement agronomique. Enfin, ainsi que l'a analysé de manière approfondie Sebillotte (1974a), ces définitions permettent de nettement distinguer l'agronomie, branche de la connaissance sur laquelle peut s'appuyer le raisonnement de la production végétale et de la gestion des milieux, de l'agriculture elle-même.

Ces caractéristiques de la discipline restent d'actualité, et l'agronomie d'aujourd'hui est en continuité directe avec ces définitions issues des années 1960-1970, période au cours de laquelle la discipline a pris un essor particulier. Cette agronomie contemporaine, dont nous tracerons les évolutions récentes, s'appuie sur une longue histoire de la discipline, récemment remise en lumière (Robin *et al.*, à paraître). Elle est apparue après que l'agriculture a été raisonnée d'abord de manière empirique, puis en s'appuyant sur des connaissances de type surtout analytique (Jouve, à paraître) et sectoriel : éléments de chimie agricole, sélection variétale, machinisme... L'apparition de l'agronomie contemporaine à partir de ce socle est vraisemblablement le produit d'une part d'une augmentation générale des connaissances scientifiques et techniques, et d'autre part d'une complexification des conditions d'exercice de l'agriculture. Cette double évolution rendait nécessaire l'identification d'un « maillon de connaissances » supplémentaire : celui qui permet d'intégrer des connaissances analytiques toujours plus nombreuses, toujours plus précises, dans un corpus systémique orienté vers l'action, une action plus complexe à mener. Ces conditions de la transformation de la discipline n'ont pas disparu, bien au contraire ; et l'agronomie est plus que jamais nécessaire pour faire se rejoindre l'univers des connaissances produites par des disciplines analytiques, qui se sont elles-mêmes renouvelées et diversifiées — les interlocuteurs des agronomes sont aussi maintenant les biologistes moléculaires, les physiciens de l'atmosphère, les microbiologistes... —, et l'univers des connaissances produites par les sciences sociales en relation avec les actions de l'homme, celles de l'agriculteur en particulier, mais aussi maintenant celles du gestionnaire de l'espace rural, du responsable de coopérative, du sélectionneur...

► Enjeux et évolutions marquantes pour l'agriculture et les espaces agricoles et ruraux

La place que nous venons de définir pour l'agronomie est particulièrement importante eu égard aux enjeux actuels concernant les espaces agricoles et ruraux de la planète. En effet, les questions d'alimentation, d'environnement, de préservation des ressources naturelles, d'aménagement, sont au cœur des préoccupations des populations et des sociétés. Et ces préoccupations apparaissent légitimes, comme le montrent de nombreuses études récentes auxquelles nous renvoyons pour des analyses plus approfondies.

La question de la sécurité alimentaire régionale et mondiale reste une question actuelle et dramatique, avec plus de 800 millions de personnes en situation de sous-

nutrition dans le monde au début du III^e millénaire, et des situations locales où, même en dehors des périodes de crise, la proportion de personnes sous-nourries dépasse 50 % (FAO, 2003a). En parallèle, l'augmentation de la population mondiale sur un rythme annuel moyen de 80 millions de personnes par an jusqu'en 2025 (OMS, 2001) implique une augmentation importante des ressources alimentaires de base, ce qui explique que, malgré les efforts d'accroissement de la production alimentaire, le recul de la sous-alimentation ne concerne que 2,5 millions de personnes par an, bien loin des objectifs fixés lors du sommet mondial de l'alimentation en 1996. Différentes projections à cinquante ans de l'évolution des besoins font ainsi apparaître la nécessité absolue d'améliorer fortement nos capacités de production locales et globales (Rosegrant et Cline, 2003). Même si la production de denrées alimentaires a plus que doublé en quarante ans, et si certains auteurs sont optimistes quant à la capacité de la planète à pouvoir nourrir sans difficulté une population bien plus importante que la population actuelle (Heilig, 1999), il est clair qu'un tel rythme de croissance n'est pas aisément reproductible si l'on ne considère pas que les capacités physiques à produire, et que l'on tient compte également des conditions économiques de cette croissance et de ses conséquences environnementales (Bindraban *et al.*, 1999 ; Cassman, 2001).

L'agriculture occupe une place majeure dans l'utilisation des terres de nombreuses régions du globe (près de la moitié des terres en Europe). L'activité agricole joue de ce fait un rôle essentiel dans l'évolution des paysages et des dynamiques économiques et sociales rurales, composantes du cadre de vie à laquelle une part croissante de la population est sensible. Mais son importance quantitative lui confère également une responsabilité forte vis-à-vis des questions environnementales. Les dégradations de l'environnement et des ressources naturelles se multiplient en effet (PNUE, 2002, 2004 ; Ifen, 2002 ; *European Environment Agency*, 2005 ; *Millenium Ecosystem Assessment*, 2005) ; et parmi les atteintes jugées graves, on en trouve plusieurs pour lesquelles le rôle de l'agriculture est avéré, même s'il est souvent difficile à distinguer de celui d'autres activités humaines. On citera en particulier les questions de qualité des sols (qui se répercutent elles-mêmes sur la capacité productive de l'agriculture²), des eaux et de l'air d'une part, et de biodiversité d'autre part, sur lesquelles une littérature abondante existe (voir par exemple le recensement de Stoate *et al.*, 2001). La prise en compte de ces effets négatifs (et de certains effets positifs) nécessite une transformation de l'agriculture, dont il faudra toutefois veiller à ce qu'elle ne soit pas trop génératrice de diminutions de la production, ce qui serait antagonique avec la préoccupation de sécurité alimentaire (Tilman *et al.*, 2002).

Les questions de sécurité sanitaire des aliments constituent un défi parallèle à celui de la sécurité des approvisionnements, dont elles ont été souvent une composante trop implicite. Les préoccupations des consommateurs en ce domaine sont croissantes (Bonny, 2000) ; elles engendrent l'accroissement de réglementations visant à minimiser les risques sanitaires (voir par exemple le rôle du *Codex Alimentarius*, FAO/OMS, 1999). Qu'on la considère sous cet angle réglementaire ou simplement du point de vue de la santé humaine, la qualité sanitaire des aliments est devenue

2. Lal, 1998 ; Penning de Vries, 2001 ; Wiebe, 2003.

un impératif qui renouvelle en profondeur les questions de qualité des produits, quels que soient les systèmes ou les régions de production considérés.

Cette liste pourrait aisément être allongée en développant les questions d'usage non alimentaire des ressources végétales (Desmarescaux, 1998 ; Palz, 1998), de qualité des produits végétaux selon ses multiples dimensions (CNA, 2002), de contribution de l'activité agricole à l'emploi (Sagory *et al.*, 2000), de multifonctionnalité de l'agriculture (OCDE, 2001), de relations entre l'activité agricole et la préservation ou l'aménagement des espaces ruraux (Laurent et Thinon, 2005) et urbains (Nasr et Padilla, 2004)... L'agriculture, comme cela était déjà pointé par Sebillotte (1990c) il y a quinze ans, reste ainsi au cœur d'enjeux essentiels³ qui balisent ce qu'il est convenu d'appeler « l'agriculture durable » (ou, pour mieux dire, une « agriculture contribuant au développement durable »), et donnent lieu à la définition de « bonnes pratiques agricoles » (voir par exemple FAO, 2003b) qui, définies à un niveau très général, traduisent surtout l'universalité de ces enjeux.

Par ailleurs, ces derniers se conjuguent avec des évolutions principalement externes à l'agriculture, mais qui auront des implications majeures sur le fonctionnement des sols, des couverts végétaux, et sur la manière dont l'homme devra agir pour atteindre ses objectifs : les changements climatiques, la mondialisation des échanges, les progrès des sciences et des techniques, la perte de nature sont, avec l'accroissement de la population déjà évoqué ci-dessus (voir aussi Giampetro *et al.*, 1999), les principales de ces évolutions. Ici encore, on ne peut que citer quelques pistes d'approfondissement, mais dont la simple mention illustre déjà l'acuité des évolutions en cours :

- les changements climatiques, auxquels l'agriculture contribue parmi d'autres activités humaines (Duplessy, 2001), doivent ainsi être abordés — davantage qu'on ne le fait ordinairement — d'un double point de vue : d'un côté ils vont modifier le fonctionnement des champs cultivés et altérer (en positif ou en négatif) leur productivité (Rosenzweig et Parry, 1994 ; Reddy et Hodges, 2000), d'un autre côté, des modifications des pratiques agricoles sont susceptibles de contribuer à limiter les changements climatiques, en particulier à travers la fonction de stockage de carbone dans les sols cultivés et de limitation consécutive de l'effet de serre (Arrouays *et al.*, 2002 ; Lal, 2002) ;

- l'internationalisation accrue des échanges de produits entraîne une évolution des systèmes de production qui tendent, au moins dans certaines régions, à se positionner sur un marché élargi, voire mondial. Ainsi, par exemple, la production laitière australienne évolue pour s'adapter aux contraintes du marché asiatique ; ainsi, également, des pays émergents à faibles coûts de production se positionnent par un effet d'aubaine sur des systèmes de productions nécessitant une forte quantité de travail, comme l'horticulture (Harrison, 2003). Cette internationalisation a également tendance à accroître les concentrations des entreprises de l'agrofourmiture ou des industries agroalimentaires, avec des répercussions inévitables sur les systèmes de production (Fresco, 2001) ;

- parallèlement, les États ou les organisations supranationales tentent de garder une capacité d'orientation des systèmes de production agricole, de manière à éviter que ne se creuse le fossé entre les attentes des citoyens et des consommateurs d'une

3. Paillotin, 1998 ; Malkina-Pykh et Pykh, 2003.

part, et la réalité de l'agriculture d'autre part. Qu'elles soient incitatives ou restrictives, ces politiques ont des impacts sur les systèmes de production (Dron, 2003) ;

- les connaissances scientifiques ont elles-mêmes une dynamique qui peut avoir des conséquences essentielles sur l'évolution de l'agriculture : la découverte par exemple de nouvelles molécules naturelles à effet herbicide (Duke *et al.*, 2002) pourrait modifier les pratiques de désherbage, sous réserve que leur emploi soit correctement intégré dans les systèmes de culture ; ou encore les capacités technologiques d'insertion de gènes d'espèces très variées dans les génomes des espèces cultivées ont déjà fait couler beaucoup d'encre quant à leurs conséquences entre autres agronomiques, tant leur adoption éventuelle implique des changements de systèmes de culture (Olofsdotter *et al.*, 2000 ; Gouyon *et al.*, 2001 ; *Phil. Trans., Biol. Sci.*, 2003) ;

- la biodiversité n'évolue pas que sous l'effet de l'agriculture : les changements d'usage des terres, les changements climatiques, la déposition d'azote atmosphérique et les pluies acides, l'augmentation du CO₂ atmosphérique, vont engendrer à l'horizon du siècle des échanges biotiques dont les espèces invasives sont la marque la plus visible (Sala *et al.*, 2000). Ces phénomènes vont entraîner des disparitions d'espèces dont on peut prévoir qu'elles auront pour l'agriculture des conséquences directes — déséquilibres entre populations de bioagresseurs et populations de prédateurs ou de parasitoïdes — et indirectes — pertes globales de ressources génétiques. D'une manière plus générale, la dégradation globale des écosystèmes rend plus difficile la réalisation des missions assignées à l'agriculture (*Millenium Ecosystem Assessment*, 2005).

Face à ces évolutions, une des tâches de l'agronomie actuelle est précisément d'identifier les manières de produire qui permettront à l'agriculture de mieux faire face aux attentes de la société (Bullock, 1997 ; Viaux, 1999 ; Boiffin *et al.*, 2001 ; Malézieux *et al.*, 2001 ; Reganold *et al.*, 2001 ; Mäder *et al.*, 2002).

Pour faire face à des enjeux si considérables et à des évolutions si profondes en se fondant sur les progrès de la connaissance, la mise en commun des connaissances et des méthodes issues de différentes approches et disciplines sera nécessaire. En interaction avec d'autres disciplines, l'agronomie a une place à tenir : elle est l'une de celles qui ont vocation à produire des connaissances sur des objets à niveau d'organisation élevé — la plante, la population végétale, le champ, l'espace rural... Elle est aussi l'une des disciplines qui posent explicitement la question de l'utilisation des connaissances pour l'action et elle peut, comme l'écologie (Hubert, 2004), contribuer à une synergie entre sciences de la nature et sciences sociales, une des clés du développement durable (Meynard, 2003). Et c'est d'ailleurs un enjeu majeur pour les agronomes que de continuer à former de nouvelles générations de scientifiques capables de concevoir des systèmes de production durables, ce qui nécessite de prendre en charge des « fonctions intégrées » auxquelles la plupart des scientifiques du domaine végétal ne s'attaquent pas, car ce domaine est devenu « trop atomisé, trop spécialisé » (Fresco, 2001).

Compte tenu de la place de ce maillon de la connaissance auquel correspond l'agronomie, celle-ci est par construction une discipline d'intégration. Beaucoup de disciplines le sont, plus ou moins ; elles le sont d'autant plus que leur objet d'étude est complexe — ce qui est le cas de l'agronomie. Elle n'est cependant pas *seulement* une

discipline d'assemblage, une sorte d'ingénierie de la connaissance, et ceci pour trois raisons. La première est que l'intégration de connaissances analytiques à des niveaux « englobants » (de temps, d'espace, d'organisation) ne procède pas par simple assemblage comme dans un jeu de construction : les propriétés émergentes des systèmes imposent une production de connaissances spécifiques à ces niveaux. La deuxième raison est que pour organiser cette connaissance, l'agronomie contemporaine a développé ses propres concepts, permettant une structuration de la discipline (voir en particulier en France le rôle de Michel Sebillotte [1974a, 1978...] et de ceux qui l'ont accompagné). Enfin, l'orientation de l'agronomie vers l'action a conduit à la production de connaissances originales — destinées à faciliter la mise en œuvre de cette action —, à aider aux décisions (voir par exemple Ten Berge et Stein, 1997) de différents types d'acteurs (pas seulement les agriculteurs) et aux coordinations entre acteurs qu'exigent aujourd'hui la plupart des questions de gestion de l'espace agricole et rural soulevées ci-dessus.

►► **Rendre compte des évolutions récentes de l'agronomie**

L'agronomie est donc une discipline qui a évolué pour répondre à des besoins spécifiques, qui correspond à des enjeux actuels, et qui a produit un corpus de connaissances et de concepts originaux adaptés à son objectif. Mais une discipline ne continue à exister que si elle se renouvelle... et c'est bien sûr sur sa production de connaissances que se fondent sa légitimité et sa pertinence actuelles. De fait, l'agronomie a évolué au cours des trente dernières années. C'est à montrer cette évolution, à faire un point sur ce qu'est la discipline aujourd'hui que s'attache précisément cet ouvrage. Son organisation et son contenu traduisent cette ambition. Les auteurs chercheront donc davantage à faire apparaître les mouvements, plutôt qu'à transcrire de manière encyclopédique l'énorme somme de connaissances capitalisée dans le domaine de l'agronomie ; ils le feront cependant en balayant l'ensemble du champ traité par la discipline. Ce choix de privilégier l'évolution récente au détriment de l'exhaustivité a constitué une première clé de tri de l'information. La seconde a consisté à tenter de rendre compte du caractère appliqué de la discipline, et donc à montrer autant que possible les usages qui peuvent être faits des connaissances et des méthodes produites en agronomie. Ce souci de montrer les usages de la discipline ne doit toutefois pas prêter à confusion : il ne s'agit pas ici de rassembler toutes les connaissances utiles à l'agronome de terrain, ce qui serait l'objet d'un autre livre, ou plutôt de plusieurs : de tels ouvrages, organisés par culture (les céréales, le palmier à huile...), ou par technique (le travail du sol, la fertilisation...) sont déjà largement diffusés.

La première partie traite des concepts d'« itinéraire technique » et de « système de culture ». Partant d'une explication de leur place dans la discipline, elle montre comment ces concepts ont été valorisés dans les productions scientifiques récentes et dans leur utilisation pour l'action. Les parties suivantes traitent de l'évolution des connaissances agronomiques relatives à deux composantes de l'agrosystème (ce dernier terme désigne, selon le contexte, un champ cultivé ou un ensemble de champs) : la deuxième partie aborde le fonctionnement du peuplement végétal

cultivé, et la troisième l'évolution des composantes physiques, chimiques et biologiques du milieu (le sol, l'atmosphère, les populations animales et végétales) sous l'effet des pratiques agricoles, selon différents pas de temps. La quatrième partie enfin est consacrée aux connaissances agronomiques liées à des niveaux (d'espace, d'organisation) englobant la parcelle, auxquels l'agronomie s'est largement ouverte au cours des vingt dernières années. Signalons enfin que cet ouvrage a d'abord une ambition didactique, de manière à instruire les néophytes sur l'ensemble de la discipline, et à leur donner le goût — et, à travers la bibliographie, l'un des moyens — d'approfondir. C'est, selon l'expression consacrée, un ouvrage « de base » qui ne prétend donc pas présenter de manière détaillée et en spécialiste les questions, les méthodes et les résultats de recherche actuels en agronomie, ce qui serait incompatible avec la volonté de donner à voir l'ensemble de la discipline dans un volume resserré et sous une forme accessible au plus grand nombre ; il n'a pas non plus pour ambition de traiter des questions sociétales actuellement les plus vives dans lesquelles l'agronomie est impliquée (durabilité économique des systèmes de production dans les économies du Sud, maintien de la biodiversité, limitation des externalités négatives de l'agriculture, etc.), mais de donner des éléments de connaissances et de méthodes de base dans le domaine de l'agronomie pour pouvoir les aborder. Les références bibliographiques rassemblées sont néanmoins conçues de manière à donner, sur chacun des thèmes abordés, des pistes d'approfondissement. Cette organisation est complétée par un index.

Partie 1

Itinéraire technique, système de culture : de la compréhension du fonctionnement du champ cultivé à l'évolution des pratiques agricoles

Thierry DORÉ, coordinateur

Introduction

Thierry DORÉ, Jean-Marc MEYNARD

► Trois approches agronomiques pour appuyer l'évolution des pratiques agricoles

L'identification des finalités de l'agronomie, précisées dans l'introduction, ne donne pas, ou peu, d'indication sur les moyens à mobiliser pour parvenir à ces fins. Existe-t-il *une* ou *des* manières de faire de l'agronomie ? Existe-t-il des écoles de pensée en agronomie, comme il en existe dans d'autres disciplines ? Une revue de la littérature internationale montre que même si certaines références tendent à opposer de manière un peu outrancière différents types de recherche agronomique au sens large (McRae *et al.*, 1989, sur la base d'une dénonciation d'un réductionnisme néfaste dans les sciences agronomiques ; ou encore Lockeretz et Anderson, 1993), il n'y a pas vraiment de controverse vive entre doctrines sur la manière de faire progresser la connaissance sur le champ cultivé dans un but d'amélioration de sa gestion, comme il peut en exister dans d'autres domaines. Il existe cependant différentes manières de s'y prendre en agronomie. De manière forcément caricaturale, on peut distinguer trois tendances, largement complémentaires et qui se développent de manière concomitante, autour desquelles s'articulent les différents travaux.

La première tendance consiste, à partir d'un des éléments constitutifs du champ cultivé, à tenter d'acquérir une vision suffisamment intégrée de ce dernier pour permettre une utilisation des connaissances dans l'action. On a vu ainsi s'élaborer des corpus de connaissances autour, en particulier, d'une vision intégrée du fonctionnement du peuplement végétal (Azam-Ali et Squire, 2002). Autour de cet objet se sont entre autres construits au cours des vingt-cinq dernières années des travaux de modélisation, cherchant à rendre compte des grandes fonctions biologiques des peuplements végétaux (voir par exemple Reddy *et al.*, 1997, sur le coton). Les travaux portent à la fois sur l'intégration de fonctions à différentes échelles, et sur l'articulation de la représentation de plusieurs fonctions (la photosynthèse, la répartition des assimilats...) de manière cohérente dans un même objet. Augmentées de connaissances sur le sol, ces représentations synthétiques peuvent être utilisées pour rendre compte des conséquences des modes de gestion du champ cultivé. Leur

utilisation dans la pratique hors du monde de la recherche est plus ou moins commode selon les types de paramètres et de variables constitutifs du modèle (Matthews et Stephens, 2002). Souvent, les paramètres des modèles sont nombreux et difficiles d'accès, ce qui complique l'utilisation de ces modèles pour l'action, et par ailleurs les variables ne permettent pas de rendre compte des effets de toutes les pratiques sur le fonctionnement du peuplement. De telles « familles » de modèles, couplées à des bases de données (qui tendent à s'organiser à l'échelle internationale, voir Bostick *et al.*, 2004), ont été largement utilisées pour effectuer des simulations de l'impact de changements de pratiques agricoles, à différentes échelles spatiales (Tsuiji *et al.*, 1998).

Il existe moins d'exemples, en revanche, de travaux qui consistent à prendre pour point de départ une vision intégrée du sol, autre élément constitutif du champ cultivé, pour faire de l'agronomie. En effet, les travaux sur le sol sont fréquemment assez spécialisés (sur les matières organiques du sol, sur la dynamique des éléments minéraux dans le sol, sur son évolution physique... ; voir par exemple Benbi et Nieder, 2003), et les exemples d'intégration, de prise en compte des interactions entre mécanismes sont plus rares ou tout au moins plus récents (voir les travaux autour de deux modèles — Pastis [Garnier *et al.*, 2003] et Daisy [Styczen et Storm, 1993 ; Olesen *et al.*, 2002]). Cela n'exclut pas, dans ce domaine, une volonté d'utiliser les connaissances pour l'action : on pense par exemple aux travaux sur la mobilité des ions dans les sols, débouchant, dans le cadre de collaborations entre spécialistes des sciences du sol et agronomes, sur des règles de fertilisation des cultures. Une situation analogue peut être décrite pour des travaux concernant certaines composantes biotiques du champ cultivé : partant d'une connaissance de la biologie des espèces ou des populations de plantes adventices, ou de champignons, ou d'insectes, etc., on identifie plus ou moins empiriquement des règles concernant la protection des cultures. Ces travaux ne s'attachent qu'à une partie du système et débouchent sur une partie de la conduite des cultures ; un effort important d'articulation de ces connaissances entre elles est nécessaire pour qu'elles puissent former un tout cohérent.

Les techniques constituent un second mode d'approche. Celui-ci fonctionne, pour ainsi dire, en sens inverse du premier : le point de départ est la technique culturale (le labour, le semis, la fertilisation...), qui fait l'objet de travaux pour en améliorer l'efficacité au regard d'un ou plusieurs critères. Les travaux consistent en la comparaison de différentes modalités d'une même technique, dans une seule ou un petit nombre d'expérimentations, afin d'identifier la modalité technique optimale. Par exemple Davidonis *et al.* (2004) déterminent, parmi trois dates de semis du coton, celle qui permet d'obtenir la fibre de la meilleure qualité. Il est clair que les résultats obtenus, intéressants pour la région dans laquelle l'expérimentation a eu lieu, sont difficilement extrapolables à un ensemble plus large de situations. Extrapoler sans précaution ces résultats reviendrait à ignorer de fait la variabilité de résultats d'une technique appliquée sur le champ cultivé. Ce type de travail est considérablement enrichi lorsque l'on cherche à comprendre, analyser et quantifier la gamme des résultats obtenus en faisant varier les conditions d'application d'une technique. C'est par exemple ce que réalisent Rajin Anwar *et al.* (2003a et b) lorsqu'ils étudient expérimentalement les effets de la date de semis et de l'irrigation sur plusieurs

variétés de pois chiches. L'interprétation de leurs résultats consiste d'abord à comprendre, à partir de mesures appropriées, les relations entre les techniques appliquées, l'utilisation de l'eau par la plante, et le fonctionnement du peuplement de pois chiches. Ces résultats ont une valeur générique permettant ensuite de discuter l'efficacité de l'irrigation dans d'autres contextes. Des synthèses bibliographiques par technique sont le prolongement de ce type de travaux expérimentaux (par exemple Wilhelm *et al.*, 2004, sur l'exportation des résidus de culture).

Une troisième tendance vise à prendre en charge la question de la gestion des champs cultivés dans leur globalité. Elle consiste à porter un double regard sur le champ cultivé (Biarnès, 1998), en insistant d'une part sur la dimension systémique de ce champ (à laquelle renvoie bien le terme d'« agrosystème »), objet matériel d'intérêt premier de l'agronome, et sur l'importance à accorder aux logiques d'action qui déterminent les évolutions de cet objet matériel. Ces logiques sont essentielles à prendre en considération si l'on souhaite éviter d'appliquer un schéma interprétatif unique à des situations qui sont par nature extrêmement diverses (Sebillotte et Soler, 1990 ; Almekinders *et al.*, 1995 ; Papy, 1998 ; Stoop *et al.*, 2002). Prudencio (1993) montre ainsi que les systèmes de culture « en anneaux » des villages mossis ne peuvent être évalués, tant sur le plan de l'évolution de la productivité que sur celui de la compatibilité de nouvelles technologies avec les systèmes existants, qu'à partir d'une analyse fine du système et de ses déterminants. C'est à cette tendance que se raccrochent les travaux qui, dans des programmes de type « *farming system research* » (voir par exemple Dent et Mc Gregor, 1994), cherchent à faire en quelque sorte la synthèse des deux premières approches présentées ci-dessus, en réunissant l'ensemble des connaissances acquises sur le fonctionnement du champ pour parvenir à un ensemble cohérent. C'est également le point de départ biotechnique des approches de *land use management* (Stomph *et al.*, 1994 ; Van Ittersum *et al.*, 1998) qui modélisent la production à différentes échelles et sous différents scénarios de contraintes, afin d'identifier les types de systèmes et leur répartition dans le territoire permettant d'atteindre au mieux des combinaisons d'objectifs agronomiques, économiques et écologiques. C'est enfin une voie qui tend à fédérer une partie des agronomes européens, quand ils définissent ainsi les perspectives pour l'agronomie : « *Adopting ecological principles and managing resource use.* » (Van Ittersum et Van de Geijn, 1997)

De manière assez proche, on trouve également des travaux qui partent d'une approche plus empirique¹ et cherchent à définir le domaine de validité d'un ensemble de pratiques considérées comme un tout. Dans ces derniers travaux, les logiques d'action font cependant peu partie du champ d'investigation des agronomes, l'action relevant d'une approche par les sciences sociales.

Cette troisième approche intégrée, qui a été largement développée en France², est complémentaire des deux premières approches présentées. Nous avons choisi de lui

1. Voir par exemple les synthèses de Thornton *et al.* (1990a et b) sur les associations culturales ; Valenzuela et DeFranck (1995) sur les systèmes de culture de tubercules en région tropicale ; Cirad/Inra, 1997 sur l'agroforesterie ; Stockdale *et al.*, 2001 sur les systèmes d'agriculture biologique ; ou encore Stoop *et al.*, 2002 sur des systèmes alternatifs de riziculture.

2. Voir par exemple Gras *et al.*, 1989 ; Combe et Picard, 1990 ; Malézieux *et al.*, 2001.

consacrer la première partie de cet ouvrage. Le regard que cette approche implique a aussi modifié, en particulier lorsque des chercheurs pratiquant des approches différentes travaillent ensemble dans une même équipe, la manière de concevoir les deux premières approches, au travers notamment de la sensibilité aux interactions. Des exemples illustreront ce constat dans les parties 2 et 3.

Itinéraires techniques et systèmes de culture :
une vision systémique du champ cultivé

Les notions d’itinéraire technique et de système de culture, dont les définitions sont données dans l’encadré 1.1, découlent d’une certaine vision de ce qu’est un champ cultivé, de ses caractéristiques.

a. L’agriculteur agit en effet sur un système complexe, constitué de trois compartiments : sol (y compris les organismes vivants qu’il contient), peuplement cultivé, atmosphère (y compris les organismes vivants), voir *figure 1.1*. Ce système est en permanente évolution, il passe au cours du temps par une succession d’états, engendrés par le climat, les techniques appliquées, et les organismes vivants qu’il héberge. Au sein de ce système, les composantes physiques, chimiques et biologiques du milieu sont en interaction permanente : par exemple la porosité d’un sol (composante physique) influera sur la vitesse de minéralisation de la matière organique et donc la disponibilité en éléments minéraux (composante chimique), la croissance d’une communauté d’adventices (composante biologique) entraînera une modification de la dynamique de l’eau (composante physique), etc.

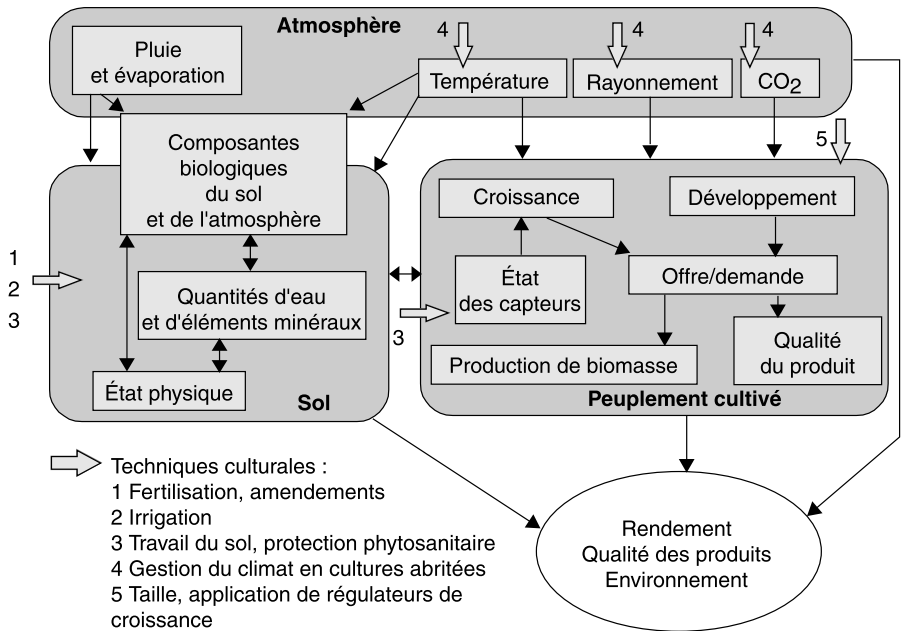


Figure 1.1. Représentation schématique du champ cultivé. Pour simplifier, seuls quelques éléments et relations principaux ont été mentionnés. Les effets des successions de cultures sur les évolutions des états du milieu et, pour les couverts pérennes, sur les états du peuplement, ne sont pas non plus représentés.

Encadré 1.1. Itinéraire technique et système de culture : définitions.

Les notions d'« itinéraire technique » et de « système de culture » sont essentielles en agronomie. Les agronomes français les manipulent en permanence et, au-delà de leur signification scientifique, ces termes sont largement passés dans un langage courant pour évoquer les pratiques des agriculteurs. Leur traduction en anglais a longtemps été problématique. L'expression « *cropping system* » correspond assez bien à « système de culture » (voir Shrestha, 2003), mais ce n'est que progressivement et finalement assez récemment que « *crop management* » ou « *management practices* » se sont imposés pour traduire « itinéraire technique ». Dans les deux cas toutefois, la correspondance n'est qu'approximative et les discussions entre agronomes français et étrangers nécessitent souvent, pour que tous se comprennent bien, que ce qui importe dans les notions d'« itinéraire technique » et de « système de culture » soit explicité. C'est en particulier vrai pour l'itinéraire technique, car les expressions qui servent à traduire cette notion sont relativement banales, et laisseraient croire qu'en français il n'y a pas de différence entre « itinéraire technique » et « conduite de la culture ». Cette difficulté de traduction signale bien la richesse de contenu de ces expressions ; ces notions ont par ailleurs été la source d'inspiration de beaucoup de travaux et de progrès en agronomie au cours des dernières décennies.

L'apparition de ces deux notions est contemporaine de l'évolution de l'agronomie en France dans les années 1970, évoquée en introduction de cet ouvrage. La volonté de faire de l'action de l'agriculteur un objet d'étude à part entière (Sebillotte, 1974a), l'intuition du bénéfice à tirer d'une approche systémique du champ cultivé, ont dès cette époque poussé à l'identification des caractéristiques de cette action, à inventer des termes permettant de rendre compte de ses particularités, et à articuler cette prise en compte des actions avec l'objet matériel qu'est le champ cultivé. L'expression « action de l'agriculteur » mérite d'être explicitée. Il ne s'agit pas d'étudier cette action comme le ferait un anthropologue, mais d'étayer par une approche scientifique de ses déterminants et de ses conséquences le raisonnement des actions de l'agriculteur. Les définitions formelles d'« itinéraire technique » et de « système de culture » datent de cette époque. L'itinéraire technique est une « combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle en vue d'en obtenir une production » (Sebillotte, 1974a ; 1978a) ; le système de culture est « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par : (i) la nature des cultures et leur ordre de succession, (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues » (Sebillotte, 1975 ; 1990a).

b. Cette complexité est pour partie à l'origine de l'incertitude qui caractérise l'application d'une technique culturale : pour une technique donnée, on peut observer toute une famille de résultats possibles. Par exemple, si on limite pour simplifier l'appréhension de l'effet du labour à son impact sur la porosité de la couche travaillée, il est évident que le résultat de la technique « labour » va être extrêmement variable d'une situation à une autre. C'est d'ailleurs l'un des champs de production de connaissances de l'agronomie que d'identifier les lois qui régissent les changements d'état du système qu'est le champ cultivé (cf. parties 2 et 3). Pour l'application d'une technique donnée, le résultat sera fonction des conditions d'application de la technique, autant externes (le climat en particulier) qu'« internes » (la forme et le réglage des outils, la vitesse d'avancement...) ; il sera

également très dépendant de l'état du système au départ (par exemple l'efficacité d'un herbicide sur une mauvaise herbe dépendra des conditions de croissance de cette dernière, voir Adkins *et al.*, 1998). Il n'existe donc pas de relation biunivoque entre l'application d'une technique et un état particulier du système.

c. Les techniques mises en œuvre sur une parcelle donnée interagissent fortement entre elles. D'une part, un état du système donné peut être obtenu par différents cheminements (par exemple un état d'infestation en mauvaises herbes peut résulter d'un désherbage chimique, d'un travail du sol, d'une technique alternative de désherbage — thermique, biologique...). Par ailleurs, une même technique modifie le plus souvent plusieurs composantes du milieu simultanément, de manière intentionnelle (par exemple le passage d'un outil de travail du sol modifiera à la fois la structure du sol et la dynamique des bioagresseurs), mais aussi non intentionnelle (le passage d'un épandeur d'engrais apportera des matières fertilisantes au système mais sera également susceptible de produire des tassements). *In fine*, le résultat d'une technique dépendra, parfois étroitement, des autres techniques appliquées sur la parcelle.

Ces caractéristiques du champ cultivé ont quatre conséquences fondamentales. La première est que le résultat d'une technique n'est jamais certain, que celle-ci ait comme objectif une production quantitative, la qualité des produits, ou encore l'environnement ; une meilleure prévisibilité est atteinte si l'on connaît les facteurs de variation du résultat et les lois de variation. La seconde est qu'un changement des techniques appliquées peut avoir des conséquences non prévues sur le fonctionnement du champ cultivé, parfois éloignées de celles qui motivaient ce changement à l'origine ; un certain nombre de conséquences négatives d'innovations introduites dans les systèmes de culture y trouvent leur origine (par exemple les conséquences de la suppression des prairies sur l'érosion, celles de l'augmentation de la puissance de traction sur les tassements du sol, etc.), ce qui incite à une prudence certaine dans la transformation des pratiques et à une évaluation globale *a priori* plus systématique. Ici encore, une meilleure connaissance du fonctionnement du champ cultivé est utile : elle permet d'orienter l'évaluation des innovations de manière à ce que cette dernière soit la plus complète possible. La troisième conséquence est qu'un objectif de production, ou environnemental, ne peut être atteint qu'en considérant comme un tout l'ensemble des techniques mises en œuvre sur une parcelle qui concourent à atteindre cet objectif. Autrement dit, une appréhension globale des pratiques des agriculteurs s'impose. La quatrième conséquence enfin est qu'un agriculteur, qui connaît les propriétés du champ cultivé, agit sur ce système après en avoir évalué l'état : c'est cette appréhension de l'état du système qui guide les actes de l'agriculteur, à travers la mise en œuvre de règles de décision — sur lesquelles nous reviendrons ci-dessous.

Itinéraires techniques et systèmes de culture : la finalisation des pratiques agricoles et la prise en compte des logiques d'action

Les notions d'itinéraire technique et de système de culture font explicitement référence à des objectifs (de production, environnementaux...). Elles correspondent donc à un certain regard sur les pratiques des agriculteurs, qui tient compte

de ces objectifs et s'y réfère. Insister sur le fait que les pratiques sont finalisées présente l'intérêt de montrer que plusieurs modes de conduite d'une même culture peuvent exister si les objectifs de production sont différents (voir par exemple Lescourret *et al.*, 1999 ; Loyce *et al.*, 2002a et b). Il n'y a évidemment pas de « bons » itinéraires techniques universels ; il n'y a que des gammes d'itinéraires techniques plus ou moins adaptés à des palettes d'objectifs. Ainsi la conduite des cultures est-elle appelée à évoluer quand évoluent les attentes vis-à-vis du processus de production comme l'illustre, au-delà de la rentabilité, la prise en compte progressive et cumulative des préoccupations environnementales, de qualité des produits, de sécurité sanitaire des aliments, de la réalisation par l'agriculture de grandes fonctions écologiques comme le piégeage du carbone, etc. Se pose évidemment la question de savoir qui fixe les objectifs : comme le souligne Fresco (1984), ce peut être l'agriculteur ou encore les chercheurs, les pouvoirs publics, et on peut y rajouter les acheteurs de produits agricoles, les agences de développement, voire la société dans son ensemble... Mais c'est l'agriculteur qui agit, et si les autres acteurs souhaitent lui voir prendre en charge des objectifs nouveaux, il devient nécessaire de vérifier la compatibilité, sur le plan de la conduite des cultures, d'objectifs multiples, compatibilité qui n'est pas acquise d'avance. *In fine*, cette détermination de la conduite des cultures par un ou plusieurs objectifs est importante à prendre en compte par les agronomes, tant lorsqu'ils cherchent à évaluer les pratiques des agriculteurs que lorsqu'ils cherchent à concevoir de nouvelles façons de produire.

En cohérence avec le point précédent, il est important de souligner que les notions d'itinéraire technique et de système de culture font référence à des logiques d'action (Sebillote et Soler, 1990 ; Bellon *et al.*, 2001) — celles des agriculteurs — qui sont justement sous-tendues par les objectifs évoqués précédemment, et bornées par un ensemble d'atouts et de contraintes. Celui-ci est évidemment important à considérer : si la diversité des objectifs implique une diversité des conduites, la variabilité des atouts et des contraintes ainsi que de l'expérience (Somers, 1997) qui caractérisent la situation individuelle de chaque exploitant explique quant à elle qu'il existe différentes manières d'arriver à un même objectif. Cet ensemble de considérations a plusieurs implications fondamentales. La première, que nous citerons pour mémoire, fait écho à ce que nous avons déjà évoqué : le seul fait que ce soit un acteur unique qui applique des techniques successives sur une parcelle est générateur d'interactions entre ces techniques, car l'agriculteur agit en fonction de ce qu'il a réalisé antérieurement et de ce qu'il a prévu de réaliser ultérieurement (Meynard *et al.*, 2001 ; Nesme *et al.*, 2003). La seconde conséquence porte sur le périmètre des travaux à mener en agronomie. En effet, si l'on accepte que des logiques d'action différentes et légitimes coexistent, alors font partie des tâches des agronomes d'une part l'identification de ces logiques techniques (cf. chapitre 2), et d'autre part la mise au point de gamme de références techniques permettant d'atteindre la diversité des objectifs donnés pour une diversité de conditions (par exemple Cros *et al.*, 2004, sur les systèmes fourragers). Par ailleurs, la prise en compte des logiques d'action amène les agronomes à travailler à des échelles compatibles avec ces logiques : à titre d'exemple, pour tenir compte des interactions entre phénomènes biophysiques entre parcelles, les agriculteurs raisonnent sur des échelles plus larges que la parcelle agricole, ce qui

implique le développement de travaux d'agronomes tournés vers l'aide au raisonnement à l'échelle de l'exploitation agricole (par exemple Ten Berge *et al.*, 2000 ; Papy, 2000). Enfin, il est clair que ces conceptions amènent les agronomes à concevoir leur contribution au développement agricole dans le cadre d'un partenariat avec les agriculteurs, plutôt que dans celui d'un schéma descendant selon lequel l'innovation serait produite par la recherche et diffusée pour adoption auprès des agriculteurs (Hammer *et al.*, 2002).

Les évolutions des travaux dans le domaine des systèmes de culture

Les travaux sur les manières de cultiver sont très nombreux à l'échelle internationale. Une recherche dans les bases de données sur le mot-clé « *cropping system* » donne ainsi un grand nombre de références d'articles scientifiques dont le titre comprend cette expression. Une partie significative de ces travaux consiste en l'évaluation, en station expérimentale, de systèmes de culture définis par une succession de deux cultures ou davantage (par exemple Pradhan et Sahu, 2004), ou encore d'associations de cultures. Ces évaluations peuvent être motivées par des innovations que l'on souhaite introduire dans une région, comme la culture d'une nouvelle espèce par exemple. Elles peuvent être également consécutives à l'émergence d'une nouvelle préoccupation, environnementale par exemple, qui amène à réévaluer d'anciens systèmes qui n'ont jamais été évalués sur ces nouveaux critères. Les variables sur lesquelles porte l'évaluation sont, naturellement, très diverses, compte tenu des enjeux auxquels l'agriculture est confrontée, et qui ont été rappelés en introduction de cet ouvrage. Les critères économiques et environnementaux sont, à l'heure actuelle, les plus courants.

Ces travaux apportent des informations intéressantes, quantifiées, sur les performances d'un système dans un environnement donné. Ils sont cependant d'une portée limitée, pour différentes raisons. Tout d'abord, ils correspondent très souvent à des systèmes normatifs, c'est-à-dire dans lesquels il n'y a pas de place pour une adaptation des techniques ou des successions de cultures à l'état du système. Or, comme on l'a vu ci-dessus, les agriculteurs adaptent leurs pratiques aux situations qu'ils constatent. En conséquence, le nombre de situations où les résultats obtenus sont applicables reste modeste, puisque peu d'agriculteurs adopteront rigoureusement le même ensemble de pratiques que celui qui a été testé. Par ailleurs, le domaine de validité des expérimentations sera étroit du point de vue du milieu physique, si les expérimentations sont menées en un seul lieu, et sur un petit nombre d'années. Pour échapper à ces difficultés, une autre manière d'évaluer des systèmes nouveaux ou des systèmes anciens relativement à des préoccupations nouvelles consiste à pratiquer des expérimentations fondées sur des règles de décision plutôt que sur des systèmes normatifs, à réaliser des expérimentations multi-locales, et à utiliser la modélisation en complément de l'expérimentation. Nous reviendrons plus loin sur ce type de démarche (chapitre 3).

À côté de ces travaux qui accumulent des connaissances souvent difficiles à valoriser, on peut, de manière caricaturale, classer les innovations majeures en termes de travaux sur les systèmes de culture dans trois grandes catégories :

- une meilleure compréhension et une meilleure prise en compte des interactions au sein du champ cultivé, permettant d'améliorer la prise en charge de questions nouvelles ;
- le développement de travaux sur les raisonnements techniques, permettant de déboucher, en combinaison avec les connaissances évoquées dans le point précédent et celles abordées dans les parties 2 et 3 de cet ouvrage, sur des outils d'aide au raisonnement ;
- l'élargissement de la « boîte à outils » des agronomes pour l'évaluation des systèmes existants et la conception de nouveaux systèmes.

Nous avons choisi de mettre l'accent sur ces trois types de travaux, qui caractérisent bien l'agronomie des systèmes de culture aujourd'hui à l'échelle de la parcelle agricole³. Chacune de ces catégories constitue encore à l'heure actuelle un enjeu pour les agronomes ; un chapitre sera consacré à chacune d'entre elles.

3. Les notions d'« itinéraire technique » et de « système de culture » ont également été à l'origine des travaux menés au cours des quinze dernières années sur des échelles spatiales et des niveaux d'organisation dépassant la parcelle agricole, qui seront traités dans la partie 4.

Chapitre 1

La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture

Thierry DORÉ, Marie-Hélène JEUFFROY, Stéphane DE TOURDONNET

Les pratiques agricoles se sont profondément transformées au cours des trente dernières années. Cette évolution concerne d'une part les agricultures fortement artificialisées qui ont, simultanément, rapidement accru leur recours aux intrants de synthèse, bénéficié d'un renouvellement variétal rapide, et mis en œuvre des moyens de mécanisation importants. Mais ce changement a également marqué les agricultures dans les pays dits « du Sud », pour lesquelles on a pu observer une diminution des surfaces en jachère, la mise en culture de sols moins fertiles, le développement de la mécanisation et de la motorisation, une diversification des cultures, etc. L'agronomie a contribué à ces transformations, notamment en s'appuyant sur l'accroissement des connaissances sur le fonctionnement du peuplement végétal et sur le milieu qui l'environne, sur lesquelles peut s'appuyer le raisonnement des techniques, comme cela sera illustré dans les parties 2 et 3. L'agronomie a également participé à l'élaboration de nouvelles méthodes nécessaires pour aborder des échelles spatiales et des niveaux d'organisation autres que la parcelle (cf. partie 4). L'agronomie enfin s'est principalement développée autour d'une approche intégrée du champ cultivé pour que les systèmes de culture en évolution gardent une certaine cohérence. De manière forcément simplificatrice, on peut retenir trois éléments marquants de ce point de vue, exposés dans les trois sections ci-dessous.

» Importance d'une approche intégrée du fonctionnement du champ cultivé

Nombre des travaux menés en agronomie l'ont été en tenant compte, dès l'origine, de la dimension systémique du champ cultivé. Cependant, si cela n'avait pas été le

cas, la réalité de l'évolution de l'agriculture (voir l'introduction générale) y aurait contraint les agronomes. En effet, les critères sur lesquels l'activité agricole est jugée, et qui se sont pendant un temps limités à une évaluation des performances quantitatives de la production, se sont diversifiés. Ainsi, l'adaptation des techniques de culture à de nouveaux enjeux, la conception de systèmes de culture innovants, les évaluations *ex ante* d'innovations et les diagnostics sur les performances des systèmes de culture ont maintenant systématiquement plusieurs objectifs. Cette caractéristique vient, à côté des interactions évoquées en introduction de cette partie, renforcer le caractère indispensable d'une appréhension globale du fonctionnement du champ cultivé, qui amène elle-même à porter un regard particulier sur le raisonnement des techniques et sur leurs transformations.

Il en est ainsi de la démarche généralement adoptée pour réfléchir à l'introduction d'un changement technique dans les systèmes de culture : pour raisonner une technique de culture, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble du système et non pas seulement ce qui paraît *a priori* être dépendant directement de la technique, et de mettre l'accent sur les interactions, entre techniques et entre composantes du milieu, évoquées ci-dessus. La question de la simplification du travail du sol, développée dans l'*encadré 1.2* (voir aussi chapitre 9), en constitue un bon exemple, très actuel. Il apparaît clairement qu'on ne peut décider de l'intérêt qu'il y aurait à supprimer le labour qu'après avoir fait un bilan complet des intérêts et des limites de la technique en tenant compte de l'ensemble des éléments qui sont affectés (composantes du milieu, autres techniques culturales, gestion de la main-d'œuvre sur l'exploitation, etc.), et du contexte de chaque situation. Le bénéfice de ces techniques vis-à-vis de la lutte contre l'érosion, par exemple, n'aura aucun sens dans les régions peu sensibles à ce phénomène, où le préjudice environnemental pourra au contraire être augmenté par un recours accru à certains herbicides, imposé par un risque de salissement supérieur des parcelles conduites en TSL⁴. Au vu des connaissances actuelles, le fait que les techniques culturales sans labour « imitent » mieux les écosystèmes naturels que les systèmes labourés, ce qui est un argument parfois avancé pour les défendre, n'est pas fondé voire dangereux, et ne devrait pas se substituer à une réelle analyse coût/bénéfice, permettant d'identifier le domaine de validité de cette innovation. Cet exemple montre ainsi :

- que l'on gagne, pour chaque technique culturale, à distinguer son ou ses objectifs propres (ici améliorer la structure du sol, l'enfouissement de matières organiques ou minérales) et ses autres effets, directs, qui peuvent se révéler majeurs et justifier l'adoption ou le rejet de la technique considérée (sensibilité à l'érosion), mais aussi indirects, qui ne sont parfois perceptibles qu'à long terme et sont donc difficiles à appréhender (stockage du carbone, maintien de la biodiversité...) ;
- que les effets et les conséquences d'un changement technique ne concernent pas que la dimension agronomique et la parcelle, mais que chaque technique, chaque itinéraire technique affecte aussi le fonctionnement de l'exploitation voire son évolution, l'organisation du travail, les résultats économiques et les états de l'environnement écologique considérés à différentes échelles ;

4. Technique culturale sans labour.

Encadré 1.2. Un exemple du raisonnement d'un changement technique : la simplification du travail du sol.

Les travaux sur la simplification du travail du sol ne sont pas récents^a, mais les débats se sont intensifiés ces dernières années autour de la question de la suppression du labour, et de ce qu'il est convenu d'appeler les « techniques culturales simplifiées » (TCS) ou, mieux, les « techniques culturales sans labour » (TSL), car la suppression du labour n'est pas forcément synonyme d'une simplification du raisonnement technique^b. On a ainsi vu s'affronter des partisans et des opposants, plutôt radicaux, d'une suppression du labour. Cet affrontement est dans une certaine mesure caricatural, car il convient de remarquer que, loin d'être un ensemble de pratiques homogènes, les TSL balayent une gamme très large de niveaux de simplification du travail du sol, allant du travail superficiel au semis direct sous couverture végétale (SCV, voir Capillon et Séguy, 2002), avec dans certaines situations le recours occasionnel à un travail du sol profond — un décompactage par exemple. Ce constat a deux conséquences. D'une part, on doit s'interroger sur ce que représentent ces différents modes de travail du sol dans les statistiques portant sur l'adoption des TSL évoquées ci-dessous ; d'autre part et surtout, il faut relever que d'un point de vue agronomique, la dénomination « TSL », largement employée, est source de confusions puisque les états du sol obtenus par les différents types de pratiques ne sont pas correctement définis par l'expression « sans labour » (Corpen, 2004). Ce simple constat de la diversité des pratiques que recouvre une seule appellation milite déjà en soi pour une approche nuancée des TSL. Par ailleurs, le raisonnement agronomique amène à adopter une position prudente face à la question de l'opportunité des TSL, position qu'une mise en perspective historique peut éclairer.

Historiquement, l'araire était utilisé pour travailler le sol sans le retourner. Puis la charrue, qui le retourne systématiquement, a été inventée pour lutter contre les mauvaises herbes (Sigault, 1977), faciliter l'enfouissement des fumiers et améliorer l'état structural du sol. La suprématie du labour, longtemps considéré comme la technique de base du travail du sol, a commencé à être remise en cause à partir des années 1930, conduisant au développement des techniques sans labour pour répondre à différents enjeux :

- des situations environnementales problématiques comme celle des *dust bowls*, manifestations d'érosion éolienne aux USA (Biswas, 1984 ; Lal, 1999) ou d'érosion hydrique en Amérique du Sud (Lal, 2000, 2001) : les TSL sont en effet susceptibles de diminuer la sensibilité de la surface du sol aux phénomènes érosifs ;
- la conservation de la ressource en eau du sol dans les pays à faible rapport pluviométrie/évapotranspiration (O'Leary, 1996) : le labour est susceptible d'entraîner une augmentation de l'évaporation du sol ;
- l'amélioration de la productivité et de l'organisation du travail : le labour est coûteux en temps de travail, en énergie et en matériel (Donaldson *et al.*, 1996) ;
- la résolution de divers problèmes techniques comme la remontée de cailloux à la surface du sol ou la sensibilité à la battance de certains sols.

Les TSL et, dans certains cas, le semis direct ont ainsi permis de résoudre différents problèmes, dans des situations pour lesquelles le bilan à court terme entre les gains immédiats et visibles de la suppression du labour et ses inconvénients était à l'avantage des TSL. Cela a conduit à une augmentation très rapide des surfaces en semis direct à travers le monde, et on estime les surfaces concernées à 72 millions d'hectares en 2002 (Derpsch et Benites, 2003), avec une répartition très inégale selon les pays : 48 % des surfaces sont localisées en Amérique latine, 37 % aux États-Unis et au Canada, 12 % en Australie et 3 % dans le reste du monde.

Toutefois, dans l'état actuel des connaissances, ces éléments ne sont pas de nature à remettre en cause de manière totale l'intérêt du travail du sol profond par labour. En effet, les changements techniques liés à la simplification du travail du sol modifient profondément le fonctionnement du champ cultivé (Holland, 2004)^c. Les effets des TSL sur le milieu ainsi que les avantages et les inconvénients qui en résultent vont dépendre, pour chaque situation, des interactions entre ces différents processus sous l'effet des techniques culturales et du climat. Par ailleurs, ces modifications importantes du fonctionnement du champ cultivé se répercutent sur les autres techniques culturales, notamment sur la lutte contre les adventices avec, dans les situations fortement enherbées par des espèces favorisées par l'absence de retournement du sol, une augmentation de l'utilisation d'herbicides (Nalewaja 2001 ; Neve *et al.*, 2003), sur la gestion de la fertilisation azotée (Nario *et al.*, 2001), sur l'utilisation de cultures intermédiaires, voire de cultures associées (Calegari, 2001 ; de Tourdonnet *et al.*, 2003), sur la gestion de l'eau, etc.

a. Voir les synthèses déjà anciennes de Sebillotte, 1975 ; ITCF, 1976 ; Biswas, 1984 ; Monnier *et al.*, 1994, et le chapitre 9.

b. Carter, 1994 ; Inra, 2001 ; Thévenet *et al.*, 2002 ; Corpen, 2004.

c. Pour les modifications sur la température et l'humidité du sol, voir Bragagnolo et Mielniczuk, 1990 ; sur l'activité biologique du sol, Dalal *et al.*, 1991 ; Boyer *et al.*, 1999, 2001 ; Lupwayi *et al.*, 2001 ; sur l'état structural, Carter, 1994 ; El Titi, 2003a ; sur la matière organique du sol et le stockage du carbone, Guérif, 1994 ; Bayer *et al.*, 2002 ; Inra, 2002 ; sur les transferts d'eau, d'azote et de pesticides dans le profil, Barriuso *et al.*, 1994 ; Germon *et al.*, 1994 ; Clausen *et al.*, 1996 ; Radcliffe *et al.*, 1998 ; Jordan *et al.*, 2000 ; Findeling, 2001 ; Rose et Carter, 2003 ; sur les relations de compétition entre culture commerciale, plante de couverture et adventices, Ozier-Lafontaine *et al.*, 1998 ; Autray et Oliver, 2001 ; sur la biodiversité et la dynamique des populations de ravageurs, Kladivko, 2001...

– que l'intérêt d'une technique doit être étudié à différents pas de temps : la campagne culturale et les années qui suivent (évolution de la flore adventice, stockage du carbone, etc.) ;

– que les références seront nécessairement complexes et les réponses toujours nuancées du fait de la complexité du système et de l'importance des interactions.

Cette approche intégrée du fonctionnement du champ cultivé a également régulièrement amené les agronomes à élargir l'objet de leurs investigations, en prenant en compte de nouvelles interactions existant au sein du champ cultivé et auparavant sous-estimées. Cet élargissement peut être la conséquence d'une modification des manières de produire, qui engendre de nouvelles interactions, et/ou d'un accroissement dans nos capacités de compréhension du fonctionnement du champ cultivé. On peut citer ainsi une meilleure prise en charge des interactions entre fertilisation azotée et protection contre les maladies, ou encore des interactions entre conduite de la culture et choix variétal. L'encadré 1.3 développe ce dernier exemple et montre pourquoi les agronomes ont été récemment poussés à entamer avec les généticiens des travaux centrés sur l'adaptation de modèles de culture aux variétés, qui visent à développer des outils permettant de raisonner le couple variétés × conduite culturale (Goyne *et al.*, 1996 ; Asseng *et al.*, 2002), mais aussi une réflexion sur les variétés à développer compte tenu de l'évolution des systèmes de culture (Meynard et Jeuffroy, 2002). De tels travaux devraient déboucher à court terme sur des outils d'aide au raisonnement du choix variétal en fonction d'objectifs ou de contraintes de production, et sur une meilleure valorisation du couple variété ×

Encadré 1.3. Un exemple de l'élargissement du champ d'investigation en agronomie : l'intérêt porté au raisonnement du choix variétal.

Le choix variétal a été longtemps quasi inexistant dans le champ de travail des agronomes, ce qui explique la faiblesse des travaux passés définissant les modalités d'emploi des variétés. L'analyse de la diversité du comportement des variétés face au milieu était principalement l'apanage de généticiens et de statisticiens, travaillant sur l'analyse et la modélisation des interactions génotype $\times$ environnement (Van Eeuwijk *et al.*, 1996 ; Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997). Récemment, le choix variétal est apparu comme un élément à part entière du raisonnement des agronomes, en particulier en lien avec l'évolution de leur cadre de travail, qui est passé d'une maximisation de la production, induisant une suppression des facteurs limitants, à la prise en compte d'une plus grande diversité de conditions de production, incluant des situations non optimales. Or, le choix de cultiver une variété pour ses caractéristiques propres a des conséquences directes sur les autres techniques culturales à mettre en œuvre. Ainsi Loyce *et al.* (2001) illustrent-ils sur céréales la forte influence de la variété cultivée sur le raisonnement des pratiques de protection des cultures : le développement de conduites plus économes en intrants et moins préjudiciables pour l'environnement repose sur l'utilisation de variétés présentant des résistances multiples et complémentaires aux maladies, permettant ainsi de réduire l'usage de fongicides. Sur le même plan, l'utilisation d'associations variétales de céréales (Belhaj Fraj, 2003 ; Finckh *et al.*, 2000) permet de réduire notablement l'utilisation de pesticides tout en garantissant un niveau au moins équivalent de rendement et de teneur en protéines, et un accroissement de leur stabilité entre parcelles et entre années. La gestion des mauvaises herbes sur une parcelle peut également être fortement influencée par le choix des variétés qui y sont cultivées. Ainsi, la précocité des variétés choisies (notamment celles des céréales d'hiver en Europe), qui influence directement la date de semis possible, peut modifier sensiblement la durée de l'interculture. Or celle-ci peut être utilisée pour lutter mécaniquement contre les adventices par différents travaux du sol superficiels favorisant les faux-semis (voir par exemple Johnson et Mullinix, 1995). Par ailleurs, les caractéristiques morphologiques des variétés influencent directement leur compétitivité vis-à-vis des adventices (Froud-Williams, 1997). Au-delà des aspects liés à la protection des cultures, le choix variétal interagit également avec les techniques de fertilisation et de travail du sol. Dans le raisonnement de la fertilisation azotée des céréales en Europe, la réalisation d'un dernier apport tardif destiné à enrichir les grains en protéines, pour satisfaire un critère qualitatif exigé par un marché, s'est particulièrement développée avec l'augmentation de l'utilisation de variétés ayant une aptitude à la panification. Aujourd'hui, l'ajustement de la fertilisation aux caractéristiques variétales constitue une voie de recherche importante (Van Sanford et Mc Kown, 1986 ; Le Gouis *et al.*, 2000 ; Oikeh *et al.*, 2003). Enfin, le développement des techniques culturales sans labour est actuellement limité dans certaines situations par la difficulté à maîtriser les infestations d'adventices. Le développement de variétés résistantes aux herbicides non sélectifs a ainsi été un levier très important de développement de ces techniques (Chevassus-au-Louis, 2001).

itinéraire technique pour lever ou contourner des facteurs limitants, améliorer les capacités d'intervention sur le champ cultivé en permettant de décaler certaines interventions (semis, traitements) à des dates où les conditions d'intervention sont plus satisfaisantes, ou tirer parti de nouvelles propriétés des variétés mises sur le marché.

►► L'évolution des techniques

La transformation des manières de produire est rarement caractérisée par l'émergence *ex nihilo* d'un nouveau système faisant un tout. Plus fréquemment, l'évolution est beaucoup plus progressive et résulte de l'intégration de connaissances et de règles de décision nouvelles dans un ensemble cohérent préexistant. Dans les trente dernières années, en même temps que s'accroissaient simultanément les connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé et les capacités d'intervention par les agriculteurs (nouvelles variétés, nouvelles molécules, nouveaux outils de travail du sol...), le raisonnement des techniques a évolué pour passer de recommandations normatives à des recommandations plus fines basées sur des règles de décision, et ayant de plus en plus recours à des indicateurs de pilotage. Le cas de la fertilisation azotée des cultures annuelles en Europe, évoqué dans l'encadré 1.4, constitue un exemple caractéristique de cette évolution. La figure 1.2 résume l'évolution du raisonnement de cette technique au cours des trente dernières années. Cette évolution est marquée par une cohérence entre les innovations et les techniques antérieures auxquelles elles succèdent, et par un affinement progressif du raisonnement dans une « boucle de progrès ». La logique en a été la suivante : partant d'un corpus de connaissances, les méthodes se sont affinées grâce à l'augmentation progressive de ce capital qui a permis successivement de prendre en compte les caractéristiques particulières des parcelles, de limiter le handicap que constitue l'imprévisibilité du climat pour la gestion, et d'adapter les stratégies de fertilisation à des objectifs différenciés. On retrouve peu ou prou, avec des variantes bien sûr, les mêmes tendances d'évolution, pour le raisonnement des différentes techniques qui visent à satisfaire les besoins du peuplement en facteurs de croissance (fertilisation, irrigation, voir Tiercelin, 1998 ; Debaeke, 2003) et à assurer les conditions de croissance du peuplement (protection phytosanitaire, gestion du climat sous abri).

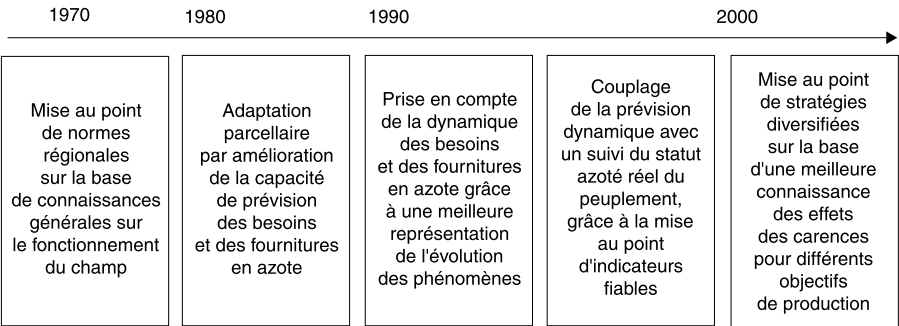


Figure 1.2. Évolution du raisonnement des techniques de fertilisation azotée en Europe au cours des trente dernières années.

Encadré 1.4. Un exemple d'évolution progressive des techniques : la fertilisation azotée des cultures en Europe.

Aujourd'hui, il existe de nombreux outils pour raisonner la fertilisation azotée des cultures. Leur mise au point a été progressive, et le plus souvent fondée sur une acquisition de connaissances nouvelles sur le cycle de l'azote dans le système « sol-culture-atmosphère » (cf. partie 3). La validité de recommandations normatives (une dose pour une culture dans une région), qui prévalaient dans les années 1970, s'est heurtée à une très grande variabilité des besoins en azote de la culture et des fournitures en azote du sol, se traduisant par une variabilité importante des courbes de réponse de la culture à l'azote entre parcelles, y compris au sein d'une même région (Boiffin *et al.*, 1981). La tendance était alors, pour les agriculteurs, de surestimer les besoins et les apports pour ne pas risquer de carence. Cette attitude a rapidement été jugée insatisfaisante pour des raisons agronomiques en raison des risques accrus de verse, malgré les progrès génétiques de résistance à ce phénomène, écologiques quand la relation entre pollution des nappes phréatiques et surfertilisation des cultures a été avérée, et économiques lorsque le rapport entre le coût des engrais et le prix de vente des récoltes a évolué défavorablement pour les agriculteurs.

Pour tenter de tenir compte de cette variabilité, sur laquelle pesait d'autant plus d'enjeux que l'évolution des itinéraires techniques conduisait à augmenter globalement les doses d'engrais, la méthode du « bilan prévisionnel pour le raisonnement de la fertilisation azotée », proposée par Rémy et Hébert (1977), a constitué une avancée importante. Elle vise à déterminer la dose totale d'azote à apporter sur une culture sur la base d'une confrontation entre ses besoins en azote, calculés en s'appuyant sur les rendements observés les années précédentes, et les fournitures en azote du sol, issues de références adaptées régionalement. Elle repose sur une représentation significativement améliorée du fonctionnement du système « sol-culture-atmosphère » par rapport à celle, très fruste, de la méthode normative des courbes de réponse ; elle y substitue une approche parcelaire à une approche régionale des fournitures en azote par le milieu et du potentiel de production qui détermine les besoins. Cette méthode et ses dérivés, qui constituent à l'heure actuelle les outils de référence pour le raisonnement de la fertilisation azotée, a fait l'objet d'une adaptation du calcul des besoins à un grand nombre d'espèces (Meynard *et al.*, 1997a) et de raffinements dans l'estimation des fournitures par le milieu, en particulier pour la prévision de l'azote fourni par les résidus de la culture précédente (chapitre 7).

Les connaissances sur ces fournitures ont considérablement progressé grâce aux nombreux travaux sur la compréhension et l'identification des déterminants de la dynamique de l'azote minéral dans le sol, dont la quantification des biotransformations de l'azote telles que la minéralisation, l'organisation, la dénitrification... (Recous *et al.*, 1997 ; chapitre 7). L'ensemble de ces connaissances a été organisé et structuré dans des outils statistiques d'aide à la gestion de la fertilisation azotée, comme Azobil (Machet *et al.*, 1990). En continuité de ces acquis, une nouvelle phase a consisté à estimer les besoins du peuplement et les fournitures dynamiques par le milieu, ce qui a eu pour conséquence un fractionnement accru des apports d'engrais permettant de faire correspondre au mieux les besoins et les fournitures. Ce fractionnement permettait de répondre simultanément :

- à des préoccupations de type environnemental toujours plus pressantes, comme la limitation des pertes en azote du fait de la diminution des périodes où l'offre en azote du sol excède largement la capacité d'absorption de la culture ;
- à des préoccupations de type économique, car il permet généralement de mieux satisfaire les exigences commerciales en matière de teneur en azote des produits récoltés, un apport tardif d'azote, pratiqué depuis peu d'années, permettant en effet d'accroître la teneur en protéines des grains de blé.

Aujourd'hui enfin, la tendance générale de l'évolution des itinéraires techniques vers une diversification importante (poursuite de l'intensification dans certains cas, accroissement du nombre de systèmes extensifs, exigences de qualité marquées, obligation de réduire les pertes vers l'environnement) rend de plus en plus nécessaire une gestion encore plus précise de l'adéquation entre la dynamique des besoins et celle de l'offre. De ce fait, de nombreux indicateurs du sol ou de la culture ont été proposés pour permettre aux agriculteurs d'ajuster encore plus précisément la fertilisation aux caractéristiques de la parcelle (Smith *et al.*, 1990a), en pilotant la fertilisation au cours du cycle en fonction d'une estimation de l'état réel du peuplement. Ces outils de pilotage des cultures, basés sur des indicateurs d'état azoté, permettent de diagnostiquer une entrée en carence de la culture et de proposer un apport d'azote pour l'éviter. Ils permettent ainsi de mieux définir les dates d'apport et d'en ajuster les doses aux besoins de la culture : utilisation de la teneur en nitrates du jus de base de tiges (Justes *et al.*, 1997), estimation de la teneur en chlorophylle des feuilles par transmittance ou réflectance (Yadava, 1986 ; Turner et Jund, 1991 ; Denuit *et al.*, 2002), décoloration d'une placette semée à une densité double de celle du reste de la parcelle (Limaux *et al.*, 2001).

D'autres travaux récents, centrés sur l'analyse des effets de carences azotées intervenant à différentes périodes dans le cycle cultural (Jeuffroy et Bouchard, 1999), ont permis de montrer que certaines carences temporaires ne sont pas préjudiciables pour le rendement et peuvent même être bénéfiques pour la teneur en protéines des grains. Des stratégies de fertilisation azotée tolérant des carences ont donc été proposées, sur la base d'une utilisation de modèles dynamiques simulant à la fois l'évolution des fournitures d'azote par le sol, celle des besoins, et les conséquences de ces carences (Meynard *et al.*, 2002). L'utilisation de tels outils pour raisonner la fertilisation azotée dans des situations présentant de nombreux facteurs limitant la valorisation des engrais apportés^a bute aujourd'hui sur l'estimation précoce des facteurs limitants qui seront présents sur la parcelle, et sur leurs conséquences (David *et al.*, 2005b). La disponibilité de nombreux modèles dynamiques simulant l'accumulation d'azote dans la culture et les fournitures d'azote par le sol (de Willigen, 1991), ainsi que l'existence de nombreux outils de caractérisation de l'état d'une culture, semblent pouvoir être utilisés de manière complémentaire en vue d'améliorer le raisonnement de la fertilisation azotée. En effet, de nouvelles méthodes statistiques, couplant l'utilisation de modèles dynamiques et les mesures en cours de culture, peuvent permettre d'améliorer la qualité prédictive des modèles, et donc leur capacité décisionnelle (Makowski *et al.*, 2004).

a. Comme en agriculture biologique, mais également dans des systèmes conventionnels moins intensifs où certains facteurs limitants sont tolérés et modifient l'efficacité d'utilisation de l'engrais apporté.

► Prise en compte de différents pas de temps et échelles d'espace dans la conception et l'évaluation des systèmes de culture

L'évolution de l'agriculture au cours des cinquante dernières années, dans les pays industrialisés, s'est traduite par une artificialisation importante du processus de production. On entend par là que les agriculteurs ont eu de plus en plus recours à des apports exogènes au système pour transformer les processus naturels — ils ont aussi transformé les propriétés du milieu de manière durable — à travers des

aménagements permanents, comme l'installation de drains dans les parcelles cultivées. Les utilisations d'engrais de synthèse (apparition dans la seconde moitié du XIX^e siècle, accroissement massif de leur usage dans la seconde moitié du XX^e siècle) et de produits phytosanitaires minéraux puis de synthèse (seconde moitié du XX^e siècle pour ces derniers), en constituent les points majeurs. Ces apports ont provoqué une perturbation des cycles « naturels », à la fois biogéochimiques en ce qui concerne les éléments minéraux, et écologiques en ce qui concerne les populations et communautés d'être vivants (bioagresseurs, auxiliaires et commensaux, flore et faune du sol). Altieri (1999) souligne que ce processus engendre sa propre accélération : l'artificialisation provoque une diminution de biodiversité, cette dernière entraînant un besoin accru d'intrants externes, du fait que certaines fonctions, qui étaient assurées lorsque la biodiversité était suffisante, ne le sont plus.

Ces perturbations ont eu d'indéniables effets environnementaux et écologiques (cf. l'introduction générale). La prise de conscience des conséquences négatives d'une certaine artificialisation du milieu par l'agriculture a entraîné, au cours des deux ou trois dernières décennies, le développement de travaux visant non seulement à réduire les effets néfastes à court terme, mais aussi à évaluer les effets à long terme des pratiques agricoles sur le milieu. Comme d'autres disciplines (la science du sol par exemple) et en interaction avec elles, l'agronomie s'est ainsi préoccupée de pas de temps longs. Ces travaux, qui combinent souvent expérimentation à long terme et modélisation, concernent au premier chef les éléments du système cultivé qui conservent une certaine « mémoire », autrement dit ceux pour lesquels les cycles d'évolution concernent des pas de temps supérieurs aux pas de temps coutumiers de l'agriculture, l'année culturale ou la rotation. Ainsi, au centre de nombreuses études se trouvent les matières organiques des sols, dont l'évolution contribue en particulier aux flux de carbone et d'azote dans la biosphère, et dont on cherche à comprendre le devenir sous l'effet de différentes pratiques comme, par exemple, le type d'utilisation du sol⁵. L'évolution des composantes hydrique (par exemple Huang *et al.*, 2003) et minérale (Withers *et al.*, 2001, sur le phosphore) fait également l'objet d'analyses. Enfin, de manière plus récente, l'effet des systèmes de culture sur les composantes biologiques du milieu⁶ est également étudié. Dans certains travaux, plusieurs variables évoluant sous l'effet des pratiques sont analysées simultanément, comme par exemple par Tebrugge et During (1999), comparant les conséquences de différents types de travail du sol sur les évolutions des composantes physiques, chimiques et biologiques du milieu. Des investigations sont également menées au-delà de l'échelle de la parcelle (par exemple Jankauskas et Jankauskiene [2003] sur l'effet de la succession de cultures sur l'érosion). Ces éléments ne sont donnés ici que pour mémoire ; les connaissances qui en sont issues feront l'objet de développements ultérieurs dans les parties 3 et 4 de cet ouvrage.

L'artificialisation de la production a également eu pour conséquence une moindre attention aux phénomènes de régulation naturelle (résilience des milieux, régulation des populations), et à leurs conséquences sur la gestion temporelle des

5. Voir par exemple l'appréhension des effets de la jachère par Bosma *et al.* (1999), ou encore Abadin *et al.* (2002).

6. Par exemple Berkelmans *et al.*, 2003, sur les populations de nématodes, Swanton *et al.*, 1999 ou Bàrberi et Lo Cascio, 2000, sur la flore adventice.

parcelles cultivées. Ainsi, les effets d'une culture sur la ou les suivantes, qui constituaient historiquement le fondement des choix de successions de cultures à travers la notion de rotation (retour régulier du même motif de succession de cultures sur une parcelle⁷) et déterminaient une partie des choix de conduite des cultures, ont été assez négligés au cours des dernières décennies dans ces agricultures fortement artificialisées. Il n'en allait bien sûr pas de même dans les agricultures à faible niveau d'intrants, qu'il s'agisse des systèmes « non conventionnels » (en particulier l'agriculture biologique, voir Robson *et al.*, 2002) dans les pays industrialisés, ou des systèmes paysans des agricultures familiales des pays en voie de développement (voir par exemple l'analyse de Cochet [2001] sur des systèmes vivriers d'Afrique centrale). La diversification des « modèles » d'agriculture dans les pays industrialisés d'une part, l'attention accordée aux agricultures paysannes dont on souhaite accroître la productivité sans entraîner de conséquences négatives sur le plan environnemental et écologique d'autre part, ont amené les agronomes à donner une nouvelle impulsion aux travaux relatifs aux successions de cultures. Ces travaux ont pris deux directions complémentaires : celle d'une meilleure évaluation des effets d'une culture sur la ou les cultures suivantes et celle, beaucoup moins développée, de la mise au point simultanée de règles de gestion de plusieurs cultures qui se suivent sur une même parcelle.

Dans les deux cas, les travaux bénéficient de l'analyse des relations entre deux cultures qui se suivent, réalisée par Sebillotte (1980b, 1990a), qui a en particulier introduit la notion d'« effet précédent », développée dans l'encadré 1.5. Cette notion, qui place les états du milieu au centre de l'analyse, est directement engendrée par la vision du champ cultivé évoquée ci-dessus : si l'on veut comprendre les effets d'une culture sur la suivante, il faut comprendre les mécanismes d'évolution des composantes physiques, chimiques et biologiques du champ cultivé sous l'effet des techniques appliquées à une culture, et les conséquences pour la culture suivante. Bullock (1992) recense ainsi les états du milieu qui sont susceptibles d'être modifiés par des changements de successions de cultures. Cette vision des relations entre des cultures qui se suivent est de nature à permettre une meilleure prise en compte des régulations évoquées ci-dessus. Par ailleurs, parce que les modifications d'états du milieu ne sont pas liées uniquement à la nature de la culture précédente mais également à l'itinéraire technique qui lui a été appliqué, il est nécessaire de ne plus seulement s'intéresser à un effet moyen, mais à la gamme des effets qui sont liés à une gamme de pratiques (Doré, 2000). En fonction des techniques qui sont appliquées à cette culture, les transformations d'états seront différentes : le fait de labourer ou non pour préparer le semis va modifier la structure, les quantités d'éléments minéraux dans le sol en fin de culture vont dépendre du niveau de fertilisation, etc. Cette variabilité des effets de la culture précédente sur la culture suivante était encore jusque récemment peu considérée. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'affirmation de Karlen *et al.* (1994) : « Déterminer comment les facteurs associés à la succession des cultures interagissent et contribuent à l'« effet rotation », généralement non défini, continuera manifestement à constituer un défi majeur pour la recherche » reste encore largement valide ; une autre raison est liée

7. Bullock, 1992.

Encadré 1.5. La notion d'« effet précédent ».

La notion d'« effet précédent » est le produit d'une volonté de dépasser l'appréhension des effets d'une culture sur la suivante à travers des relations établies expérimentalement entre nature de la culture précédente et rendement de la culture suivante (par exemple Peterson *et al.*, 1990). Ces expérimentations donnent des résultats intéressants et permettent de réaliser des classements moyens des effets d'une culture sur le rendement de la suivante. Ceux-ci sont cependant difficilement extrapolables puisque limités à un milieu et à un type de pratique — ceux qui caractérisent l'expérimentation : on ne sait à quelles situations agricoles les résultats obtenus peuvent être étendus (Sebillotte, 1966), qui varient d'une situation expérimentale à l'autre (voir par exemple Porter *et al.*, 1997). Par ailleurs, l'interprétation des effets moyens d'une culture sur la suivante reste très délicate en l'absence de mesures des effets sur le milieu ; elle est aussi très réductrice car elle ne tient pas compte de la variabilité de ces effets, souvent importante (Doré, 2000). Le rendement de la culture suivante n'est ainsi pas le produit immédiat de la présence du précédent cultural : il n'y a pas plus de relation systématique entre précédent cultural et rendement de la culture suivante que de relation entre technique et rendement (voir Sebillotte, 1982, et un exemple récent dans Wilhelm et Wortmann, 2004). Pour comprendre les relations entre deux cultures qui se suivent, Manichon et Sebillotte (1973), puis Sebillotte (1980, 1990a) ont proposé de considérer le rendement de la culture suivante comme l'interaction de deux phénomènes :

- l'effet du précédent cultural sur le milieu cultivé (l'« effet précédent ») ;
- l'élaboration du rendement de la culture suivante en fonction des états du milieu laissés par le précédent cultural, de l'itinéraire technique appliqué et du climat (la « sensibilité du suivant »).

Les travaux portant sur une meilleure compréhension des effets précédent se sont multipliés ; ils visent à identifier les mécanismes d'évolution du milieu résultant de la présence de la culture précédente et de sa conduite^a, ce qui constitue une amélioration importante de l'approche par rapport à une analyse réduite à un effet du précédent cultural sur le rendement de la culture suivante. Les travaux sont menés soit par catégorie d'espèces — les travaux sur les effets précédent des légumineuses sont par exemple très nombreux —, soit par composante du milieu, par exemple la dynamique de l'azote. De plus en plus, cette analyse des effets précédent inclut des effets non intentionnels qui se répercutent sur l'environnement et non sur le fonctionnement de la culture suivante (par exemple Jensen et Haugaard-Nielsen, 2003, sur les conséquences de la fixation d'azote atmosphérique par les légumineuses).

a. Voir par exemple Evans *et al.*, 2001 sur l'effet des légumineuses en zone tempérée, ou encore Robson *et al.*, 2002, sur la diversification des successions de culture en agriculture biologique tempérée.

à la récente prise de conscience de l'importance des phénomènes biologiques ou physico-chimiques organiques entrant dans les interactions entre deux cultures qui se suivent (Ryszkowski *et al.*, 1998 ; Anaya, 1999)... et de la difficulté à les étudier (Blum *et al.*, 1999).

En ce qui concerne la gestion de successions de cultures, c'est-à-dire le raisonnement technique portant sur des pas de temps supérieurs à l'année culturale et qui comporte à la fois le choix des successions de cultures et le choix des itinéraires techniques successifs pratiqués sur ces cultures, les travaux sont encore assez peu

développés. Jusqu'à présent, les études menées sur les successions de cultures ont souvent implicitement fait une triple hypothèse :

- les successions de cultures menées par les agriculteurs sont stables dans le temps ;
- le raisonnement pour une succession de cultures sur une parcelle peut être mené indépendamment du raisonnement sur les autres parcelles ;
- les agriculteurs gèrent leurs cultures successives sur une parcelle assez indépendamment les unes des autres.

Ces hypothèses permettent ainsi d'utiliser assez facilement des modèles pour faire des simulations des effets de systèmes de culture à long terme (Plentinger et Penning de Vries, 1996 ; Keating *et al.*, 2002), puisqu'elles en épousent les intérêts et les limites. Or, on sait que les deux premières hypothèses sont assez simplificatrices par rapport à la gestion réelle des successions de cultures par les agriculteurs (voir chapitre 2 et Connor, 2001), et que la troisième doit être dépassée pour tenir compte de la réalité des effets précédent (cf. *supra*). Quelques travaux visant à évaluer différents systèmes de culture, sur différents aspects (économie, environnement, temps de travail...) commencent cependant à apparaître (Debaeke et Nolot, 2003). Des travaux complémentaires (comme ceux de Bellon *et al.*, 2001, en verger) sur les logiques d'action des agriculteurs à l'échelle pluriannuelle sont donc nécessaires, qui devraient s'articuler avec les résultats produits sur les effets précédent et à long terme des systèmes de culture, en cours d'acquisition, pour permettre de bâtir de véritables outils de gestion des systèmes de culture, comme il en existe à l'échelle de l'itinéraire technique.

Comme évoqué en introduction de cet ouvrage, sur le plan spatial, les échelles auxquelles s'intéresse l'agronomie ont également beaucoup évolué au cours des dernières décennies. La question des échelles spatiales englobantes par rapport à la parcelle fait l'objet du chapitre 10. Nous ne ferons donc ici que mentionner les phénomènes affectés par les actions de l'homme qui nécessitent une telle approche. Ces phénomènes sont d'abord ceux qui impliquent des flux physiques entre parcelles. Les flux d'eau sont particulièrement importants à considérer, non seulement du point de vue de la répartition de la ressource (surtout quand celle-ci devient limitante, même si ce n'est qu'à certaines périodes de l'année [Leenhardt *et al.*, 2004a]), mais aussi parce que la capacité de l'eau à être chargée en éléments minéraux (nitrates), en molécules organiques (résidus de pesticides) et en matières en suspension (particules terreuses) — qui se déplacent donc d'une parcelle à l'autre — nécessite de considérer des ensembles de parcelles et non des parcelles isolées pour résoudre les questions environnementales posées par ces éléments en suspension (voir par exemple Martin et Meynard, 1997). Des transferts de parcelles à parcelles s'effectuent également par voie aérienne, ce qui justifie de s'intéresser aux interactions entre parcelles du fait de la disposition de celles-ci dans le paysage (Colbach *et al.*, 2001) ou des interactions entre les techniques mises en œuvre sur des parcelles voisines, pour les questions impliquant les flux de graines de mauvaises herbes ou les flux de pollen. Enfin, comme le soulignent par exemple Altieri (1999), Baudry et Papy (2001) ou plusieurs auteurs dans l'ouvrage de Rickerl et Francis (2004), les effets — positifs ou négatifs — des pratiques agricoles sur la biodiversité, et en particulier sur la biodiversité animale (mais en lien très fort avec la biodiversité végétale, voir le rôle des adventices dans Marshall *et al.*, 2003), ne peuvent être

Encadré 1.6. Un exemple du développement de la gestion des hétérogénéités spatiales : l'agriculture de précision.

L'agriculture de précision est apparue dans les années 1990 aux États-Unis puis a été diffusée en Europe. Elle consiste à moduler les actions agricoles au sein même d'une parcelle en tenant compte de ses hétérogénéités de sol, d'état de la culture... Cette modulation impose :

- de quantifier l'hétérogénéité intraparcellaire, c'est-à-dire de préciser, pour chaque point ou maille élémentaire du champ, les valeurs prises par des variables agronomiques — richesse du sol en éléments minéraux, profondeur du sol, présence de mauvaises herbes... — ayant un effet sur le raisonnement des techniques ;
- d'enregistrer ces données de manière fiable sous forme de cartes géoréférencées ;
- de disposer d'un outil pouvant moduler ses actions, comme l'application d'une dose de semences ou d'un produit phytosanitaire, en fonction de sa position géographique et des variables agronomiques relatives à cet endroit ;
- de connaître, à tout instant, la position de la machine dans le champ (cette étape n'est pas nécessaire si des capteurs peuvent transmettre instantanément des valeurs des variables auxquelles la machine est capable de répondre immédiatement) ;
- d'utiliser ces données pour prendre des décisions modulées.

C'est le développement concomitant de la miniaturisation des moyens informatiques — permettant d'en équiper les tracteurs et les machines — d'une part, et des systèmes de positionnement géographique utilisant des données satellitaires d'autre part, qui a permis l'essor de l'agriculture de précision. Néanmoins, le développement de celle-ci est lent du fait des difficultés rencontrées pour la mise au point des capteurs permettant l'enregistrement simple et automatisé de variables agronomiques, et des machines permettant la modulation effective des techniques qui n'est que progressive, et du fait de la nécessité de repenser les raisonnements agronomiques en fonction des nouveaux outils, l'agriculture de précision engendrant donc des travaux d'agronomie spécifiques^a. Ainsi la variable agronomique spatialisée dont disposent le plus facilement et, jusque récemment, souvent exclusivement les agriculteurs reste-t-elle le niveau de rendement obtenu, qui constitue une information difficile à valoriser si elle n'est pas accompagnée d'autres renseignements plus analytiques (voir Jiang et Thelen, 2004) ; un autre outil qui tend à se développer est la caractérisation des différences intraparcellaires de type de sol sur la base de mesures de résistivité électrique. Les capteurs peuvent toutefois être complétés par des données enregistrées manuellement par l'agriculteur et, à terme, par des observations satellitaires fournissant des informations sur l'état du champ ou de la culture. Enfin, lorsque les capteurs et les machines sont disponibles, le diagnostic permettant de relier la production aux caractéristiques de la parcelle reste un point faible, ces approches ayant été peu développées. Par ailleurs, les règles agronomiques qui doivent présider à l'utilisation des informations pour adapter les techniques ne sont pas toujours établies. En effet ces règles, par exemple le raisonnement d'une dose d'engrais à apporter, ont été établies à partir d'un raisonnement valable pour une grande surface, mais pas forcément transposable à une échelle différente. La plus grande finesse que permet la modulation spatiale des pratiques agricoles dans la gestion des conséquences environnementales de la production (Pierce et Nowak, 1999) pourrait constituer, à l'avenir, un moteur pour le développement de l'agriculture de précision, au-delà des effets des politiques agricoles sur la rentabilité des équipements.

a. Voir Bouma *et al.*, 1997 ; Boone *et al.*, 1997 ; Lake *et al.*, 1997, la revue *Precision Agriculture*, ainsi que les comptes-rendus des *International Conferences on Precision Agriculture*.

correctement compris que si on dépasse l'échelle de la parcelle pour tenir compte d'une part des mouvements de populations entre parcelles, et d'autre part des structures paysagères non productives (haies et bordures en particulier, voir Marshall et Moonen, 2002, et chapitre 10) et de l'agencement des cultures dans l'espace.

Faisant pendant en quelque sorte à ces approches « multiparcellaires » (qui englobent également des éléments autres que les parcelles comme les bordures de champ ou les haies), l'agronomie s'intéresse également à la prise en compte de l'hétérogénéité intraparcellaire dans le raisonnement des techniques. On considère souvent et trop hâtivement que la parcelle est l'échelle unique à laquelle le raisonnement des techniques est tenu. Or on sait que les techniques ont des effets hétérogènes sur le milieu ou sur le peuplement végétal d'une parcelle, ne serait-ce que parce qu'elles ne peuvent être uniformément appliquées (hétérogénéité d'épandage de substances phytosanitaires par exemple) ; que le milieu en lui-même est hétérogène du point de vue de ses composantes permanentes ; qu'il existe des variations d'état qui se produisent de manière hétérogène en dehors des applications des techniques (diffusion des maladies en foyer, hétérogénéité de comportement des sols sous l'effet du climat par exemple). Cette hétérogénéité intraparcellaire peut avoir des conséquences négatives sur la production et l'impact environnemental de l'activité agricole (de Tourdonnet *et al.*, 2001). Dans certaines agricultures, ces variations à l'intérieur de la parcelle sont exploitées par les agriculteurs, en particulier lorsque les activités sont majoritairement manuelles (Mathieu, 2005). Chaque technique appliquée demande alors une durée importante pour être réalisée sur toute la parcelle, et l'agriculteur valorise les différences intraparcellaires de milieu de manière à choisir, pour chaque zone de la parcelle, la date d'intervention la plus opportune. Dans d'autres situations, il s'agit de créer cette variabilité, de manière structurée, afin de tirer parti des synergies qu'elle produit : c'est le cas dans les systèmes d'agroforesterie, dans lesquels on cherche à faire bénéficier les cultures d'effets induits par la présence des arbres (Schroth et Sinclair, 2003). Enfin, dans les agricultures artificialisées se sont développés des travaux de recherche et, parallèlement, des pratiques agricoles donnant naissance à l'« agriculture de précision », évoquée dans l'encadré 1.6.

Chapitre 2

Systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole

Christine AUBRY, Isabelle MICHEL-DOUNIAS

L'agronome dispose, comme exposé précédemment, de concepts et d'outils pour raisonner, concevoir et évaluer des itinéraires techniques et des systèmes de culture (voir aussi chapitre 3). On a par ailleurs préalablement signalé la nécessité de prendre en compte les logiques d'action des agriculteurs pour, entre autres, éviter d'interpréter de façon uniforme la diversité des situations rencontrées au champ. Nous analyserons ici ces logiques d'action des agriculteurs pour la constitution et la mise en œuvre des systèmes de culture dans l'exploitation agricole. Ces logiques vont au-delà de la prise en compte du fonctionnement du champ cultivé : l'agriculteur intègre en effet différents niveaux de décision. Son cadre d'objectifs et de contraintes est pour partie endogène, mais aussi exogène à l'exploitation. On conçoit ainsi que les systèmes de culture que l'agronome peut identifier dans les exploitations sont divers et résultent de processus de décision complexes, et que la mise en œuvre de propositions techniques innovantes ne va pas de soi. On conçoit également que l'agronomie considère comme une nécessité de prendre en compte ces processus et donc d'être capable de les formaliser, si elle veut avoir une chance de succès dans son orientation de discipline tournée vers l'action.

Ces constats de diversité des pratiques agricoles et de variabilité dans l'adoption d'innovations techniques ont été à l'origine, dans les années 1970, de courants de recherche portant sur l'analyse des pratiques agricoles, courants particulièrement forts en France (Osty, 1978 ; Milleville, 1987 ; Landais et Deffontaines, 1990) mais existant aussi à l'étranger (Ruthenberg, 1971 ; Fresco *et al.*, 1994). La représentation de la diversité de ces pratiques, reliée à celle des exploitations agricoles, a été l'une des préoccupations majeures de cette époque, aboutissant notamment aux typologies de systèmes de production construites par des agronomes (Capillon, 1993). Cependant, pour mieux comprendre cette diversité des pratiques agricoles, analyser les sources de variabilité et mieux guider la conception de systèmes de culture, les agronomes ont ressenti le besoin de passer de descriptions, fussent-elles organisées, de pratiques déjà réalisées, à la compréhension des processus de

décision qui en sont à l'origine : les « moteurs des pratiques » (Papy, 1994). En effet, l'analyse des pratiques permet de mettre en évidence « certaines des contraintes auxquelles l'agriculteur a été confronté », mais elle reste insuffisante si l'on veut dégager « l'ensemble des solutions qui s'offrent à lui à chaque instant et déterminer ce qui l'amène à en privilégier certaines plutôt que d'autres » (Sebillotte et Soler, 1990).

Un courant de modélisation conceptuelle, antérieur ou parallèle au développement d'outils informatisés d'aide à la décision technique, a alors vu le jour : axé sur la représentation du « management technique » par les agriculteurs, ce courant est encore peu fréquenté par la recherche agronomique internationale, même si certains constats d'échec de développement agricole font évoluer aujourd'hui la situation (*encadré 1.7*) ; c'est pourquoi concepts, modèles et exemples ci-dessous sont pour l'essentiel issus de travaux français. Ces derniers ont une origine interdisciplinaire : cette représentation par l'agronome de l'agriculteur comme décideur a nécessité un approfondissement conceptuel, passant par des emprunts à d'autres disciplines. Nous présenterons ici quelques-uns des concepts clés issus de ces emprunts et illustrerons les acquis actuels et les questions qui se posent aujourd'hui dans ce domaine de l'agronomie.

► Cadre conceptuel de représentation des décisions dans l'exploitation agricole

Des niveaux de décision hiérarchisés dans l'exploitation

Dans l'exploitation agricole, l'agriculteur doit prendre des décisions à plusieurs niveaux, mettant en jeu différents pas de temps. On peut notamment distinguer :

- les décisions d'orientation stratégique de l'exploitation (durée de vie de l'exploitation, place dans le revenu et les activités familiales, structure de l'appareil de production — équipement, main-d'œuvre... —, choix des productions, des relations au marché, etc.), qui concernent le temps long (plusieurs années) et dépendent surtout de déterminants économiques et sociaux, même si des considérations agromonomiques sont présentes (choix de productions tenant compte des terrains, du climat, etc.) ;
- les décisions d'organisation des processus productifs dans l'exploitation, dont la constitution des systèmes de culture, par lesquelles l'agriculteur mobilise et combine les ressources productives de l'exploitation, dont la nature et le niveau dépendent des décisions d'amont ; elles concernent l'horizon annuel, voire pluri-annuel (succession de cultures) ;
- les décisions de mise en œuvre des processus productifs, l'horizon de temps étant infra-annuel (la journée ou une échelle très proche — portion de journée, quelques jours).

Trois éléments importants sont à souligner. Tout d'abord, dans l'exploitation agricole, bien qu'en interaction, ces niveaux de décisions sont relativement hiérarchisés : l'agriculteur ne remet pas en permanence en cause les décisions stratégiques quand

Encadré 1.7. La modélisation par l'agronome des décisions techniques de l'agriculteur : quels travaux à l'échelle internationale ?

Contrairement à la recherche dans le domaine industriel, la recherche agronomique internationale s'est fort peu préoccupée de représenter les façons dont les agriculteurs gèrent techniquement leurs productions et leurs ressources productives. Ceci peut être mis en relation avec plusieurs facteurs. Le faible intérêt porté aux pratiques agricoles et à la gestion technique dans l'exploitation comme objets de recherche est manifeste. Préfaçant un numéro spécial de la revue *Agricultural Systems* consacré aux exploitations mixtes d'agriculture et d'élevage, un agronome anglais regrette « la rareté des informations issues d'études en conditions agricoles [...], le manque de données venant de la recherche menée dans les exploitations » (Thomas, 2002). Des investigations bibliographiques réalisées sur d'autres thèmes comme celui de la gestion des matières organiques issues d'élevage confirment l'existence d'une grande diversité d'études de cas de par le monde, source de données factuelles intéressantes en elles-mêmes, mais où l'intérêt des agronomes est plus porté vers la qualité des matières organiques et leur intérêt potentiel en tant que sources d'éléments minéraux pour les cultures que sur leur gestion technique par l'agriculteur^a. Dans le domaine des cultures, la situation est très voisine et d'autant plus intrigante que depuis les années 1980, en parallèle au fort courant de modélisation du fonctionnement des cultures (*crop models*, voir partie 2), la construction d'outils d'aide à la décision (DSS, *decision support systems*) a été un volet très actif de la recherche agronomique internationale. L'école agronomique hollandaise, très productive en la matière, réalise des progrès considérables sur la représentation écophysologique et agronomique des phénomènes dans les *crop models* et montre leur rôle heuristique majeur. Mais l'objectif initial d'aider à la décision des agriculteurs *via* des DSS incluant ces modèles est loin d'être atteint : « les applications dans ce domaine, malgré des décennies d'expérience dans la modélisation agroécologique, en sont toujours à leurs débuts » (Van Ittersum *et al.*, 2003), ou « un point plus difficile reste cependant le fossé qui existe entre la production de modèles de culture et leur utilisation dans des outils d'aide à la décision à l'échelle de l'exploitation agricole » (Jones *et al.*, 2003), ou encore « la simulation grâce à des modèles est encore balbutiante dans le domaine de la gestion des systèmes agricoles » (Cros *et al.*, 2004). Au moins deux raisons peuvent être avancées pour expliquer cela :

- l'orientation majeure, pendant longtemps, des DSS vers la recherche d'une combinaison optimale de techniques pour atteindre un ou plusieurs objectifs, indépendamment de la mise en œuvre dans l'exploitation ;
- l'utilisation très fréquente des études de cas pour obtenir des relations statistiques entre actions techniques et résultats sur la production, sans s'intéresser à l'accomplissement même de ces actions techniques (Girard et Hubert, 1999).

En bref, on constate une faible intégration de la modélisation du management technique par l'agriculteur dans ces DSS. Le plus souvent, les opérations techniques sont réduites à la simple expression d'une date et d'une dose dans les données d'entrées des modèles. L'existence d'un module de management est rare mais commence à être intégrée dans certains DSS s'intéressant à la gestion technique dans l'exploitation. Améliorer l'utilisation des DSS par les agriculteurs en s'approchant mieux de leurs modes réels de management technique est présenté aujourd'hui comme l'un des défis majeurs que la recherche agronomique doit relever (Mc Cown, 2002a). Encore faut-il connaître et représenter ces modes de management « réels » : les éléments que nous donnons dans ce texte, issus de fait de la recherche agronomique en France, ont précisément cette ambition.

a. Voir par exemple Smith *et al.*, 2000b ; Morse Meyer *et al.*, 1997 ; Harris et Yusuf, 2001 ; Thorne et Tanner, 2002.

il conduit au jour le jour ses cultures, il agit dans le cadre de ces décisions prises en amont (Soler, 1990). Cependant, cette conduite au jour le jour des productions ou, plus souvent, l'organisation des ressources productives, peuvent engendrer des problèmes remettant en cause un choix stratégique (par exemple, le niveau de matériel, de main-d'œuvre, une destination des productions, etc.). En deuxième lieu, toutes ces décisions sont prises dans un contexte d'incertitude (sur l'évolution des prix des produits par exemple) et d'aléas, dont l'aléa climatique ; plus le pas de temps mis en jeu par les décisions est important, plus l'incertitude est élevée. Enfin, les deux derniers niveaux sont ceux qui concernent le plus directement la constitution et la mise en œuvre des systèmes de culture dans l'exploitation, donc les objets que l'agronome étudie ; nous les regrouperons sous le vocable de « décisions techniques ». Dans ce qui suit, nous nous concentrerons sur ces décisions techniques en considérant comme fixe, à un moment donné, le cadre stratégique.

Des cadres conceptuels de représentation des décisions techniques

C'est au début des années 1980, par des emprunts aux théories de la décision, que les agronomes ont cherché à représenter les façons dont un agriculteur prend ses décisions techniques. La première formalisation proposée a été le « modèle de l'agriculteur pour l'action », ou « modèle d'action » (Cerf et Sebillotte, 1988 ; Sebillotte, 1990b ; Sebillotte et Soler, 1990). Il s'agit d'un cadre de représentation des décisions techniques qui ont un caractère cyclique, annuel ou infra-annuel, comme la conduite des cultures annuelles ou la mobilisation de la ressource en travail dans l'exploitation pendant la campagne agricole. Il comporte :

- un ou plusieurs objectifs généraux qui définissent le terme vers lequel convergent les décisions de l'agriculteur ;
- un programme prévisionnel et des états-objectifs intermédiaires qui définissent des points de passage obligés et des moments où l'agriculteur pourra établir des bilans pour mesurer où il en est de la réalisation de ses objectifs généraux (se trouvent ainsi fixés des indicateurs qui serviront aux décisions) ;
- un corps de règles de décision qui, en vertu d'un champ d'événements perçus comme possibles par l'agriculteur, définit pour chaque étape du programme la nature des décisions à prendre pour parvenir au déroulement souhaité des opérations et la nature des solutions de rechange à mettre en œuvre si, à certains moments, ce déroulement souhaité n'est pas réalisable (Sebillotte et Soler, 1990 ; Duru *et al.*, 1988 ; Papy, 1994).

Les décisions à horizon de temps supérieur peuvent être représentées sous une forme voisine du modèle d'action, le degré de précision diminuant avec l'augmentation du pas de temps impliqué (Hémidy *et al.*, 1993).

Plusieurs disciplines peuvent être mobilisées pour rendre compte de ces décisions techniques. Certaines mettent l'accent sur les influences exogènes qui s'exercent sur l'agriculteur pour ses prises de décision, notamment des influences sociales et culturelles : l'anthropologie des pratiques révèle ainsi l'influence des « systèmes de pensée » des agriculteurs à travers la façon dont ils parlent de leurs pratiques (Mathieu, 2001 ; Darré *et al.*, 2004), et la psychosociologie analyse l'influence des

groupes constitués sur le fonctionnement décisionnel des individus. Mais c'est surtout à travers deux catégories de disciplines, l'ergonomie cognitive et les sciences de gestion, que le concept de modèle d'action a donné sa mesure.

L'ergonomie cognitive analyse les tâches et les savoirs mobilisés par les acteurs pour les réaliser : l'application à l'analyse des pratiques agricoles (Cerf, 1996) est d'un grand intérêt pour comprendre les étapes de la prise de décision technique et analyser les indicateurs que l'agriculteur utilise et les savoirs qu'il mobilise. Les travaux en cours portent essentiellement sur la co-conception entre agronomes, agriculteurs et ergonomes, d'indicateurs de conduite (Meynard *et al.*, 2002) et sur la question de la gestion de l'information dans l'exploitation (Mazé *et al.*, 2004a). Les sciences de gestion, qui ont pour objet la recherche d'une organisation efficace de la transformation des ressources productives en biens ou en services (Giard, 1988), se sont fortement développées dans le monde industriel. Elles proposent des cadres formalisés de représentation des décisions productives. On ne cherche pas là à analyser en détail le fonctionnement décisionnel de l'acteur, mais à en donner une représentation « partageable » entre différents intervenants pour analyser, concevoir, évaluer l'organisation et la conduite des ateliers de production. Cet objectif, parent de celui des agronomes concernant les systèmes de culture, en a fait un cadre particulièrement sollicité pour représenter les décisions techniques dans l'exploitation agricole. On a dès lors utilisé plusieurs notions issues de ces sciences de gestion. En premier lieu, les décisions techniques dans l'exploitation présentant un caractère récurrent et cyclique, elles peuvent, comme les décisions de conduite des ateliers de production industriels, être représentées sous la double forme d'une part de « planification des actions », c'est-à-dire de la conception anticipée de « plans d'action », et d'autre part de leur « pilotage », c'est-à-dire de la prise de décision en temps réel, dans le cadre du plan d'action prédéfini, mais pouvant donner lieu à des adaptations *in situ* (Besse et Bouquin, 1991). Par ailleurs, les règles de décision technique concernent de façon combinée des « règles de conception » des systèmes, où interviennent de façon privilégiée les relations de contraintes entre niveaux de décision ou entre processus productifs (Erschler et Thuriot, 1992) et les « règles d'ordonnancement », décrivant la suite logique des actions à mener pour conduire un processus productif (Esquirol et Lopez, 1999).

» Décisions et systèmes de culture dans l'exploitation agricole

Modèle conceptuel de gestion technique d'une sole de culture dans l'exploitation

Les investigations menées dans le domaine de la gestion des cultures ont amené les agronomes à accorder un rôle central à la sole comme unité pertinente de gestion technique. La sole est définie comme l'ensemble des parcelles portant une même culture au cours d'une même année culturale sur une exploitation. Lorsque cette sole est formée de nombreuses parcelles aux caractéristiques diversifiées (taille,

type de sol, aménagements, histoire culturelle) et/ou dispersées dans l'espace, on conçoit que la conception des conduites techniques par l'agriculteur ne puisse être la simple addition de raisonnements menés indépendamment sur chaque parcelle, et ce d'autant plus que les ressources de l'exploitation pour les opérations culturales (main-d'œuvre, équipement, etc.) doivent être partagées entre les parcelles de la sole, entre les cultures, voire avec d'autres activités.

L'étude approfondie d'un cas particulier (la gestion technique de la sole de blé d'hiver dans des exploitations de grande culture en Picardie, en France) a d'abord permis d'aboutir, à partir du concept de modèle d'action, à une représentation conceptuelle du raisonnement technique de l'agriculteur faisant émerger ses unités propres de gestion (Aubry, 1995, 2000 ; Aubry *et al.*, 1998a). On montre l'importance, dans le processus décisionnel de l'agriculteur, de la planification des opérations techniques structurant les modalités d'ajustement des prévisions en temps réel (pilotage). Les plans prévisionnels d'action pour la conduite d'une sole peuvent s'exprimer sous forme de variables décisionnelles et de règles de décision qui ont été catégorisées (figure 1.3). Pour chaque opération culturale, on constate que l'agriculteur détermine des positionnements temporels et des modalités possibles, et qu'il détermine des variables et des règles pour lier entre elles ces opérations.

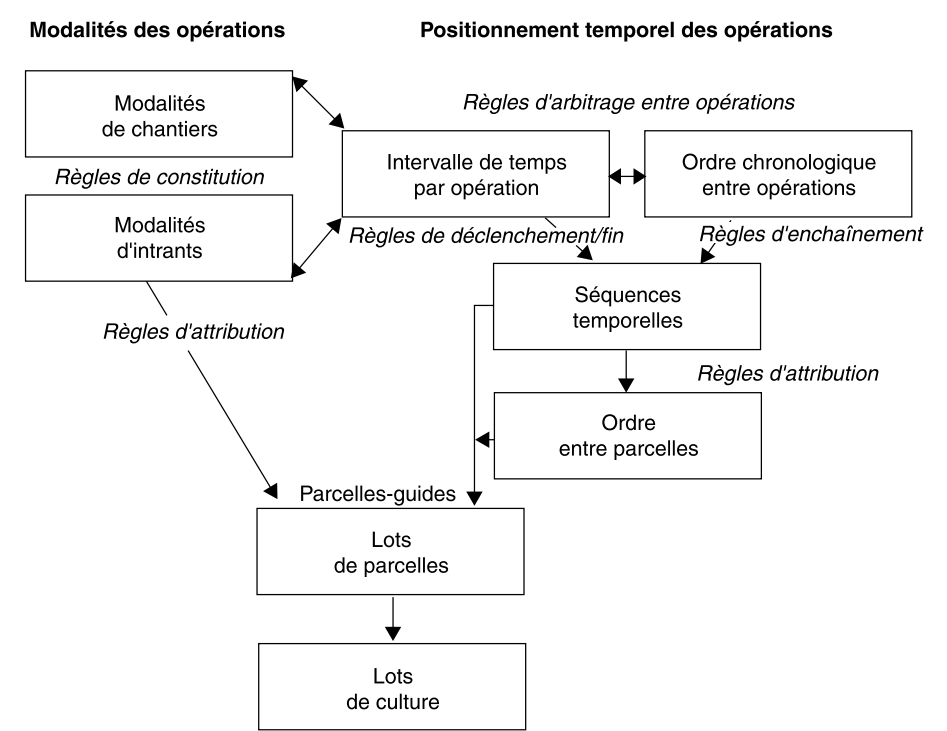


Figure 1.3. Variables décisionnelles et règles de décision pour la gestion technique d'une sole dans l'exploitation.

Décider du positionnement temporel d'une opération renvoie à un problème de découpage du temps entre opérations, et à un problème d'ordonnancement des opérations entre elles. Pour chacune, un intervalle de temps possible ou souhaitable est délimité par une date ou un événement de début et de fin de l'opération (par exemple « semis de blé du 1^{er} octobre au 10 novembre ») ; y sont associées des règles de déclenchement (de fin) qui déterminent le début (la fin) de l'opération sur la sole en fonction de l'atteinte d'une valeur-seuil par un indicateur spécifique (une date calendaire, un état physique ou biologique de certaines parcelles, etc.). Sur la durée du cycle, l'agriculteur détermine un ordre chronologique entre opérations, déterminé par des règles d'enchaînement du type « opération A avant opération B » : ces enchaînements sont décidés surtout à l'échelle de la sole, car il est fréquent qu'un agriculteur souhaite terminer une opération sur la sole avant d'en commencer une autre. Si des intervalles de temps pour des opérations culturales se recoupent et que les moyens en main-d'œuvre et en matériel ne permettent pas de les mener ensemble, il faut déterminer, *via* des règles d'arbitrage, des priorités entre opérations. Une opération peut alors être conçue en plusieurs séquences temporelles sur son intervalle de temps : un ordre de passage entre parcelles de la sole est alors prévu, avec des règles d'attribution des parcelles aux séquences (par exemple, consacrer la première séquence de semis de blé aux parcelles les plus argileuses, et la dernière aux plus sableuses). Ce découpage temporel conduit alors à découper la sole en plusieurs « sous-soles ».

Les modalités d'opérations concernent deux catégories de variables : les modalités de chantiers, soit la combinaison des matériels, des équipements et de la main-d'œuvre nécessaires à la réalisation de l'opération au champ et, pour certaines opérations, la nature et les doses d'intrants apportés (variétés, doses d'azote, produits phytosanitaires, etc.). Ces modalités sont régies par des règles de constitution (par exemple, appliquer la méthode du bilan prévisionnel de l'azote pour déterminer une dose) et des règles d'attribution des modalités aux parcelles, lorsque plusieurs modalités sont constituées pour une opération. Positionnement temporel et modalités ne sont pas indépendants : certains intrants doivent être apportés à des moments précis du cycle cultural pour être efficaces et, à l'inverse, des opérations effectuées à certaines dates du fait des arbitrages réalisés orientent fortement le choix des intrants ou de chantiers (des semis tardifs de blé, par exemple, impliquent certains chantiers d'implantation et certaines variétés). Par ailleurs, les décisions de positionnement et de modalités des opérations reflètent pour l'agriculteur des objectifs sur la culture (ou sur d'autres cultures qu'il juge prioritaires), des perceptions de risques ou des contraintes particulières.

Pour gérer la sole dans son ensemble, on constate que l'agriculteur constitue par opération des « lots de parcelles » redevables d'un même positionnement temporel et/ou d'une même modalité d'opération. Ces lots de parcelles sont constitués sur des critères simples d'accès (un type de sol, une localisation géographique, un même précédent, un groupe de variétés, etc.). On a très généralement, pour une opération, un petit nombre de lots : l'agriculteur simplifie donc la gestion de la sole par rapport à une conduite individualisée par parcelle. Ainsi, c'est le lot, plus que la parcelle, qui est l'objet pertinent de gestion technique pour l'agriculteur. La parcelle n'est cependant pas totalement occultée dans la gestion technique car, pour

certaines opérations, l'agriculteur distingue dans sa sole une ou des « parcelles-guides » sur lesquelles il se fonde pour constituer une modalité ou décider d'un déclenchement d'opération sur la sole : c'est le cas notamment pour les opérations qui nécessitent le recueil d'observations ou de mesures *in situ* (reliquats d'azote du sol, seuils d'infestations parasitaires, états hydriques, etc.). L'observation sur la parcelle-guide entraîne une décision extrapolée à un lot de parcelles, voire à la sole dans son ensemble. Au cours du cycle, une parcelle peut appartenir à différents lots, leur constitution variant entre opérations. Cependant, l'agriculteur dessine au sein de la sole un nombre limité de « lots de culture », c'est-à-dire d'ensembles de parcelles qui appartiennent aux mêmes lots de parcelles pour les opérations successives. Ils résultent d'un double mouvement :

- une logique diachronique de conduite des états du milieu et du peuplement au cours du temps, grâce aux règles d'enchaînement entre opérations ;
- une logique synchronique par opération, où l'objectif est de simplifier la conception et la réalisation de l'opération sur l'ensemble de la sole grâce à la constitution des lots de parcelles, et où se décide par les règles d'arbitrage la question du partage — au sein de la sole et entre soles — des ressources productives limitées de l'exploitation. Selon les parcelles et les exploitations, le poids relatif de ces deux logiques varie.

Lorsque l'on compare les réalisations techniques avec ces conceptions prévisionnelles, on constate que cette planification structure toujours fortement la réalisation des opérations : *ex ante*, l'agriculteur dispose de règles de faisabilité qui conditionnent notamment l'exécution des opérations prévues aux conditions climatiques et guident fortement le pilotage de la culture. Il a aussi souvent des solutions de rechange pour des situations qu'il sait pouvoir rencontrer du fait de son expérience personnelle. Il peut cependant se trouver face à une situation imprévue : on constate alors qu'il cherche une solution en tentant de bouleverser le moins possible le programme prévisionnel, notamment les principales règles d'enchaînement et d'arbitrage (au sein de la sole et surtout entre cultures). L'adaptation existe, mais la planification présente un caractère structurant, y compris pour la recherche de solutions d'urgence.

Conçue sur la sole de blé dans des exploitations d'une région française de grande culture, cette représentation conceptuelle de la gestion technique d'une sole a pu montrer son caractère extrapolable, avec des adaptations liées aux contextes, pour des cultures annuelles en agriculture manuelle (cotonnier au Cameroun, Dounias *et al.*, 2002 ; sorgho de décrue, Bousquet et Legros, 2002 et Mathieu, 2005), pour des cultures maraîchères dans des contextes variés (Navarrete *et al.*, 1999 ; N'Diénor, 2001) ainsi que pour la conduite d'un cycle annuel de production en arboriculture fruitière (Bellon *et al.*, 2001) et en viticulture (Luneau, 2004).

Gestion des ressources dans l'exploitation et constitution des systèmes de culture

Dans l'exploitation agricole, il y a le plus souvent plusieurs cultures à conduire, voire d'autres activités à mener, et les ressources productives (foncier, équipement, main-d'œuvre, trésorerie, eau d'irrigation, etc.) sont limitées. Il y a alors pour l'agriculteur

nécessité d'affecter ces ressources entre cultures et entre parcelles d'une sole, ce qui constitue un élément majeur de l'interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation (Papy, 2001b). Par les concepts précédemment exposés, on peut représenter la gestion de ressources productives mobilisées pour constituer et conduire les systèmes de culture. En reliant ces différentes décisions techniques dans le cadre de modèles intégrés, on peut alors représenter comment l'agriculteur constitue, au sein de son exploitation, des systèmes de culture comme résultant de processus décisionnels emboîtés (Aubry *et al.*, 1998b ; Papy, 2001b).

L'attribution de la ressource en terre

La nature des cultures étant choisie, l'agriculteur doit déterminer leur surface dans l'exploitation, leur localisation et leur succession au cours du temps, c'est-à-dire leur attribuer la ressource en terre. On montre en exploitations de grande culture (Maxime *et al.*, 1995 et 1997 ; Aubry *et al.*, 1998b) que cette attribution aboutit à la partition de l'espace cultivé en « blocs de culture ». Un bloc de culture est « un ensemble de parcelles de l'exploitation sur lesquelles est pratiquée une même rotation-cadre, c'est-à-dire un ensemble de successions de cultures très proches les unes des autres, car construites autour des mêmes cultures-pivots » (Maxime *et al.*, 1995). Ces rotations-cadres sont fondées sur les cultures prioritaires pour l'agriculteur, d'autres étant interchangeable dans la succession. La construction de ces blocs de culture suppose pour chaque culture de définir certaines variables et de les mettre en relation pour les différentes cultures de l'exploitation. Pour chaque culture, quatre variables décisionnelles principales et interdépendantes sont à déterminer :

- la zone cultivable (ZC) comprend les parcelles de l'exploitation que l'agriculteur considère comme favorables ou du moins « tolérables » pour la culture ;
- le délai de retour (DR) est fondé sur la notion de risques (surtout phytosanitaires) liés à la fréquence de retour de la culture sur la même parcelle ;
- les précédents possibles relèvent de la perception de risques ou d'avantages et conduisent l'agriculteur à se donner un ou des couples précédent/suivant acceptables (durée de l'interculture, valeur agronomique supposée — effet précédent selon l'agriculteur —, etc.) ;
- la taille de la sole est contrainte par ZC et DR, le rapport ZC/DR constituant la sole maximale de la culture. Mais la sole effective peut être aussi déterminée par d'autres considérations (possibilités de commercialisation, de stockage, etc.).

Les valeurs que prennent ces variables dans une exploitation dépendent, pour chaque culture, de la prise en compte d'une combinaison de déterminants internes et externes à l'exploitation. La mise en relation de ces variables pour toutes les cultures de l'exploitation permet de constituer des blocs de culture (*figure 1.4*), par un raisonnement itératif d'un ensemble de contraintes et l'établissement d'une hiérarchie entre les cultures pour l'attribution de la ressource en terre (Papy, 2001b). Ces hiérarchies prennent en compte la rentabilité économique de chaque culture dans l'exploitation, ainsi que l'importance des contraintes exogènes pesant sur chacune (mesures environnementales, engagements, contrats, cf. partie 4).

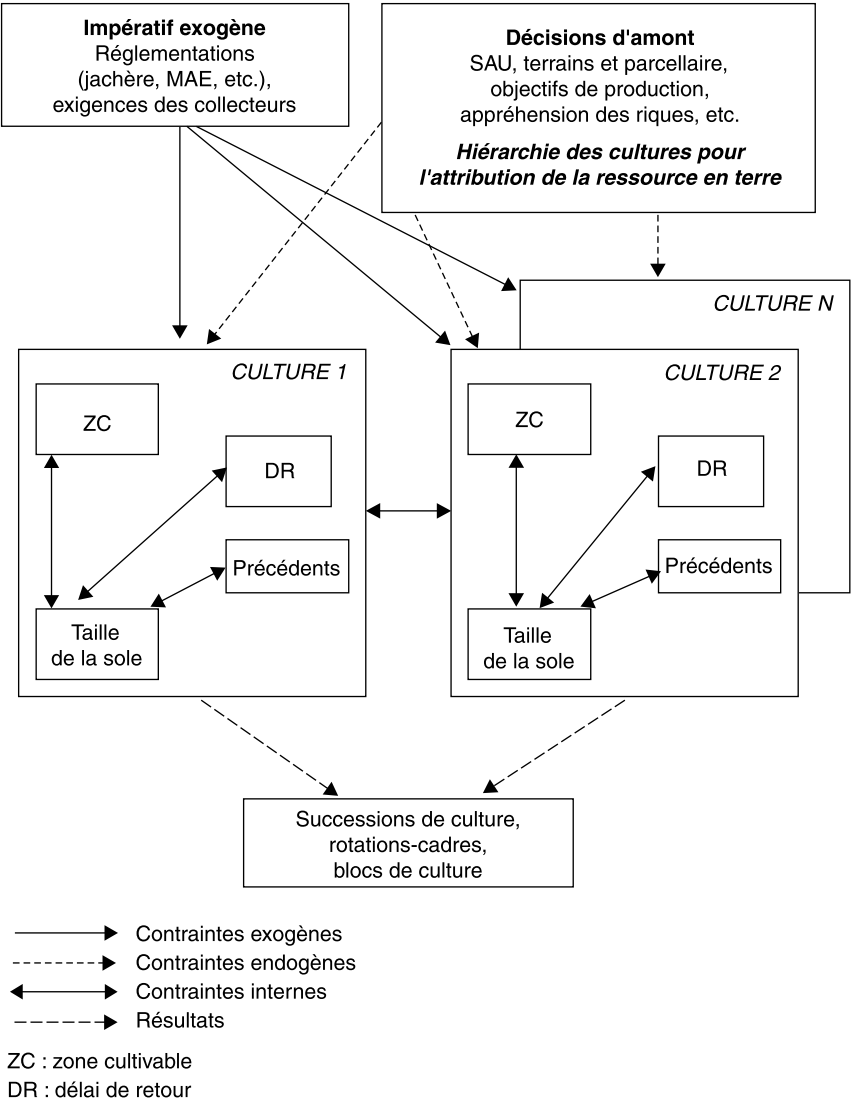


Figure 1.4. Constitution des blocs de culture dans l'exploitation (d'après Aubry *et al.*, 1998a).

L'organisation du travail

Parallèlement à la localisation des cultures et aux successions de cultures, la façon dont les ressources en main-d'œuvre et en équipement sont mobilisées dans une exploitation est déterminante pour réaliser les opérations techniques. On appelle « organisation du travail » la combinaison dans le temps de ces ressources et leur allocation entre les différentes cultures. Dans l'exploitation, l'organisation du travail peut être représentée par un modèle conceptuel identifiant, comme pour la gestion d'une sole, des variables et des règles de décision (Papy *et al.*, 1988). Trois niveaux hiérarchisés ont pu être discernés : les périodes, les enchaînements, les chantiers.

La notion de période renvoie au fait que des opérations culturales sur des cultures différentes peuvent être concomitantes sur l'exploitation : elles deviennent concurrentes si elles doivent utiliser tout ou partie des mêmes ressources en main-d'œuvre ou en matériel. On constate alors que l'agriculteur découpe le temps en intervalles caractérisés par une priorité donnée entre les opérations à réaliser, que l'on appelle période. Les périodes sont donc régies par des règles d'arbitrage entre cultures. Les enchaînements sont les successions des opérations culturales dans le temps, sur une culture ou entre cultures. Des règles d'enchaînement, mais aussi des règles de déclenchement et de fin des opérations, régissent la succession prévue des opérations dans le temps sur une période. Le chantier est la combinaison élémentaire des moyens en matériels et en main-d'œuvre nécessaires à la réalisation d'une opération ou d'une combinaison d'opérations. Lorsque l'agriculteur conçoit différents chantiers pour une même opération sur une culture, c'est souvent dans l'optique de rendre ce chantier compatible (donc simultané) avec un autre chantier concomitant. Le « pilotage » des opérations est assuré par des règles de faisabilité de même nature que celles existant pour la conduite d'une sole. Organisation du travail et conduite technique d'une culture (et taille d'une sole) sont toujours étroitement liées, et on rencontre fréquemment dans la conduite technique des remises en cause de l'organisation des ressources en main-d'œuvre et en équipement, voire des remises en cause de leur niveau même (Aubry et Chatelin, 1997) : l'organisation du travail est un nœud de fonctionnement de l'exploitation, à l'interface des décisions stratégiques et techniques (Chatelin *et al.*, 1993).

Eau d'irrigation

Du fait de contraintes réglementaires ou de sa limitation intrinsèque, l'eau d'irrigation est une ressource sur laquelle l'agriculteur doit fréquemment exercer une gestion au sein de l'exploitation : il s'agit de planifier l'assolement sur le périmètre irrigable, de prévoir la répartition des moyens d'arrosage entre espèces cultivées et dans le temps, puis de piloter la conduite de l'irrigation au cours de la campagne. Dans les années 1990, des modélisations conceptuelles de cette gestion de l'irrigation dans l'exploitation ont porté sur le choix de l'assolement sur le périmètre irrigable (Jacquin *et al.*, 1993) et sur l'organisation des chantiers d'irrigation (Leroy *et al.*, 1997). Elles aboutissent à représenter la planification et la conduite des chantiers d'irrigation sous forme de trois catégories de règles :

- des règles de conduite des irrigations par culture, pour décider des doses et des dates de déclenchement, de retour, d'arrêt des irrigations, mobilisant des indicateurs relatifs aux conditions climatiques, aux états du sol, aux stades physiologiques des cultures mais aussi aux niveaux réels ou supposés de la ressource en eau ;
- des règles de gestion des priorités entre cultures pour l'affectation de l'eau, qui découpent, comme pour l'organisation du travail, le temps en périodes ;
- des règles de gestion des ressources en temps de travail et en équipements d'irrigation au sein de chaque période.

Ces règles sont bien sûr interdépendantes et sont définies et appliquées au niveau de blocs d'irrigation, qui regroupent les positions d'irrigation gérées de façon homogène (ensembles de parcelles, accès au matériel d'arrosage, etc.).

D'autres ressources participant à la constitution ou à la conduite des systèmes de culture dans les exploitations ont été traitées dans ce même esprit de représentation modélisée des décisions techniques, et un volet important non détaillé ici concerne la gestion des troupeaux (Ingrand *et al.*, 1993), de leur affouragement (Coleno, 1999 ; Bellon *et al.*, 1999) ou de leurs effluents (Aubry *et al.*, 2002). La gestion du pâturage dans les exploitations est une application particulièrement difficile⁸ mais efficace de la notion de modèle d'action (Girard et Hubert, 1999 ; Cros *et al.*, 2004). Par ailleurs, d'autres types de ressources « immatérielles » (informations, savoir-faire, compétences) entrent aussi dans la constitution et la conduite des systèmes de culture dans l'exploitation, mettant en jeu des processus évolutifs d'apprentissage de l'agriculteur et l'influence du collectif, qu'il soit organisé (associations d'agriculteurs pour une gestion collective de ressources) ou non (influences des groupes sociaux sur les actes techniques individuels) : ce sont des questions vives en sciences sociales (Darré *et al.*, 2004).

Les représentations des décisions techniques proposées à partir du concept de modèle d'action ont porté initialement, et portent encore le plus souvent, sur l'échelle individuelle de l'exploitation agricole. Cependant, dans une région donnée et à un moment donné, on observe une grande variabilité des décisions entre agriculteurs, à travers des contenus de règles de décision très différents. Une partie de cette variabilité est liée à des facteurs exogènes à l'exploitation agricole, mais une autre provient de la diversité locale des exploitations agricoles situées dans un contexte relativement homogène d'un point de vue économique et physique. La compréhension et la caractérisation de cette diversité des modes de raisonnement technique sont indispensables à l'agronome pour pouvoir envisager d'accompagner le changement technique à une échelle régionale.

► Diversité des exploitations agricoles, des décisions et des systèmes de culture

L'analyse de la diversité des décisions techniques est un domaine encore relativement récent de l'agronomie. Les éléments développés dans ce qui suit sont issus d'une analyse des décisions de conduite de la sole cotonnière dans des exploitations agricoles du Nord camerounais (Dounias, 1998 ; Dounias *et al.*, 2002), complétée par d'autres travaux réalisés sur des objets et/ou dans des contextes différents : le bassin cotonnier ivoirien (Courtois, 2003), la riziculture camarguaise (Barbier et Mouret, 2000), la viticulture en Languedoc-Roussillon (Luneau, 2004), ou encore la gestion des effluents d'élevage dans l'île de la Réunion (Aubry *et al.*, 2002).

8. Car combinant la gestion temporelle de la pousse de l'herbe, variable au sein de la sole pâturée, son adéquation aux besoins variables du troupeau (et des lots d'animaux en son sein) et la gestion spatiale des affectations des parcelles de la sole pâturée aux lots d'animaux.

Diversité locale des situations d'exploitations agricoles

Dans le bassin cotonnier du Nord camerounais et en situation de faible artificialisation du milieu, les exploitations agricoles mobilisent fortement la famille pour des opérations manuelles lourdes telles que les sarclages et les semis, tout en utilisant des attelages pour le labour. Dans un contexte d'immigration, avec des modalités d'accès au foncier complexes et diversifiées, elles présentent des ressources productives contrastées, allant d'une faible main-d'œuvre familiale, sans attelage en propriété et avec peu de foncier, à une main-d'œuvre nombreuse et diversifiée mobilisant plusieurs unités d'attelage et travaillant de grandes superficies. Du fait des conditions de succession et d'installation des jeunes, elles mettent particulièrement en exergue les relations entre les ressources productives, leur dynamique de constitution au cours du temps et les décisions techniques. Ces exploitations mettent en œuvre des conduites techniques très diversifiées pour le cotonnier, se traduisant par des dates de semis et un contrôle de l'enherbement précoce contrastés, et ce pour une même année, souvent au sein d'une même exploitation. Ces pratiques sont déterminées par des règles de décision dont les contenus sont très diversifiés selon les agriculteurs.

Cependant, il est possible de comprendre et de cerner la diversité des décisions techniques. En particulier, l'analyse approfondie de la gestion technique de la sole cotonnière en début de cycle a montré le rôle primordial que joue sur la conduite du cotonnier l'organisation du travail au sein de ces exploitations. Plus largement, il est possible d'établir à l'échelle de l'exploitation agricole une cohérence entre les décisions techniques concernant une sole de culture, les ressources productives disponibles et ses modes de gestion, ainsi que les objectifs généraux poursuivis par l'agriculteur et sa famille. Dans les exploitations du Nord camerounais, la décision de réaliser ou non un labour attelé avant le semis du cotonnier illustre particulièrement bien cette cohérence (*encadré 1.8*).

En effet, dans le cadre du projet global de la famille, le chef d'exploitation définit les objectifs de production et planifie ses interventions et celles des autres actifs, à partir :

- des moyens en travail disponibles dans l'exploitation ou qu'il sait pouvoir mobiliser par ailleurs ;
- des alternatives qu'il sait possibles en cas de difficultés ;
- des connaissances qu'il a sur le fonctionnement des plantes ;
- de l'appréhension des situations climatiques qu'il peut rencontrer (très contrastées dans le nord du Cameroun).

Ce faisant, il fixe implicitement, en fonction de son expérience passée, des niveaux de risque qu'il juge acceptables pour les conditions et les facteurs limitants jouant sur le développement du cotonnier et des autres espèces cultivées. À un moment donné de l'histoire de l'exploitation, la combinaison entre les ressources productives mobilisables par l'agriculteur d'une part, et les décisions de gestion des ressources et de conduite technique des cultures d'autre part, va déterminer les différents itinéraires techniques réalisés selon les conditions de l'année, notamment selon les scénarios pluviométriques. Le niveau de risque pris par l'agriculteur et sa famille

Encadré 1.8. Un exemple de la cohérence entre situations d'exploitations agricoles et décisions techniques : les exploitations agricoles cotonnières du Nord camerounais.

Parmi les agriculteurs qui ne possèdent pas d'attelage — les plus nombreux —, certains décident de réaliser systématiquement un labour avant de semer le cotonnier, d'autres non. Ceux qui prévoient un labour bénéficient souvent d'une entraide familiale leur garantissant un accès rapide à l'équipement (jeunes qui s'installent à proximité d'un aîné équipé, ou agriculteurs âgés encore indépendants aidés par leurs fils). Ces types d'exploitations cultivent le plus souvent des superficies totales importantes si l'on considère la faible main-d'œuvre familiale présente dans l'exploitation ; le labour permet de limiter le temps consacré aux sarclages tout en retardant la mise en œuvre, ce qui correspond à une stratégie d'acquisition du foncier chez les plus jeunes, et de conservation de la terre chez les plus âgés après le départ des enfants. De plus, la réalisation d'un labour pour la sole cotonnière permet le semis en amont d'autres cultures jugées prioritaires comme le sorgho et l'arachide. Inversement, d'autres agriculteurs, plus isolés socialement, concentrent leurs efforts et ceux de leur famille sur des superficies totales plus réduites, avec des objectifs de rendement plus élevés pour le coton, planifiant un semis direct pour la plupart des cultures, dont le cotonnier. Malgré des règles d'arbitrage favorables aux chantiers de semis du cotonnier, ces agriculteurs prennent des risques importants par rapport à leurs objectifs car, selon les conditions pluviométriques de l'année, semer directement la totalité de la sole cotonnière peut s'avérer difficile sans emploi d'herbicides, ce qui les oblige à louer un attelage et à attendre qu'il soit disponible ; selon les années, on note une variabilité très forte des dates de semis du cotonnier, du très précoce au très tardif. Ajoutons que parmi les propriétaires d'attelage, on observe des cas de figure aussi contrastés, avec d'un côté des agriculteurs en stratégie de conquête foncière qui prévoient systématiquement des labours pour de grandes superficies cotonnières, avec des objectifs de rendement peu élevés ; de l'autre, des agriculteurs qui s'organisent de manière à assurer des semis et des sarclages à temps, quelles que soient les conditions de l'année, planifiant aussi bien du semis direct que du labour selon les caractéristiques des parcelles destinées au coton, travaillant celles-ci en priorité.

peut se mesurer par les écarts entre les pratiques et les objectifs, et ce sur plusieurs années (*figure 1.5*).

Par adaptation réciproque des moyens et des objectifs, il existe une cohérence entre des situations d'exploitations agricoles (projet, orientations stratégiques dont le choix des productions et le niveau des ressources productives), et les décisions techniques, ce qui n'exclut pas des comportements différents face au risque ; ce postulat de cohérence est également utilisé par les économistes (Brossier *et al.*, 1997). Ainsi, cerner à un instant t la diversité des exploitations à partir de la construction de typologies (cf. ci-dessous) permet de cerner la diversité des décisions techniques et des niveaux de risques pris, et donc celle des pratiques. Le postulat de cohérence n'empêche pas les possibilités d'améliorations. En effet, les décisions prises par les agriculteurs dépendent des perceptions qu'ils ont de leur situation, de leur niveau de formation, de leurs connaissances et de leurs savoir-faire. Les réalisations techniques et leurs effets vont d'ailleurs permettre en retour une évaluation des décisions et, lors des situations difficiles, provoquer des réajustements des décisions techniques, voire stratégiques (redimensionnement des ressources

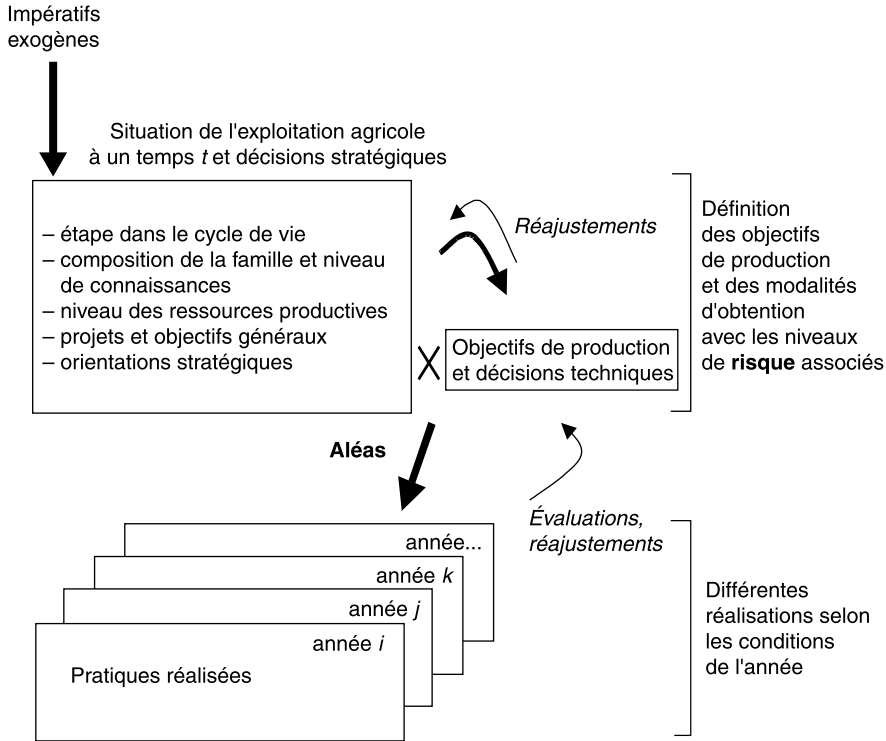


Figure 1.5. Liens entre situation d'exploitation agricole, décisions techniques, risques et pratiques réalisées.

productives, choix des productions, etc.). L'un des rôles du conseiller agricole est d'aider à cette évaluation. Cependant, avant d'aller plus loin dans le conseil, il est important d'appréhender le système de décisions des agriculteurs dans le temps, en cohérence aussi avec les évolutions de l'exploitation et de son contexte.

Cycle de vie, trajectoire d'exploitations et évolution des décisions

Les décisions techniques des agriculteurs évoluent progressivement, suivant les dynamiques d'apprentissage de l'agriculteur et de sa famille, intégrant des modifications du contexte, l'apparition de nouvelles techniques, etc. Mais les évolutions les plus importantes sont liées aux modifications stratégiques et structurelles que connaît toute exploitation agricole au cours de son existence. Or, les stratégies et les dynamiques de constitution des ressources productives dans l'exploitation agricole suivent une certaine logique dans le temps, en interaction avec les évolutions du contexte. Confrontés à la diversité des exploitations agricoles et de leurs pratiques, des agronomes ont déjà pris en compte ces dynamiques pour construire des typologies de systèmes de production, chaque type regroupant les exploitations agricoles sur la similarité de leurs orientations stratégiques et de leurs trajectoires d'évolution (Capillon, 1993). Les trajectoires sont ici principalement définies en fonction de

facteurs exogènes à l'exploitation, reflétant les capacités et les modalités d'adaptation des exploitations agricoles aux évolutions de leur contexte.

Certains économistes spécialistes de la gestion de l'exploitation agricole familiale ont plutôt orienté leur analyse sur les dynamiques d'évolution internes à l'exploitation agricole ; ils parlent de l'histoire d'une exploitation agricole, en se référant à une théorie du cycle de vie (Brossier *et al.*, 1997). Ils distinguent quatre phases selon le niveau de capitalisation (capital économique, capital culturel et capital social qui font l'objet d'accumulation et de transmission) : une phase d'installation — avec ou sans reprise à l'origine — avec comme objectif principal la construction de l'appareil de production, une phase de transition, une phase de croissance-stabilité, puis une phase soit de déclin jusqu'à la disparition, soit de reprise. La réalisation de ces différentes phases dépend évidemment des conditions du système économique global. L'évolution des exploitations agricoles du sud du bassin cotonnier camerounais cadre bien avec ce modèle de cycle de vie, qui nous permet de distinguer et de définir des types de systèmes de production, en insistant sur les modes et les dynamiques de constitution des ressources productives au cours du temps.

Ce qui intéresse particulièrement les agronomes est que ces types ainsi définis correspondent à certains types de décisions concernant la conduite technique cotonnière et l'organisation du travail, avec des objectifs et des prises de risque spécifiques. Par exemple, selon la trajectoire la plus classiquement observée, une exploitation peut successivement :

- à l'installation, avec peu de ressources en travail, mettre en place des systèmes de culture cotonniers extensifs, mobilisant fortement la traction animale *via* l'entraide ;
- par suite de l'agrandissement de la famille et de l'acquisition d'un attelage, connaître une période où la conduite cotonnière est plus intensive, avec des exigences de rendements plus fortes et des règles de conduite différentes, en général plus diversifiées ;
- se lancer dans une stratégie de conquête foncière de manière à anticiper l'installation des fils ;
- puis, après une phase de déclin qui s'accompagne souvent de la perte de l'attelage, renouer avec une situation proche de celle du départ.

Cette façon d'appréhender la diversité de situations des exploitations agricoles permet de mettre en évidence une certaine logique d'évolution dans le temps des systèmes de décisions et de pratiques, en lien avec les dynamiques internes d'évolution des exploitations. Les enquêtes montrent également que les décisions techniques ne sont pas remises en question brutalement : les nouveaux projets sont issus des anciens. En cas de changements structurels temporaires non prévus dans l'exploitation agricole (par exemple la perte accidentelle d'animaux d'attelage avant le démarrage de la campagne agricole), les décisions techniques ne sont que peu modifiées, seuls interviennent des ajustements en termes de superficie totale cultivée. Sur des pas de temps longs, il serait toutefois nécessaire d'analyser plus finement l'évolution des décisions techniques individuelles, en comparant aussi des exploitations réalisant leur cycle de vie dans des contextes différents. Les décisions concernant les cultures pérennes sont des objets de recherche particulièrement pertinents, la durée de vie du matériel végétal mettant en exergue d'une part les interactions entre décisions techniques et stratégiques, d'autre part l'évolution

progressive des objectifs de production et des systèmes de décisions techniques, et ce même dans un contexte socio-économique très changeant.

Par ailleurs, les agriculteurs ne sont pas des décideurs isolés. À tout moment, localement, les diverses exploitations agricoles, qui sont à des stades différents de leurs trajectoires d'évolution, interagissent entre elles : le contenu des échanges peut concerner des ressources matérielles comme l'équipement ou la main-d'œuvre, mais aussi des informations, des connaissances et des savoir-faire, accompagnés de normes sociales qui influencent le comportement technique des individus (Darré *et al.*, 2004).

► Quelles utilisations pour l'action de ces connaissances ?

Ces représentations conceptuelles des modes de décision des agriculteurs ont montré leur intérêt heuristique et la pertinence, pour la compréhension des décisions techniques, du modèle d'action. Outre cet intérêt heuristique, plusieurs catégories de répercussions pratiques pour l'agronome doivent être signalées.

Tout d'abord, l'identification de ces modalités de décisions techniques, au sein de l'exploitation comme à l'échelle régionale, permet à l'agronome de comprendre la diversité des pratiques et des états des champs cultivés : celle-ci renvoie fréquemment à la gestion des soles, à celle des ressources productives sur l'exploitation et à la diversité des types d'exploitations. Dans une démarche de diagnostic agronomique (cf. chapitre 3), une telle identification est importante pour bien analyser les causes de dysfonctionnement du champ cultivé, et distinguer pour l'action ce qui relève de la conduite des états du milieu à l'échelle de ce champ cultivé, de ce qui relève de niveaux d'amont.

C'est aussi dans le domaine de la conception de systèmes de culture que l'agronome peut mobiliser les concepts précédemment présentés. D'une part, la fixation d'objectifs et de contraintes peut intégrer des éléments issus de la connaissance des modes de décision technique et de leur diversité régionale : c'est ainsi que des contraintes d'organisation du travail à une époque donnée de l'année dans certains types d'exploitations peuvent amener à concevoir des itinéraires techniques supprimant ou déplaçant des interventions culturales (Meynard, 1985 ; Chatelin *et al.*, 2004). Soulignons qu'une difficulté consiste alors à « traduire » à l'échelle de la parcelle (unité de conception d'itinéraires techniques pour l'agronome) des contraintes par nature exprimées à des niveaux plus englobants dans l'exploitation. D'autre part, l'expérimentation de systèmes de culture conçus comme un jeu de règles de décision⁹ et non comme une suite fixe d'opérations culturales prédéterminées constitue pour les agronomes une réelle adaptation à la complexité de la prise de décision agricole (Nolot et Debaeke, 2003). Il reste que les indicateurs associés à cette forme de conception gagnent eux aussi à être réfléchis et proposés en fonction des modes d'accès à l'information des agriculteurs, notamment leur

9. Du type « si à t l'état de la parcelle est A, alors appliquer l'opération B au moment $t + x$, sinon appliquer l'opération B' au moment $t + x'$. »

recours fréquent à des parcelles-guides dans une sole : la simplicité d'accès, la robustesse et le caractère extrapolable sur une sole d'un indicateur sont ainsi des qualités à rechercher.

Les concepts précédents ont également pu déboucher sur une utilisation directe dans le conseil aux agriculteurs, souvent en associant à ces modèles conceptuels des modèles informatisés. En ce qui concerne l'irrigation par exemple, un logiciel (Irma, cf. Leroy *et al.*, 1997) simule les décisions d'irrigation sur les différents blocs et évalue leurs répercussions sur l'état hydrique du sol et la couverture des besoins en eau des cultures. Ce simulateur permet de s'interroger de façon itérative sur les relations entre les décisions d'amont (dimensionnement de la ressource en eau, du périmètre irrigable, des surfaces des cultures retenues) et les décisions techniques représentées dans le modèle d'action. De même, un logiciel de simulation de l'organisation du travail dans l'exploitation agricole, Otelio (Attonaty *et al.*, 1990b ; Chatelin et Mousset, 1997), permet d'analyser la robustesse d'une organisation donnée du travail face à la variabilité climatique, de tester de façon itérative d'autres formes d'organisation à ressources données constantes (réorganisation des arbitrages entre cultures, des enchaînements, des chantiers, des règles de faisabilité), voire de modifier le niveau des ressources (main-d'œuvre, équipement) et d'étudier en retour ses conséquences sur les conduites techniques des cultures. Une démarche de conseil en organisation du travail a été élaborée qui intègre la représentation conceptuelle et le logiciel Otelio : elle a été largement utilisée en France d'abord en Picardie (Chatelin *et al.*, 1994 ; Mousset, 1997) puis dans d'autres régions (Barbier et Mouret, 2000) et à l'étranger (Dounias *et al.*, 2002 ; Le Gal et Papy, 1998) ; des agriculteurs (souvent en groupe) et des conseillers réfléchissent par cette démarche aux conséquences de contraintes d'organisation du travail (dates seuils par exemple) sur les besoins en équipement ou en main-d'œuvre ou, plus souvent, aux conséquences sur l'organisation du travail de modifications de conduite technique (introduction d'herbicides par exemple), voire des niveaux des ressources : préparations d'agrandissements d'exploitations, départ de main-d'œuvre ou association entre exploitations par exemple.

Enfin, des démarches récentes, couplant analyse des décisions techniques d'agriculteurs et production de connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé, *via* la mise en place en milieu paysan d'un dispositif d'expérimentation de règles de décision, se sont avérées particulièrement pertinentes pour créer et accompagner le changement technique à des échelles plus collectives (Mathieu, 2005).

Les modes de décision technique de l'acteur-agriculteur, que nous avons ici analysés, montrent qu'il est difficile de « plaquer » sur un agriculteur un modèle agronomique de conduite des cultures, fût-il pertinent et performant vis-à-vis d'objectifs de production ou environnementaux : l'agriculteur ne raisonne pas sur la seule base de la conduite des états du milieu et du peuplement d'une parcelle vis-à-vis d'un ou de plusieurs objectifs, mais intègre d'autres échelles spatiales et temporelles où la parcelle est rarement une unité de gestion suffisante. Son raisonnement technique est très déterminé par la gestion transversale de ressources productives dans l'exploitation, l'obligeant sans cesse à des compromis.

Pour les agronomes qui travaillent à l'échelle de l'exploitation, il s'avère souvent source de progrès de passer de modèles « conceptuels » tels que ceux présentés ici

à des modélisations plus formelles des processus de décision technique : ces modèles informatisés peuvent alors permettre de simuler des règles et, couplés avec des modèles biotechniques, d'en évaluer les conséquences (agronomiques, environnementales, etc.). Nous avons signalé l'existence actuelle d'outils de simulation d'une conduite technique (Aubry *et al.*, 2004 ; Chatelin *et al.*, 2004) ou de la gestion d'une ressource, fondés totalement ou partiellement sur la représentation « conceptuelle » des règles de décision de l'agriculteur (notamment les logiciels Otelio pour l'organisation du travail, Irma pour l'irrigation ou encore Moderato pour l'irrigation du maïs [Bergez *et al.*, 2001]) ; dans le domaine de la gestion du pâturage, deux outils doivent être signalés : Keops (Girard et Hubert, 1999) et Sepatou (Cros *et al.*, 2004) ; et dans celui de la gestion des effluents d'élevage, l'outil Magma (Guerrin, 2001). Dans le domaine de la conduite technique des cultures, le simulateur DéciBlé (Chatelin *et al.*, 2004) intègre, à l'échelle de la parcelle, un modèle des décisions techniques de conduite du blé d'hiver couplé à un modèle biotechnique ; le logiciel Apsim en Australie (Keating *et al.*, 2003) intègre aussi un module de management à l'échelle parcellaire, formalisant des règles de décision et les évaluant. À notre connaissance, il est le seul dans ce domaine à avoir fait l'objet d'une co-construction avec des agriculteurs, *via* une opération lourde regroupant chercheurs, conseillers et agriculteurs, menée sur près de dix ans et intitulée « Farmscape » (Carberry *et al.*, 2002).

Pour la conduite des cultures, on ne sait cependant pas encore intégrer des règles de management à l'échelle de la sole. L'une des raisons est la grande complexité en termes informatiques de la représentation de ces modes de management technique : on est loin, on s'en doute, d'enchaînements d'équations, fussent-elles complexes, et on doit recourir à des langages évolués, fondés sur le langage objet ou les KBS (*knowledge based systems*). Par ailleurs, si l'on sait au mieux modéliser la gestion de certaines ressources ou la conduite de certains ateliers de production, leur intégration dans un modèle plus générique de l'exploitation agricole est encore en devenir. L'effort à fournir est donc encore important pour la recherche agronomique et rend indispensable d'une part une pluridisciplinarité active (agronomes, gestionnaires, modélisateurs), d'autre part une meilleure intégration des agriculteurs et des conseillers dans la construction même des représentations — préoccupation que l'on retrouve également dans le management technique dans l'industrie (Shobrys et White, 2000).

Un questionnement tout aussi stimulant pour l'agronomie est le passage de ces modélisations individuelles des décisions techniques à celle de décisions plus collectives ou des interactions entre agriculteurs (assolements à raisonner conjointement dans des bassins versants menacés par l'érosion par exemple) : comme on le verra dans la partie 4, les modélisations individuelles telles que celles présentées ici s'avèrent utiles pour l'analyse des décisions collectives ou des interactions, car elles permettent d'identifier les variables clés ou les règles de décision partagées entre agriculteurs. Cependant, elles sont insuffisantes et doivent être accompagnées de la modélisation, encore largement en cours, du fonctionnement même de ces niveaux agrégatifs en termes spatiaux (bassins versants par exemple) ou organisationnels (bassins d'approvisionnement par exemple).

Chapitre 3

Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture

Chantal LOYCE et Jacques WERY

Les objectifs de durabilité assignés à l'agriculture par la société, évoqués en introduction de cet ouvrage, rendent nécessaire une évaluation des systèmes de culture existants, afin de les positionner par rapport à ces objectifs et, le cas échéant, d'analyser les causes de leur échec. Cette étape de diagnostic constitue, quand elle est possible, un préalable indispensable à des propositions d'amélioration débouchant sur la conception de nouveaux systèmes de culture (*figure 1.6*). Dans cette perspective, les agronomes se sont progressivement dotés d'un ensemble d'outils où les connaissances acquises sur le fonctionnement du champ cultivé et le raisonnement des techniques (voir chapitre 1) sont mises à profit pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture (Meynard *et al.*, 2001). Nous présenterons successivement les approches de diagnostic agronomique qui ont été développées

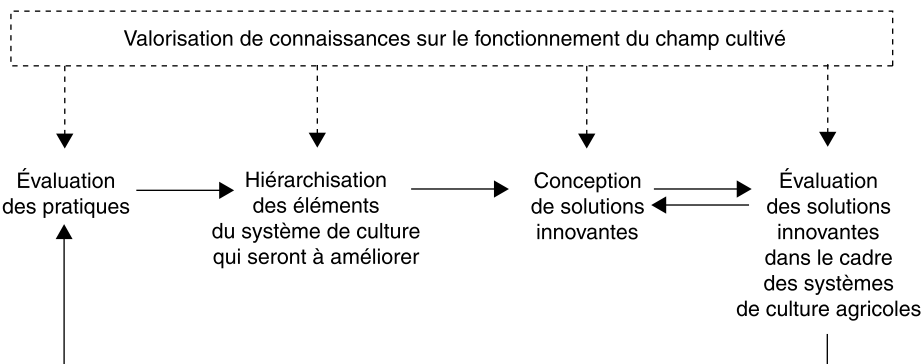


Figure 1.6. Démarche générale de mise au point et d'amélioration des systèmes de culture (d'après Meynard *et al.*, 2001).

pour évaluer les « performances » du champ cultivé, les critères mobilisés pour caractériser l'impact des pratiques agricoles sur la production et sur l'environnement, enfin les démarches de conception de systèmes de culture.

► L'évaluation des performances du champ cultivé

Objectifs et démarche

Par « diagnostic agronomique », on entend une évaluation du fonctionnement d'un champ cultivé, considéré comme la combinaison d'un système biophysique et d'un système technique, par rapport à une performance recherchée (par exemple le rendement, ou une combinaison d'objectifs de production et de préservation de l'environnement).

Ce diagnostic correspond en fait toujours à une étape préalable d'un programme plus global qui, selon les situations, vise à :

- hiérarchiser les facteurs sur lesquels un programme d'amélioration des systèmes de culture doit se focaliser¹⁰ ;
- élaborer un modèle conceptuel du fonctionnement du champ cultivé dans le cadre d'une approche participative avec des agriculteurs, en vue de guider le prototypage des itinéraires techniques d'une culture dans une région donnée¹¹ ;
- guider la conception et le paramétrage d'un modèle de culture représentatif du fonctionnement d'une culture donnée dans une région (Willoquet *et al.*, 2000 et 2002 sur riz en Asie du Sud-Est ; Affholder *et al.*, 2003 sur maïs au Brésil ; Celette *et al.*, 2005 sur vigne en France).

Il existe une grande diversité d'approches mobilisées pour évaluer les performances du champ cultivé : citons le recours à des analyses statistiques multivariées, qui portent généralement sur un nombre de parcelles assez élevé, le recours à un modèle conceptuel du fonctionnement du champ cultivé, qui guide le mode d'analyse des données et les informations pertinentes à recueillir au champ et le recours à un modèle quantitatif, qui permet le plus souvent de confronter les résultats obtenus au champ à des situations de référence (par exemple, hors facteurs limitants, pour estimer le rendement potentiel d'une parcelle). Bien que ces démarches soient souvent combinées, nous avons pris le parti de présenter autant que possible des exemples caractéristiques d'une approche donnée. Le plus souvent, le diagnostic agronomique est appliqué à l'échelle d'une petite région agricole, sur un ensemble de parcelles agricoles d'une même culture, avec parfois un dispositif complémentaire d'essais (Clermont-Dauphin *et al.*, 2005 ; Van Keer, 2003) afin de consolider ou de compléter les résultats issus de l'enquête en parcelles agricoles. Toutefois, on peut aussi rencontrer des applications au niveau d'une succession culturale, sur un réseau d'essais, sur une parcelle expérimentale comportant plusieurs traitements, ou même sur une parcelle isolée (Massaï, 1995). Enfin, quelle que soit la démarche adoptée, la qualité du diagnostic agronomique repose en grande partie sur le choix

10. Voir, par exemple, Sène (1999) et Sène *et al.* (2000) sur sorgho au Sénégal, Metral et Wery (2001) sur légumes secs en France, ou Davidson et Ramsey (2000) sur pois en Australie.

11. Wery *et al.* (1999) sur haricot en France ; Rapidel *et al.* (2004) sur cotonnier au Mali.

d'indicateurs de diagnostic, à savoir des variables pertinentes et faciles à mesurer au champ en cours de cycle, en vue de caractériser l'état du peuplement et/ou du milieu et de relier ces états aux performances du champ cultivé.

Les approches statistiques multivariées

Dans ces approches, la recherche de relations entre les variables explicatives (variables d'état du champ cultivé) et la ou les variables à expliquer se fait uniquement à l'aide de méthodes statistiques multivariées, contrairement aux autres méthodes qui se fondent sur des hypothèses de relations causales.

Un certain nombre de travaux fondent leur interprétation des données sur des analyses statistiques classiques, de type analyse de variance, régression simple, régression linéaire multiple, test de χ^2 (voir en particulier Davidson et Ramsey, 2000 ; de Bie, 2004 ; Soto-Pinto *et al.*, 2000). La difficulté majeure rencontrée réside dans une faible prise en compte des interactions entre les facteurs explicatifs du rendement (seules deux ou trois interactions au maximum ont pu être intégrées dans les régressions linéaires multiples), ce qui peut conduire à des relations de cause à effet erronées.

Ce problème peut en partie être contourné par l'usage de méthodes où certaines des relations entre les variables explicatives du rendement sont dans un premier temps explicitées et décrites avant d'être confrontées aux variations de rendement observées. Ainsi, dans les études menées par Savary *et al.* (1994, 1995a, 2000), plusieurs combinaisons de bioagresseurs et différents types de situations de production de riz irrigué en Asie du Sud-Est sont d'abord décrits par classification hiérarchique. Puis ces deux groupes (bioagresseurs et situations agronomiques) sont successivement croisés avec des classes de rendements obtenus sur des parcelles d'enquêtes grâce à une analyse de correspondance. Cette analyse a permis d'identifier et de hiérarchiser les principaux bioagresseurs à l'origine de faibles rendements et les situations de production qui leur étaient associées. Sur ces bases, il a été possible de construire un modèle simulant les pertes de rendement en fonction des dégâts liés aux bioagresseurs, et ce pour une large gamme de situations de production (Willocquet *et al.*, 2000 ; 2002).

Plus simplement, l'analyse statistique peut être précédée par l'utilisation de lois agronomiques permettant de caractériser l'effet du facteur le plus limitant et de travailler sur les écarts au rendement potentiel. Par exemple, en considérant la quantité d'eau consommée par la culture comme limitante, la relation empirique entre cette variable et le rendement du blé (20 kg grain/mm d'eau consommée à partir de 100 mm d'eau perdue par évaporation) a ouvert la voie d'une approche de diagnostic des autres facteurs pouvant influencer le rendement (azote, mauvaises herbes, etc.), aujourd'hui très développée en Australie de l'Ouest pour orienter le conseil et la recherche (Passioura, 2004). De même, Casanova *et al.*, (1999) utilisent la loi du facteur limitant minimum de Liebig pour construire des courbes limites décrivant les valeurs maximales qui peuvent être atteintes par le rendement en fonction d'une caractéristique de sol donnée.

Les relations entre les composantes du rendement peuvent aussi être mobilisées : ainsi, pour le maïs, Siband *et al.* (1999) rendent compte de la compétition exercée

sur chaque composante du rendement en formation à partir d'une valeur seuil de nombre de plantes par mètre carré grâce à l'élaboration de courbes-enveloppes décrivant les valeurs potentielles atteintes par la composante. Ces courbes permettent le calcul d'indices de réalisation des différentes phases du cycle de culture (Wey *et al.*, 1998). Sur cette base, Van Keer (2003) a développé une approche multivariée un peu similaire à celle de Savary *et al.* (1994, 1995a, 2000), en utilisant une analyse en composantes principales (ACP). Cette méthode a permis de comprendre l'origine des faibles rendements observés en production de riz pluvial dans le nord-est de la Thaïlande et d'identifier les sources de variabilité des rendements entre parcelles.

La principale limite de ce type de démarche réside dans le fait que des confusions d'effets sont possibles si des relations directes entre rendement et techniques culturales (Davidson et Ramsey, 2000) ou propriétés du sol (Casanova *et al.*, 1999) sont établies sans expliciter les variables intermédiaires qui pourraient être à l'origine d'un tel résultat. Ces confusions sont issues des interactions complexes liées au fonctionnement d'un champ cultivé et des autocorrélations entre certaines pratiques culturales et certaines conditions de milieu pouvant exister au sein d'un réseau de parcelles agricoles.

Le modèle conceptuel

Dans cette approche, on pose *a priori* des hypothèses sur les causes de variation du rendement (ou de la qualité ou des critères environnementaux) à partir d'une analyse fonctionnelle du champ cultivé. On produit ainsi un modèle conceptuel mettant en relation le rendement ou toute autre variable caractérisant les performances du champ cultivé, avec des variables d'état du milieu (climat, sol) et du peuplement, des variables décrivant les techniques et des caractéristiques permanentes du milieu. Le diagnostic agronomique consiste alors à confronter ce modèle théorique à des observations correspondant aux variables d'état et d'environnement de ce modèle sur des parcelles d'agriculteurs (Rapidel *et al.*, 2004). Mercau *et al.* (2001) utilisent ainsi un modèle conceptuel simple (appelé « *biological framework* ») pour identifier les sources de variation du rendement du tournesol en Argentine.

Si l'on se situe dans le cadre d'une démarche de diagnostic agronomique régional (Doré *et al.*, 1997), une attention particulière doit être portée au choix des parcelles d'enquêtes où la culture étudiée est produite, qui doit couvrir la diversité des combinaisons « systèmes de culture-milieus » représentatives de l'aire de cette culture dans la région d'étude. Par ailleurs, les informations à recueillir sur les parcelles concernent à la fois des indicateurs d'analyse du champ cultivé (caractérisation des états du milieu et du peuplement en cours de cycle), des critères d'évaluation des performances (comme la teneur en protéines des grains par exemple), mais aussi le relevé des techniques culturales appliquées sur la culture. Dans les autres approches, les parcelles sont choisies pour avoir des situations contrastées (cas d'un réseau d'expérimentation) ou chez des acteurs avec lesquels on veut travailler (voir, sur coton, Rapidel *et al.*, 2004). Dans la plupart des cas, le diagnostic vise à « remonter » jusqu'aux pratiques à l'origine des états défavorables du milieu ou du peuplement, ce qui oblige à inclure dans le modèle conceptuel des hypothèses sur les liens entre pratiques et variables d'état du champ cultivé.

Une fois le dispositif constitué et le protocole mis en œuvre, le traitement des données recueillies consiste à successivement caractériser la variabilité des performances obtenues sur les parcelles étudiées, à relier ces performances à des variables d'état du peuplement et du milieu afin d'identifier les principaux facteurs et conditions limitant les performances observées, puis à identifier les techniques culturales à l'origine des variations des états du peuplement et du milieu repérées à l'étape précédente (Doré *et al.*, 1997).

Cette démarche a fait l'objet de nombreuses applications sur des systèmes de culture et sur des milieux variés : association haricot-maïs en Haïti (Clermont-Dauphin *et al.*, 2003, 2005), orge de printemps (Le Bail et Meynard, 2003) et pois protéagineux (Doré et Meynard, 1995 ; Doré *et al.*, 1998) dans le nord de la France, blé dur en Tunisie (Aubry *et al.*, 1994 ; Latiri-Souki *et al.*, 1992), succession sorgho-arachide au Sénégal (Sène, 1999), coton au Mali (Rapidel *et al.*, 2004), haricot dans le sud de la France (Massaï, 1995)... Initialement construite pour expliquer les variations de rendement sur un réseau de parcelles d'une culture donnée (en se basant sur une analyse des composantes du rendement), la démarche de diagnostic agronomique régional a progressivement intégré d'autres critères d'évaluation que ceux liés à la production, à savoir des critères de qualité (comme la teneur en protéines des grains récoltés : voir à ce sujet Le Bail et Meynard, 2003) ou des critères environnementaux. Par exemple, Gay (2002) a appliqué cette démarche pour analyser des pratiques de fertilisation et d'irrigation de cultures maraîchères à l'aide d'indicateurs de stress hydrique et azoté pour les cultures et d'indicateurs de lixiviation du nitrate. De manière plus globale, Giller *et al.* (1997) proposent un modèle conceptuel pour explorer les relations existant entre l'intensification de l'agriculture, la biodiversité des sols tropicaux et des fonctions biologiques en vue d'établir des relations causales.

Les modèles numériques du fonctionnement d'une culture

Dans cette approche, le fonctionnement du champ cultivé est décrit à travers un modèle numérique (plus ou moins complexe en fonction des hypothèses à tester) et des données disponibles dans le réseau de parcelles d'enquête. L'intérêt de cette démarche est de permettre une analyse quantitative de l'impact des facteurs limitants sur les performances de la culture. On peut alors hiérarchiser les facteurs limitants en fonction de leur fréquence dans l'espace — comme dans tout diagnostic régional —, mais aussi en fonction de leur contribution à la perte de rendement par rapport au potentiel régional.

La démarche la plus simple consiste à mesurer l'indice foliaire (ou l'efficacité d'interception du rayonnement) dans chaque parcelle pour ensuite calculer une production potentielle de biomasse et la comparer à une biomasse mesurée (Metral et Wery, 2001). On peut alors distinguer les facteurs qui jouent sur la mise en place de l'indice foliaire et qui agissent plutôt en début de cycle (densité de semis, stress hydrique et azoté précoces) de ceux qui agissent sur la conversion du rayonnement en biomasse (stress hydrique, azoté ou biotique tardifs). Cette approche est facilitée par la disponibilité d'équipements de mesure de l'efficacité d'interception du rayonnement. Le caractère générique du modèle sous-jacent permet d'utiliser cette

approche sur des cultures peu étudiées (Wery *et al.*, 1999) et pour lesquelles les références manquent pour paramétrer des modèles plus complexes ou même pour une analyse à partir des composantes du rendement. Metral et Wery (2001) ont ainsi utilisé cette approche pour accompagner le plan de relance des légumes secs dans plusieurs régions de France. Lorsqu'un modèle de culture existe déjà, on peut aller plus loin dans le diagnostic en utilisant successivement l'indice foliaire (ou une autre variable) comme une variable d'entrée mesurée (comme dans l'approche précédente) puis comme une variable à analyser. De même, des variables mesurées au champ peuvent être confrontées à des variables de sortie d'un modèle de culture, comme les niveaux de stérilité des épillets pour le riz (Poussin *et al.*, 2003), ce qui permet de compléter le diagnostic, dans le cas présent, en écartant un problème de stérilité lié aux conditions climatiques.

Il est également possible de recourir à un modèle de culture pour estimer le rendement potentiel de chaque parcelle et contribuer ainsi à quantifier les écarts entre ce calcul et les rendements effectivement obtenus. Ces écarts peuvent ensuite être analysés au regard des contraintes environnementales ou techniques qui ont été relevées sur le réseau de parcelles (Becker et Johnson, 1999 ; Caldiz *et al.*, 2002 ; Calviño et Sadras, 2002). Affholder *et al.* (2003) approfondissent l'usage du modèle de culture en y intégrant de nouvelles relations pour considérer des contraintes existant dans la zone d'étude, et en réalisant des simulations permettant de quantifier l'impact des facteurs et des conditions du milieu sur les rendements. Une phase de calibrage du modèle et de test de sa capacité prédictive dans la région d'étude constitue cependant un préalable essentiel à l'analyse, ce qui augmente la durée de la phase de diagnostic dans un programme mais permet ensuite de disposer d'un modèle paramétré localement pour les autres phases d'un programme d'amélioration des rendements.

Les indicateurs de diagnostic

Le diagnostic agronomique peut mobiliser différents types de variables d'état du système sol-plante qui sont utilisées comme des indicateurs de diagnostic, c'est-à-dire des variables donnant une information suffisante sur l'état du champ cultivé pour pouvoir tester l'hypothèse de l'existence d'un facteur limitant. Ces indicateurs peuvent être mesurés ou simulés par un modèle à partir de variables plus simples d'accès : c'est le cas de l'indicateur de stress hydrique calculé à l'aide de données météorologiques et du modèle de bilan hydrique de Pellegrino *et al.* (2002). Ils peuvent concerner le compartiment « sol » ou le compartiment « plante » du champ cultivé. Les qualités requises pour ces indicateurs, en dehors de leur coût de mesure au champ et de leur faisabilité, sont la spécificité par rapport au facteur étudié et la mémoire pour pouvoir réduire la fréquence des mesures (Meynard *et al.*, 1997b). Certains sont aussi utilisables comme indicateurs de pilotage, mais les qualités requises pour ce type d'utilisation peuvent être différentes. Nous donnons dans l'encadré 1.9 quelques exemples d'indicateurs de diagnostic illustrant cette diversité et classés par type de facteur limitant¹².

12. Des exemples de mise en œuvre de ces indicateurs peuvent être trouvés dans les références citées plus haut, dans la section consacrée aux approches statistiques multivariées.

Encadré 1.9. Exemples d'indicateurs utilisés dans des démarches de diagnostic.**Azote**

L'indicateur le plus performant en termes de spécificité et de mémoire est l'INN (indice de nutrition azotée) mais il nécessite des mesures de biomasse et de teneur en azote (Justes *et al.*, 1994). Il est pour cette raison souvent utilisé pour caler les références d'indicateurs plus faciles à mesurer comme les mesures des propriétés optiques des feuilles ou de teneur en chlorophylle des feuilles (Baret et Fourty, 1997 ; Siband *et al.*, 2001).

Eau

Comme pour l'azote, il existe un indicateur spécifique du stress hydrique et mesurable sur la plante — le potentiel hydrique de base —, mais on peut aussi utiliser des mesures de l'état hydrique du sol dans la zone racinaire comme les mesures tensiométriques (Gay, 2002), voire un modèle de bilan hydrique qui permet de calculer un indicateur de stress hydrique par ailleurs bien corrélé au potentiel de base (voir à ce sujet les travaux de Pellegrino *et al.*, 2004, sur la vigne).

Adventices

Les indicateurs peuvent être basés sur l'évolution au cours du temps du taux de recouvrement par les adventices (Rapidel *et al.*, 2004) ou sur un ratio relatif de biomasse d'adventices, à savoir le rapport « biomasse des adventices/biomasse des adventices et de la culture » (Valantin-Morison, 2004). Un ratio du même type avec la quantité d'azote absorbé par les adventices ou le colza a également été utilisé par Valantin-Morison (2004) pour caractériser le niveau de concurrence des adventices vis-à-vis de l'azote disponible.

Maladies et insectes

Des notes de dégâts sur feuilles, sur tiges ou sur racines sont fréquemment utilisées. Doré et Meynard (1995) montrent par exemple comment la simple observation d'attaques d'adultes de sitones sur des feuilles de pois peut être utilisée comme un indicateur des dégâts des larves sur les nodosités. De manière plus indirecte encore, Debaeke et Estragnat (2003) ont mis en évidence la possibilité de rendre compte du niveau d'attaque des tiges par *Phomopsis* à partir de la fraction de rayonnement intercepté par un peuplement de tournesol à floraison.

» L'évaluation multicritère des systèmes de culture

Les exigences croissantes de durabilité et de multifonctionnalité imposées aux systèmes de culture par la société amènent à élargir l'évaluation des systèmes de culture à d'autres critères que leurs performances agronomiques en termes de rendement. La démarche d'évaluation qui s'est construite autour du diagnostic agronomique demeure cependant appropriée pour peu que l'on élargisse les critères pris en compte, l'échelle d'approche (le ou les systèmes de culture de l'exploitation) et les pas de temps de l'évaluation. Toutefois, les risques de simplification abusive augmentent avec le nombre d'indicateurs à calculer avec des données limitées. De plus, il peut s'avérer particulièrement délicat d'agréger plusieurs indicateurs qui sont le plus souvent de nature et d'unité différentes. Cette démarche d'évaluation multicritère des systèmes de culture est appelée à se développer

comme outil d'aide à la décision dans le cadre des politiques d'aide à l'agriculture ou comme élément de qualification des manières de produire (voir chapitre 11). Elle est aussi amenée à se développer comme outil de recherche dans le cadre de programmes d'évaluation ou de conception de systèmes de culture, et c'est cette utilisation que nous abordons ci-dessous.

Les indicateurs de performances des systèmes de culture

Le rendement et l'utilisation des ressources naturelles

Le rendement des cultures reste un critère stratégique à considérer dans les systèmes où la terre est une ressource rare ou chère. Il peut cependant être remplacé par un indicateur de quantité produite par volume d'eau utilisée ou par quantité d'engrais (à savoir un indicateur d'efficacité) si ces dernières ressources sont limitantes ou à limiter. Oweis et Hachum (2004) montrent par exemple l'importance d'une évaluation des systèmes de culture sur la productivité de l'eau, plutôt que sur la productivité de la terre, dans les zones semi-arides.

La qualité des produits récoltés

Elle constitue un élément d'importance à considérer pour assurer la bonne insertion du système de culture dans une filière. Les difficultés rencontrées dans le choix d'indicateurs pertinents résident dans la traduction en indicateurs mesurables et fiables des aspects de la qualité tels que perçus par l'aval de la filière, et dans la nécessité de prendre en compte plusieurs critères de qualité : qualité organoleptique (par exemple l'indice Brix d'un fruit), qualité technologique (comme le taux de mitadnage d'un blé dur), qualité sanitaire (comme la teneur en mycotoxines d'une céréale), qualité de service (par exemple l'homogénéité des calibres d'un lot de pêches).

Les performances économiques d'une culture

Elles sont essentielles pour analyser les perspectives de développement d'un système de culture, mais elles sont trop souvent négligées dans les diagnostics en parcelles¹³ ou les expérimentations agronomiques. Il existe différents indicateurs microéconomiques applicables à la parcelle, depuis ceux qui ne prennent en compte que la valeur ajoutée par rapport aux intrants (marge brute) jusqu'à ceux qui prennent en compte tout ou partie des charges fixes liées aux cultures (marge semencière) ou à l'exploitation (revenu). Le coût de production (rapport entre les charges et le rendement) constitue également un critère économique intéressant à considérer car il permet d'évaluer le niveau de compétitivité d'une culture, à savoir la capacité à produire à un prix de vente faible. Les temps de travaux associés à un itinéraire technique (Lançon *et al.*, 2004) ou à une succession de culture sont une composante essentielle de ces indicateurs de performances économiques et peuvent aussi être utilisés comme des indicateurs de la dimension sociale de l'agriculture. Ils

13. Certains travaux y font toutefois référence : ainsi, Donovan *et al.* (1999) complètent les travaux de diagnostic agronomique réalisés par Wopereis *et al.* (1999) sur riz irrigué par une étude de l'intérêt économique de l'usage des engrais minéraux.

sont cependant peu pris en compte par les agronomes compte tenu des difficultés à les estimer à l'échelle d'une parcelle ou d'une sole.

Les indicateurs d'impacts environnementaux

Les sols

De nombreux indicateurs sont utilisables pour traduire l'impact potentiel ou constaté des systèmes de culture sur la quantité et la qualité des sols : risques d'érosion, teneur en matière organique (Dogliotti *et al.*, 2005), activité biologique (Lombard, 2003). Le sol occupe cependant un statut particulier dans les ressources naturelles à préserver car il représente aussi un élément intrinsèque du système évalué (champ cultivé), dont la dégradation peut limiter les performances du système.

La qualité de l'eau et de l'air

Elle est à mettre en lien avec l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires. Des indicateurs de l'un des flux polluants, comme la lixiviation du nitrate, peuvent être construits à partir de mesures (Cuny *et al.*, 1998) ou de modèles (Belhouchette, 2004). Ils sont cependant plus souvent déduits des pratiques de gestion de l'engrais (Bellon *et al.*, 2001), ce qui présente des risques importants d'erreur, surtout en systèmes irrigués. Pour ce qui concerne les produits phytosanitaires, peu de mesures sont disponibles compte tenu des difficultés méthodologiques et du coût des analyses, surtout si un grand nombre de matières actives sont utilisées. Les indicateurs les plus simples sont uniquement construits à partir des pratiques mises en œuvre par les agriculteurs (comme la quantité de matière active utilisée). Des indicateurs de pression polluante sur différents compartiments (eau de surface, eau de profondeur ou air) ont également été établis, en se basant sur les propriétés chimiques des matières actives seulement (Wijnands, 1997), ou en incluant aussi des caractéristiques de milieu et de peuplement (Van der Werf et Zimmer, 1998). Au niveau européen, on constate une grande diversité de ces indicateurs « pesticides », selon les compartiments considérés et les effets sur l'environnement qui sont pris en compte (Reus *et al.*, 2002).

La biodiversité

Elle représente la richesse faunistique et floristique en termes d'espèces (voire de variétés ou de races selon les définitions) et peut être appréciée par le nombre d'espèces et/ou leur fréquence d'occurrence (Büchs, 2003). Les indicateurs de biodiversité peuvent être définis en fonction des objectifs que l'on cherche à atteindre. Duelli et Obrist (2003) distinguent ainsi trois principaux objectifs : la protection d'espèces en danger, le contrôle biologique des ravageurs des cultures et le maintien de la diversité des espèces. Toutefois, ce dernier objectif fait l'objet de nombreux débats car on connaît finalement peu de choses sur l'effet d'un « niveau » donné de biodiversité sur le fonctionnement des chaînes trophiques. Le nombre d'indicateurs relevés est généralement élevé¹⁴ mais, compte tenu de la difficulté à

14. Voir par exemple l'étude menée sur l'effet des cultures OGM résistantes aux herbicides par Squire *et al.*, 2003.

caractériser la biodiversité dans son ensemble, des espèces indicatrices sont retenues. C'est par exemple le cas des populations de carabes, qui constituent un ennemi naturel de nombreux bioagresseurs, en particulier un prédateur des puceurons (Kromp, 1999).

L'énergie

Suite au développement des cultures dédiées à la production d'énergie (carburant, combustibles), on a assisté à un effort de formalisation du calcul du bilan énergétique d'une filière de production (Poitrat, 1994). Au niveau d'une culture, effectuer un bilan consiste à estimer une différence (en MJ¹⁵/ha) ou un ratio entre la production d'énergie issue des produits récoltés et la dépense d'énergie liée à la fabrication des intrants et du matériel agricole. Cette dépense résulte de la multiplication des quantités de produit ou de matériel utilisées par un coefficient énergétique. La difficulté majeure dans l'établissement d'un bilan réside dans l'acquisition de valeurs de références pour le calcul de ces coefficients : par exemple, le coût énergétique des filières de production d'intrants peut varier selon le type d'énergie utilisée. Enfin, les dépenses d'intrants les plus élevées sont généralement liées à la production des engrais azotés.

L'identification et l'agrégation des indicateurs : exemples et problèmes posés

L'identification des indicateurs pour l'évaluation des systèmes de culture doit se faire à partir d'une « négociation » entre les acteurs concernés par ces systèmes et les chercheurs ou ingénieurs conduisant cette évaluation. Par exemple, Gay (2002) montre comment les objectifs des acteurs (agriculteurs, acheteurs, vendeurs d'eau) et les connaissances sur le fonctionnement d'une culture de laitue ont abouti à choisir trois indicateurs pour évaluer des parcelles de laitue dans une zone sensible (stress hydrique, stress azoté et lixiviation du nitrate). De même, dans le cadre de la production de bulbes à fleurs aux Pays-Bas, des indicateurs ayant trait à l'atteinte d'objectifs économiques et environnementaux ont été formulés par les chercheurs en interaction avec les acteurs impliqués (association de producteurs et de défenseurs de l'environnement). Au plan économique, le choix d'un index de marge brute a ainsi été privilégié par ces partenaires (Rossing *et al.*, 1997).

S'il est admis que l'agrégation directe (par une somme) d'indicateurs de durabilité est à éviter du fait de leur différence de nature et d'unité de mesure, il n'en reste pas moins vrai qu'une information synthétique sur l'état d'un système est recherchée. On peut envisager de réduire autant que possible le nombre d'indicateurs à considérer, en identifiant des indicateurs dont la mesure intègre plusieurs composantes de la durabilité. Smith *et al.* (2000a) proposent ainsi de retenir la teneur en matière organique des sols comme indicateur candidat à une évaluation sur l'intégrité environnementale et la productivité d'un système. Il est également possible d'avoir recours à des bio-indicateurs, comme les lombrics, qui permettent de décrire l'impact du travail du sol et de l'usage d'intrants (Paoletti, 1999). Les indicateurs

15. Mégajoules.

sont souvent examinés séparément dès lors que l'évaluation prend en compte des situations de référence (en comparant plusieurs systèmes de culture notamment) ou qu'elle attribue des valeurs de référence aux indicateurs (par exemple, une teneur en nitrate inférieure à $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Ainsi, dans la démarche de construction d'indicateurs agro-écologiques présentée par Bockstaller *et al.* (1997) et Girardin et Bockstaller *et al.* (1997), les indicateurs ont une échelle commune de 0 à 10, et la valeur 7 représente une valeur de référence (jugée acceptable ou correspondant à des valeurs de systèmes de culture jugés peu néfastes pour l'environnement). Il s'avère alors plus aisé de résumer l'information, en identifiant le ou les indicateurs dont la valeur est inférieure à 7. Dans certaines études, l'agrégation consiste à traduire les valeurs obtenues par les indicateurs en une même unité, en attribuant par exemple une valeur monétaire aux indicateurs environnementaux (Bräuer, 2003). Ces méthodes sont surtout utiles pour juger de l'efficacité économique d'une politique environnementale. Enfin, Van der Werf et Zimmer (1998) ont eu recours à la logique floue pour calculer les indicateurs élémentaires de pression des pesticides sur l'environnement. Cette méthode autorise l'agrégation de variables de natures très différentes, et présente l'avantage de rendre plus explicites les modes d'agrégation effectués et les hiérarchies entre indicateurs en résultant.

► Les méthodes de conception de nouveaux systèmes de culture

La démarche de conception des systèmes de culture

L'amélioration des systèmes de culture peut s'analyser comme un processus continu que les agriculteurs mettent en œuvre par « essais-erreurs » à partir des informations transmises par des organismes de développement et des prescripteurs du secteur marchand (vendeurs d'intrants et/ou acheteurs des produits). La base scientifique de cette amélioration repose très largement sur des réseaux d'essais factoriels qui, même s'ils considèrent deux ou trois facteurs (comme variété $\times$ date de semis $\times$ fertilisation), ne prennent pas en compte les multiples interactions existant entre tous les éléments d'un itinéraire technique et entre une culture présente et la précédente. Nous ne traiterons pas ici de cette approche, dont les limites ont été discutées par Reau *et al.* (1996), mais plutôt des méthodes de conception de systèmes de culture innovants qui reposent sur la prise en compte de ces interactions. La conception d'un itinéraire technique ou d'un système de culture potentiellement innovant se divise en trois phases (*figure 1.7*).

Il s'agit d'abord de fixer un cadre de contraintes et d'objectifs pour l'objet à concevoir. Cette phase est malheureusement souvent absente dans les programmes de recherche, ou du moins elle est rarement formalisée. Les contraintes sont aussi bien de nature pédoclimatique que de nature socio-économique. Par exemple, Lançon *et al.* (2004) choisissent pour le coton en Afrique de l'Ouest deux cadres de contraintes définis par le niveau de déficit hydrique, et la disponibilité en intrants et en main-d'œuvre. Les objectifs sont le plus souvent réduits au rendement et à la qualité des

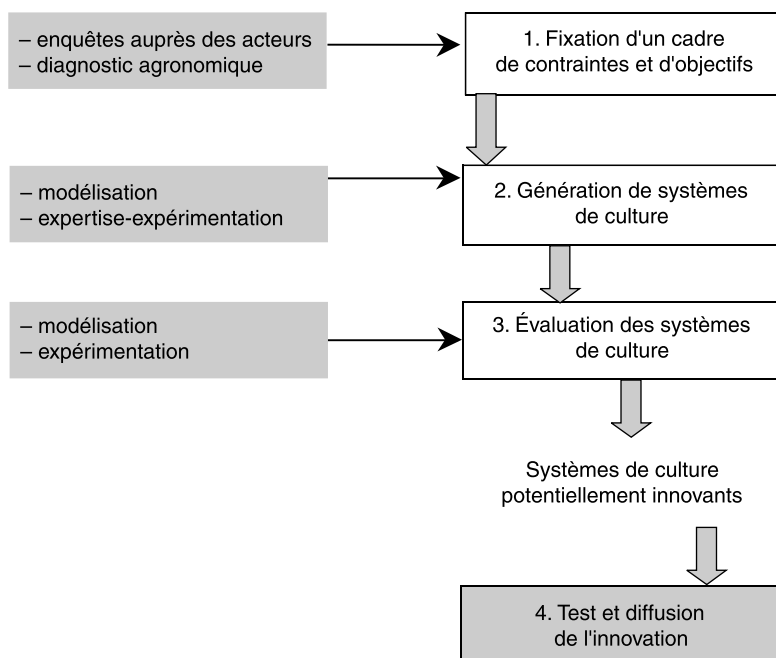


Figure 1.7. Démarche de conception de systèmes de culture et contribution des différents outils de l'agronomie. Les trois premières étapes aboutissent à la conception de systèmes « potentiellement innovants » qui doivent ensuite faire l'objet de test et d'adaptation en partenariat avec les acteurs. À chaque étape, on mobilise des outils spécifiques de l'agronomie des systèmes de culture. Pour chacune d'entre elles, la tendance actuelle est d'impliquer davantage les acteurs (recherche participative, en grisé) pour accroître la probabilité d'adoption de l'innovation.

produits, mais la multifonctionnalité et la durabilité des systèmes de culture conduisent à un élargissement des objectifs aux dimensions économique, sociale et environnementale. Ainsi, Loyce *et al.* (2002b) ont identifié un ensemble d'objectifs (d'ordres économique, énergétique, environnemental et liés à la qualité du produit récolté) poursuivis par les différents acteurs impliqués dans la production de blé éthanol. L'évaluation des systèmes de culture pratiqués dans la zone considérée, l'analyse du fonctionnement des filières (et plus généralement du contexte de production) et l'analyse des pratiques des agriculteurs constituent des approches indispensables pour fournir les éléments nécessaires à cette phase.

La seconde phase est la réalisation de combinaisons innovantes de techniques ou de successions de cultures. Cette phase correspond à l'étape de conception au sens strict et peut se faire à partir d'un diagnostic agronomique et/ou de dires d'experts et/ou à partir de modèles, ces méthodes étant détaillées ci-dessous.

L'évaluation des combinaisons précédentes pour retenir un ou quelques systèmes de culture candidats à l'innovation, que nous appellerons ici « potentiellement innovants » (car encore faut-il, pour constituer une réelle innovation qu'ils soient appropriés par les acteurs) constitue la troisième étape. Bien qu'une première évaluation puisse être faite à partir des résultats issus des modèles (cf. p. 91), cette dernière étape s'appuie largement sur l'expérimentation. Le type d'expérimentation

diffère selon la manière dont est représenté le système de culture, à savoir une combinaison de techniques culturales ou un jeu de règles de décision de type « SI condition ALORS décision ». Dans cette dernière représentation, le choix d'une technique culturale est conditionné par la valeur prise par certains indicateurs décrivant le contexte de la culture, par exemple le niveau d'attaque du piétin verse pour décider de la nature du premier traitement fongicide. Les règles de décision peuvent s'avérer plus difficiles à formuler, mais présentent l'avantage d'explicitier les indicateurs à l'origine d'un choix technique et de rendre ainsi les recommandations techniques plus transmissibles (Reau *et al.*, 1996), et bien sûr de tenir compte du fait que l'application d'une technique culturale relève moins d'une action normative que de l'application d'un raisonnement finalisé par un objectif, et tenant compte de l'état du système. Un certain nombre de principes méthodologiques concernant les situations expérimentales à retenir dans un réseau d'essais, la conduite des essais et l'implication relative des chercheurs et des agriculteurs, le choix des traitements expérimentaux, le protocole de mesures et d'observations et les modalités de traitement des résultats obtenus ont été proposés par Meynard *et al.* (1996) et Mutsaers *et al.* (1997).

La qualité du travail réalisé dans la première phase est l'un des éléments permettant de garantir que les systèmes candidats choisis à l'issue de cette dernière phase sont proches des contraintes du terrain et des objectifs des acteurs. Plus généralement, l'implication des acteurs et en particulier des agriculteurs dans les trois phases occupe une place croissante dans le cadre d'approches participatives (voir par exemple Carberry *et al.*, 2002).

Concevoir à partir d'un diagnostic agronomique

On peut considérer que le diagnostic agronomique constitue la base de l'amélioration des systèmes de culture, car il permet d'identifier les principaux facteurs limitant les performances, et donc de repérer par là même les choix techniques permettant de les lever. Par exemple, Haefele *et al.* (2001) proposent des conduites alternatives de fertilisation et de gestion des adventices pour le riz irrigué en Mauritanie, par suite de l'identification en parcelles agricoles d'une faible efficience des éléments minéraux et de niveaux élevés de pression des adventices. De même, la présence d'adventices ayant été identifiée comme facteur limitant majeur du rendement en parcelles de colza biologique, Valantin-Morison (2004) a mis au point des itinéraires techniques permettant de réduire l'enherbement. Dans les parcelles enquêtées pour le diagnostic, l'enherbement étant lié à des situations où le colza est en situation de carence azotée, l'un des itinéraires techniques testés consiste à favoriser l'absorption d'azote par le colza en début de cycle. La *figure 1.8* présente le modèle conceptuel issu du diagnostic agronomique concernant la phase d'implantation et les interactions avec les ennemis de la culture, qui constitue l'un des éléments sur lesquels la conception d'itinéraires techniques s'est appuyée.

Par ailleurs, dans le cas du diagnostic agronomique basé sur un modèle conceptuel, l'apparition des facteurs limitants est mise en relation avec des éléments du système de culture ou des caractéristiques permanentes du milieu : il est alors possible d'identifier des situations de production « à risques ». Ainsi, dans l'objectif

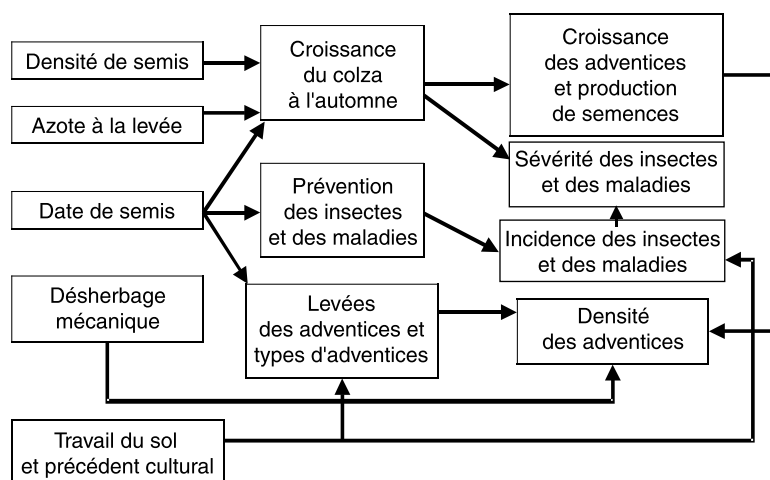


Figure 1.8. Modèle conceptuel représentant les interactions entre les techniques culturales, le statut azoté du colza, l'état d'enherbement et le niveau de maladies observé sur les parcelles (d'après Valantin-Morison, 2004).

d'atteindre à la fois un rendement élevé et une teneur en protéines faible (pour l'orge de brasserie), et par suite du diagnostic agronomique réalisé, Le Bail (1997) suggère d'écarter de la production des parcelles possédant certaines caractéristiques de terrain et ayant une histoire culturelle singulière, en particulier celles dont le précédent cultural est une légumineuse ou une prairie, et plus largement toute histoire culturelle susceptible d'engendrer une minéralisation de l'azote imprévisible. Le diagnostic peut aussi aider à caractériser des situations de production pour lesquelles des préconisations spécifiques en matière de conduite des cultures vont être réalisées¹⁶.

Cependant, compte tenu de la lourdeur de mise en place des dispositifs d'enquête en parcelles agricoles, le diagnostic est réalisé sur un nombre d'années réduit, ce qui limite l'exploration de la variabilité climatique, et par là même de certains facteurs limitants potentiels comme la présence de maladies. De plus, la gamme des techniques explorées peut s'avérer restreinte sur une région donnée, d'autant que certains choix techniques peuvent être fixés dans le protocole pour limiter les risques de confusion d'effets dans l'interprétation des résultats, comme c'est souvent le cas pour le choix variétal. Enfin, le diagnostic ne porte le plus souvent que sur quelques critères, et doit donc s'appuyer sur des connaissances complémentaires pour :

- imaginer les conséquences des améliorations proposées sur plusieurs critères de durabilité ;
- pouvoir déboucher sur des propositions plus complètes de systèmes de culture (mobilisant des leviers techniques non identifiés dans la phase de diagnostic comme étant stratégiques, car peu variables d'un agriculteur à l'autre dans le réseau

16. Voir à ce sujet les propositions formulées par Clermont-Dauphin *et al.* (2003) en matière de stratégies de fertilisation minérale de l'association haricot-maïs en Haïti.

d'enquêtes) ; ainsi, les résultats acquis par Dejoux *et al.* (2003) sur l'intérêt des semis précoces du colza pour accroître la capacité du colza à prélever l'azote du sol ont été mis à profit par Valantin-Morison (2004) pour la mise au point d'itinéraires techniques répondant au cahier des charges de l'Agriculture Biologique.

Concevoir à partir de dires d'expert (le prototypage)

Cette méthode s'impose lorsque la diversité des techniques à tester, et souvent déjà pratiquées par les agriculteurs, ne peut pas être prise en compte par les modèles de culture, ce qui est somme toute assez fréquent — surtout pour les espèces mineures. Par exemple, pour obtenir des cultures de coton évitant la sécheresse de fin de cycle, Lançon *et al.* (2004) conçoivent des itinéraires techniques à partir de pratiques aussi diverses que le semis direct, le délintage¹⁷ des semences, l'utilisation de régulateurs de croissance et de variétés plus déterminées, autant de pratiques non encore prises en compte par les modèles de culture. Un choix doit donc être fait dès le départ entre l'utilisation du prototypage et une phase initiale de paramétrage et d'adaptation de la structure d'un modèle aux conditions locales et aux combinaisons techniques à tester. La démarche de prototypage des systèmes de production a été formalisée par Vereijken (1997) dans le cadre d'une série de programmes européens sur la mise au point de systèmes intégrés, puis adaptée à la conception de l'itinéraire technique d'une culture par Lançon *et al.* (2004). Elle repose sur trois étapes :

- construction, par des experts, d'un système de culture répondant à un cadre de contraintes et d'objectifs ; ce système, issu de la recherche d'un consensus entre les experts, n'est qu'un « prototype théorique ». Ce consensus est d'autant plus difficile à trouver que les différents types d'experts (chercheurs de différentes disciplines, chercheurs et agriculteurs) ne partagent en général pas une vision commune du champ cultivé (Lançon *et al.*, 2004). L'établissement d'un modèle conceptuel du champ cultivé (Rapidel *et al.*, 2004) ou du système de culture (Vereijken, 1997) devrait être un préalable à cette phase, car il facilite le partage d'un point de vue collectif sur le système et donne plus de transparence aux choix techniques ;
- expérimentation de ce prototype dans quelques essais représentatifs du cadre de contraintes fixé, et évaluation de ses performances sur des critères correspondant aux objectifs fixés. Par exemple, Lançon *et al.* (2004) évaluent leurs prototypes d'itinéraires techniques du cotonnier à partir d'un tableau de bord constitué d'indicateurs de performances (rendement, qualité de la fibre, marge brute), sociaux (nombre d'heures de travail) et d'impacts environnementaux (nombre d'applications d'insecticides). Un tableau de bord plus complexe et à l'échelle de la succession de culture est donné par Vereijken (1997) ;
- adaptation de ce prototype en fonction de l'évaluation multicritère issue de l'expérimentation et, à partir d'un nouveau travail collectif des experts, sur la base de règles de décision préalablement établies concernant le mode d'ajustement des techniques. Vereijken (1997) choisit par exemple de modifier d'abord les successions de cultures, puis la gestion des fertilisants, puis les infrastructures écologiques de l'exploitation, puis en dernier ressort les facteurs de production de l'exploitation.

17. Suppression des fibres entourant la semence pour accélérer son imbibition et donc sa germination.

Ceci suppose que dès la phase de conception du prototype, chaque objectif assigné au système soit traduit en indicateurs et en valeurs-objectifs et que les différentes composantes techniques du système puissent être reliées à ces indicateurs.

Après un ou plusieurs cycles d'itération entre la deuxième et la troisième phase, on aboutit à un « prototype technique » qui peut ensuite entrer dans une phase de test plus large avec les acteurs, ou servir de base à une deuxième phase de prototypage dans un réseau de fermes pilotes. Cette méthode peut être très efficace pour faciliter l'interdisciplinarité des chercheurs et impliquer les agriculteurs dès le départ dans un contexte où les modèles ne sont pas disponibles, ou seraient trop longs à adapter et à paramétrer. Elle comporte cependant plusieurs inconvénients. Tout d'abord, la nécessité d'obtenir un consensus sur un ou quelques prototypes théoriques peut laisser de côté beaucoup de combinaisons innovantes qui ne correspondent pas au point de vue issu du compromis entre les experts. Ensuite, la variabilité climatique et les risques associés sont difficiles à prendre en compte, et ce pour chacune des étapes présentées plus haut. Enfin, la formalisation et la transparence des processus d'agencement et de modification des éléments du prototype sont le plus souvent sommaires, ce qui rend le processus difficilement opposable par d'autres experts.

La modélisation partielle du système est susceptible d'apporter des progrès majeurs dans la démarche pour pallier ces trois difficultés. Par exemple, Lançon *et al.* (2004) proposent d'utiliser un modèle simple simulant le rendement du coton sous contrainte hydrique pour conditionner la date de semis à une règle de décision basée sur la pluviométrie. De même, Dogliotti *et al.* (2004) utilisent un modèle de génération-évaluation de systèmes de culture pour élaborer des prototypes théoriques permettant de réduire les risques d'érosion, de maintenir le niveau de matière organique des sols et d'accroître le revenu des agriculteurs du sud de l'Uruguay (Dogliotti *et al.*, 2005).

Concevoir à partir de modèles

L'agencement de combinaisons complexes de techniques et de successions de cultures, et leur test face à la variabilité du climat (actuel et futur) et du sol conduit naturellement à privilégier l'utilisation de modèles pour mettre au point et tester les systèmes de culture. On retrouve, comme dans le prototypage, une phase de mise au point de systèmes de culture suivie d'une phase d'évaluation, mais ces deux phases sont réalisées ici à partir d'un modèle. L'expérimentation, qui est une composante essentielle de la conception-évaluation dans le prototypage, a un statut très différent ici. Elle vient après la phase de conception-évaluation pour compléter l'évaluation, à savoir pour confirmer la pertinence du ou des systèmes choisis par le modèle, éprouver leur robustesse face à des systèmes de culture et des milieux variés, et évaluer leur faisabilité technique. On peut distinguer trois types d'approches, qui diffèrent selon la nature des modèles mobilisés et leur mode d'utilisation.

Modèle de culture seul

De nombreux modèles de culture ont été mis au point au cours des vingt dernières années pour simuler l'impact des itinéraires techniques et des successions de

cultures sur le fonctionnement du système climat-sol-plante (voir parties 2 et 3). Une fois correctement paramétrés et évalués, ils permettent de tester des systèmes de culture dans une large gamme de conditions de sols et de climats, inaccessible à l'expérimentation. Par exemple, Belhouchette (2004) évalue en Tunisie des successions culturales combinées avec des niveaux d'apport d'eau et d'azote sur l'ensemble des sols d'un périmètre irrigué et pour une importante variabilité inter-annuelle du climat, grâce au modèle Cropsyst interfacé avec un système d'information géographique (SIG). Cet avantage des modèles sur l'expérimentation se renforce si l'on prend en compte dès la conception des systèmes leur comportement face aux changements climatiques prévisibles aujourd'hui à partir de modèles climatiques. Les inconvénients des modèles de culture résident dans :

- la difficulté à prendre en compte toutes les innovations techniques déjà mises en œuvre par les agriculteurs (comme la simplification du travail du sol ou l'association de cultures) ;
- leur faible domaine de validité dans des conditions où la pression des bioagresseurs, souvent non prise en compte dans les modèles, n'est pas nulle, ce qui limite les innovations en matière de protection intégrée des cultures ;
- le nombre limité d'indicateurs d'impacts environnementaux qu'ils peuvent simuler, en dehors de ceux liés aux flux d'eau, d'azote et de carbone ;
- le temps et les moyens nécessaires à leur adaptation à des cultures nouvelles.

Pour toutes ces raisons, il n'existe pas d'exemple où un modèle seul a conduit à l'élaboration d'un système innovant, mais il existe de nombreux exemples où le modèle a constitué un élément essentiel dans la mise au point de prototypes de systèmes de culture¹⁸ ou comme outil de formation et de raisonnement des innovations pour les prescripteurs de l'agriculture, dans le cas d'Apsim¹⁹ par exemple (McCown *et al.*, 1996 ; Hochman *et al.*, 2001 ; Keating *et al.*, 2003). Plus généralement, les difficultés rencontrées dans l'élaboration et l'utilisation des modèles de culture en vue d'une aide à la conception d'itinéraires techniques ont conduit plusieurs auteurs à préciser les qualités requises de ces modèles (Boote *et al.*, 1996 ; Cox, 1996 ; Meynard, 1997) : des variables d'entrées et de sorties définies en relation avec le problème traité, un coût réduit d'estimation et d'évaluation des paramètres du modèle, un domaine de validité clairement défini et correspondant à la gamme des systèmes de culture et des milieux où il sera utilisé, une capacité à effectuer des choix techniques pertinents.

Modèle de culture couplé à des indicateurs d'impacts environnementaux

La part croissante prise par l'évaluation des impacts environnementaux issus des systèmes de culture potentiellement innovants rendra de plus en plus indispensable l'utilisation de modèles capables de produire des indicateurs fiables de ces impacts. La lixiviation du nitrate, la salinisation des sols (Belhouchette, 2004), la fertilité des sols et l'érosion (Dogliotti *et al.*, 2004) ainsi que la séquestration du carbone

18. Voir par exemple Meynard (1985) et David (2004) pour les itinéraires techniques du blé conventionnel et biologique, Dogliotti *et al.* (2005) pour des systèmes de production maraîchère.

19. *Agricultural production systems simulator*.

peuvent être évaluées à l'aide des variables de flux ou d'état classiquement simulées par les modèles de culture. Dans de nombreux cas, les systèmes innovants seront cependant associés à la réduction des impacts des produits phytosanitaires sur les sols, l'eau et l'air. La complexité des phénomènes en jeu et les échelles de transfert des produits phytosanitaires (bassin versant plutôt que parcelle) conduisent à n'utiliser à la parcelle que des indicateurs agrégés (cf. p. 85). Comme le montrent Tixier *et al.* (2004), ces indicateurs peuvent être calculés de manière dynamique à partir d'un modèle de culture, afin de trier des systèmes de culture dans un cadre de contraintes visant à réduire les impacts environnementaux liés aux produits phytosanitaires et maintenant le revenu du producteur.

Modèle de culture couplé à un modèle de décision

Le développement des collaborations entre les agronomes travaillant sur les modèles de culture et des chercheurs issus des sciences de gestion ou de l'intelligence artificielle a favorisé l'émergence d'outils d'aide à la décision (*decision support system*) couplant des modèles biophysiques à des modèles décisionnels. On peut considérer que deux grandes voies ont été empruntées dans la manière de construire et d'utiliser ces outils : une approche évaluative et une approche générative.

Dans l'approche évaluative, l'utilisateur de l'outil conçoit un plan d'action (présenté sous la forme d'un jeu de règles de décision) visant à répondre à un problème donné (par exemple améliorer la marge d'une culture) et se sert de l'outil pour en évaluer les conséquences. Le modèle de décision contenu dans l'outil représente la manière dont les agriculteurs planifient ces opérations culturales, et il repose sur une étude préalable de leurs pratiques de gestion (voir chapitre 2). Il interagit avec le modèle de culture afin de simuler pour un contexte pédoclimatique donné les techniques culturales mises en œuvre et leurs conséquences sur la production. Au vu des solutions obtenues, l'utilisateur peut modifier son plan d'action et apprendre de manière itérative, par essai/erreur. Cette approche présente ainsi l'avantage de favoriser l'interaction entre l'utilisateur et l'outil dans la recherche d'une solution satisfaisante. Les outils tels que Déciblé pour la conduite du blé (Chatelin *et al.*, 2005), Sepatou pour la gestion des systèmes de pâturage (Cros *et al.*, 2004) ou Moderato (Bergez *et al.*, 2001) pour la conduite de l'irrigation du maïs ont été construits sur ces principes, ces derniers ayant été décrits par Attonaty *et al.* (1990a) et Chatelin *et al.* (1993).

Dans le cas de l'approche générative, l'outil va dans un premier temps explorer une large gamme de situations de production possibles, dont la cohérence est assurée par le modèle de culture. Puis les solutions candidates vont faire l'objet d'une sélection, d'un tri ou d'un classement à partir du modèle de décision, qui est vu ici comme un modèle permettant la prise de décision car il prend en compte les objectifs et contraintes de l'utilisateur. Le modèle de décision peut mobiliser des démarches de programmation linéaire multiobjectif pour la recherche d'une solution optimale (Dogliotti *et al.*, 2005 ; Rossing *et al.*, 1997 ; Ten Berge *et al.*, 2000) ou de solutions presque optimales (Makowski *et al.*, 2001b). Il peut également s'appuyer sur des méthodes d'aide à la décision multicritère (Loyce *et al.*, 2002a et b) en vue d'identifier un ensemble de solutions satisfaisant globalement les objectifs et

contraintes définis. Par rapport à l'approche évaluative, on peut considérer que les capacités d'exploration de nouvelles solutions sont améliorées par la procédure de génération automatique. Toutefois, la procédure de sélection ou de tri effectuée par l'outil peut manquer de transparence et limiter de ce fait les interactions entre l'outil et l'utilisateur.

Le faible niveau d'adoption des outils d'aide à la décision par les agriculteurs ou les agents de développement agricole a suscité une série de réflexions pour en identifier les causes, afin d'en tirer les leçons pour l'avenir. Ainsi, Cox (1996) évoque notamment la confusion entre modèle pour la recherche et modèle vu comme un guide pour l'action, tandis que Mc Cown (2002b) insiste sur la nécessité de penser l'usage de ces outils dès leur conception. Parmi les pistes de réflexion envisagées figurent une typologie des contextes d'utilisation possible des outils d'aide à la décision au vu des expériences passées (Mc Cown, 2002a) et une orientation plus marquée vers des approches participatives, basées sur une collaboration étroite entre chercheurs, agriculteurs et agents de développement (Carberry *et al.*, 2002 ; Meinke *et al.*, 2001).

Les recherches conduites depuis une vingtaine d'années par les agronomes permettent aujourd'hui de disposer d'une large gamme d'outils pour appuyer des démarches d'évaluation de systèmes de culture existants ou de conception de systèmes « potentiellement » innovants. L'enrichissement de cette boîte à outils passera sans doute par une meilleure articulation des démarches existantes, cette intégration pouvant être facilitée dans le cadre d'approches participatives avec les acteurs de la production agricole. Cependant, ces méthodes demeurent trop largement confinées au domaine de la recherche : leur appropriation par les organismes de développement et par les prescripteurs de l'agriculture constitue à présent un défi majeur à relever.

Conclusion

Thierry DORÉ, Marie-Hélène JEUFFROY, Jean-Marc MEYNARD

Comme on a pu s'en rendre compte dans les pages qui précèdent, l'agronomie des systèmes de culture a considérablement évolué au cours des dernières décennies. L'évolution de la discipline dans les années 1970 trouve son origine dans le fait de considérer l'appréhension globale du champ cultivé et de sa conduite, qui ne se traduisait alors qu'à travers une pratique d'agriculteur, comme un mode d'approche scientifique de la production végétale. Ce changement s'est révélé fécond, d'une part si l'on en juge par les outils qui en sont issus, tant méthodologiques qu'opérationnels pour les agriculteurs ou les agronomes, d'autre part si l'on considère que c'est de cette approche que sont nées, après confrontation et enrichissement avec d'autres disciplines comme la géographie, l'écologie ou la gestion, les perspectives d'intervention à des échelles spatiales et d'organisation dépassant la parcelle et tracées dans la partie 4 de l'ouvrage.

Les perspectives dans le domaine de l'agronomie des systèmes de culture, pour en rester à l'échelle qui a été traitée dans cette première partie, ont trait à deux registres. Le premier concerne les types de productions issues des travaux menés dans cette discipline. S'appuyant sur une amélioration des connaissances relatives au fonctionnement du champ cultivé et sur une analyse des raisonnements techniques des agriculteurs, les agronomes ont produit au cours des dernières décennies des références et des outils destinés principalement à aider au raisonnement des pratiques des agriculteurs. Il apparaît aujourd'hui que, pour utiles qu'elles soient, ces sorties appliquées sont incomplètes. En effet, une analyse de la manière dont évoluent les pratiques des agriculteurs montre :

- que les outils utilisés par les agronomes pour aider au raisonnement des pratiques ne sont pas toujours utilisés comme on pensait qu'ils le seraient ;
- qu'au-delà des agriculteurs, d'autres types d'acteurs — les conseillers, les prescripteurs, les firmes d'amont et d'aval, les pouvoirs publics... — interviennent de manière significative sur les évolutions des pratiques.

Partant de ce double constat, il apparaît nécessaire de s'interroger sur la manière de prendre en compte les contextes d'usage dès la conception des outils d'aide au

raisonnement des pratiques, et d'étudier la diversité des outils à concevoir en fonction de la diversité des acteurs ayant une influence sur les pratiques agricoles.

Un second registre concerne les collaborations avec d'autres disciplines, rendues nécessaires par les développements en agronomie des systèmes de culture. Sans remettre en cause les synergies déjà existantes, en particulier avec l'écophysiologie, la pathologie végétale, l'amélioration des plantes, la science du sol, il apparaît aujourd'hui que les liens avec l'écologie, avec les statistiques, et avec les sciences économiques et sociales devraient être renforcés. L'orientation des systèmes de culture vers des pratiques engendrant une moindre artificialisation du milieu, et le souhait qui lui est lié d'une meilleure préservation des écosystèmes, plaident pour une compréhension accrue des interactions et des régulations entre les différentes composantes des écosystèmes cultivés d'une part, et avec les écosystèmes plus globaux dans lesquels ils sont intégrés d'autre part. Une telle compréhension, s'appuyant sur des concepts et connaissances issus de l'écologie, est à même de fournir des pistes nouvelles pour le raisonnement des actions en agriculture. Par ailleurs, l'amélioration des performances des matériels informatiques, ainsi que les progrès considérables réalisés en parallèle dans les méthodes mathématiques, autorisent maintenant le recours à des méthodes statistiques innovantes autrefois inaccessibles car trop consommatrices de temps de calcul. Une discipline comme l'agronomie, tournée vers l'action et dont l'une des sorties est la production d'outils d'aide à la décision, tirera certainement un grand bénéfice, dans le futur, de l'utilisation de telles méthodes dans des domaines comme l'estimation des risques, l'intégration de données qualitatives dans des outils d'aide à la décision ou d'évaluation des systèmes de culture, ou l'utilisation de bases de données complexes. Enfin, les conséquences des évolutions des systèmes de culture sur les dimensions économiques et sociales de l'activité agricole et rurale, et inversement la manière dont le contexte socio-économique, mouvant et peu prévisible, détermine des gammes de systèmes de culture possibles, n'ont que sommairement été abordées jusqu'à présent. Désormais, la nécessité de prendre en compte les dimensions économique et sociale de la durabilité de l'activité agricole (Godard et Hubert, 2002) va induire un renforcement des travaux d'interface entre sciences techniques et sciences sociales.

Pour en savoir plus

Académie d'agriculture de France, 1988, 74 (4) ; Thomas, 2002 ; Thorne et Tanner, 2002 ; Mc Cown, 2000a ; Altieri, 1999 ; Biarnès, 1998 ; Biswas, 1984 ; Brossier *et al.*, 1990 ; Bullock, 1992 ; Combe et Picard, 1990 ; Darré *et al.*, 2004 ; De Terssac et Dubois, 1992 ; Debaeke et Nolot, 2003 ; El Titi, 2003 ; *Étud. Rech. Syst. Agraires*, 1998, n° 31 ; Gras *et al.*, 1989 ; Holland, 2004 ; Jordan *et al.*, 2000 ; Karlen *et al.*, 1994 ; Lake *et al.*, 1997 ; Malézieux *et al.*, 2001 ; Matthews et Stephens, 2002 ; Meynard *et al.*, 2001 ; Meynard *et al.*, 2002 ; Meynard et Jeuffroy, 2002 ; Pierce et Nowak, 1999 ; Sebillotte, 1974a ; Tiercelin, 1998 ; Tebrugge et During, 1999.

Partie 2

Analyse et modélisation du peuplement végétal cultivé

Bertrand NEY, coordinateur

Introduction

Bertrand NEY

L'après-Seconde Guerre mondiale a vu la productivité agricole augmenter de façon spectaculaire, notamment en France. L'intensification s'est faite grâce à la sélection végétale, qui a fourni des variétés de plus en plus performantes, et à l'agronomie, source de nouvelles manières de conduire les cultures, souvent avec de forts niveaux d'intrants réduisant les risques de perte de rendement. L'une des voies majeures de progrès a été une meilleure compréhension du fonctionnement du peuplement végétal dans son environnement. Après une approche expérimentale, la modélisation de ce fonctionnement a émergé depuis une quarantaine d'années, grâce à l'essor de l'informatique. Sans renier la première qui la nourrit et la valide, la seconde méthode a permis des avancées majeures dans la compréhension et la quantification des processus. De nombreux modèles ont vu le jour depuis cette époque, qui diffèrent par leur degré de précision et d'explicitation des mécanismes. Certains, produits pour comprendre, sont très complexes mais peu robustes, et très contingents des conditions dans lesquelles ils ont été élaborés. Plus conceptuels qu'opérationnels, ils sont utiles dans la recherche pour tester des hypothèses, pour cerner des manques dans les connaissances ou pour donner un point de vue théorique. Ils souffrent souvent, cependant, d'une forte erreur de prédiction due, entre autres, à leur grand nombre de paramètres (Passioura, 1996). Leur utilisation est peu opérationnelle car ces paramètres doivent souvent être réestimés dans chaque situation. D'autres, plus empiriques, sont robustes mais trop simples : ils sont peu extrapolables, et restent liés aux données avec lesquelles ils ont été élaborés. De nombreux modèles de culture utilisés en agronomie sont de ce type.

Nous avons pris le parti de privilégier dans un premier temps la description des différents modes de représentation d'un peuplement (modèles conceptuels) qui ont vu le jour au cours des vingt dernières années, et non celle des processus physiologiques et des fonctions. Les intérêts et limites de ces différentes approches pour l'agronomie sont discutés. Nous verrons ensuite comment la modélisation permet de rendre compte du fonctionnement du peuplement dans un champ cultivé, lieu d'interaction de populations diverses désirées (communauté prairiale par exemple) ou non (populations de bioagresseurs). Enfin, dans une analyse critique de leurs intérêts et limites, nous évaluerons comment ces modèles peuvent être utilisés en agronomie, pour une production de qualité en préservant l'environnement, et pour une aide à la conception de variétés.

Chapitre 4

Le peuplement végétal cultivé

Bruno ANDRIEU, Jérémie LECŒUR,
Gilles LEMAIRE, Bertrand NEY

Les modes de représentation du peuplement végétal cultivé sont nombreux et peuvent être classés par leur degré d'explicitation des mécanismes impliqués et par le point de vue théorique de l'observateur. Il peut s'agir d'une représentation « énergétique », où le peuplement végétal est assimilé à une surface d'échange thermodynamique avec le milieu qui l'entoure. Cette vision, qualifiée par les Anglo-Saxons de représentation « *big leaf* » et propre à prédire la croissance en biomasse, est très largement utilisée en raison de sa robustesse dans les modèles de culture actuels. Cette démarche est souvent accompagnée de règles empiriques de partage des assimilats pour estimer le rendement. Elle est en revanche largement insuffisante pour caractériser l'état instantané de satisfaction des besoins de la culture pour les différents facteurs de sa croissance (eau, éléments minéraux...). De même, les règles empiriques de partage des assimilats (entre parties aériennes et souterraines ou entre parties végétatives et reproductrices) sont très souvent insuffisantes, notamment lors de contraintes environnementales abiotiques. Ces besoins d'explicitation nécessitent une approche fonctionnelle du peuplement végétal. Dans ces deux cas, le peuplement végétal est une collection d'individus moyens, feuilles dans le premier, plantes dans le second. Une représentation récente du peuplement végétal en tant que somme d'individus différenciés en compétition et en relation sociale a été produite grâce à des formalismes nouveaux. Cette représentation « architecturale » relie structure et fonctions par l'intermédiaire du microphyto-climat. La structure du peuplement modifie le phytoclimat local qui influence les fonctions de la plante et la croissance de ses organes.

» L'approche thermodynamique et la production de biomasse

À l'origine, l'écophysiologie végétale s'est développée à partir d'une approche des échanges de matière et d'énergie entre le peuplement végétal et son environnement

physique. L'objectif initial était de pouvoir estimer la productivité primaire des peuplements végétaux, c'est-à-dire l'accumulation de biomasse, et la contribution de ceux-ci aux échanges hydriques avec l'atmosphère, c'est-à-dire l'évapotranspiration. Pour cela, il importait de pouvoir établir un bilan net des échanges d'énergie et de matière entre le peuplement et son environnement externe en considérant le *continuum* sol-végétation-atmosphère. La source d'énergie principale étant le rayonnement solaire, il importait avant tout de caractériser et de quantifier l'absorption de cette énergie par le peuplement végétal pour ses deux composantes :

- le rayonnement global (R_g) déterminant en grande partie la demande évaporatoire par sa fraction transmise au sol et la demande transpiratoire par sa fraction absorbée par la végétation ;
- le rayonnement visible actif pour la photosynthèse (Par , *photosynthetically active radiation*) dont la fraction absorbée par la végétation détermine la photosynthèse brute du couvert végétal, c'est-à-dire sa capacité à capter et à assimiler le CO_2 atmosphérique.

L'établissement d'un tel bilan radiatif du peuplement végétal pouvait être réalisé expérimentalement par l'utilisation de capteurs appropriés, disposés au-dessus de la végétation et au niveau du sol afin de mesurer les différentes composantes du bilan (*figure 2.1*) : le rayonnement incident (R_0) direct et diffus, le rayonnement transmis au sol (R_t) et sa part réfléchi vers la végétation (R_{tr}), enfin le rayonnement réfléchi vers l'atmosphère (R_r), afin d'en déduire le rayonnement intercepté par la végétation (R_{int} , exprimé en MJ/m^2) :

$$R_{int} = R_0 - R_t \tag{1}$$

ou le rayonnement absorbé (R_{abs}) par la végétation :

$$R_{abs} = R_0 + R_{tr} - R_t - R_r \tag{2}$$

soit pour le rayonnement global R_g soit pour sa composante visible, le Par (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1974). La modélisation de ces bilans a nécessité

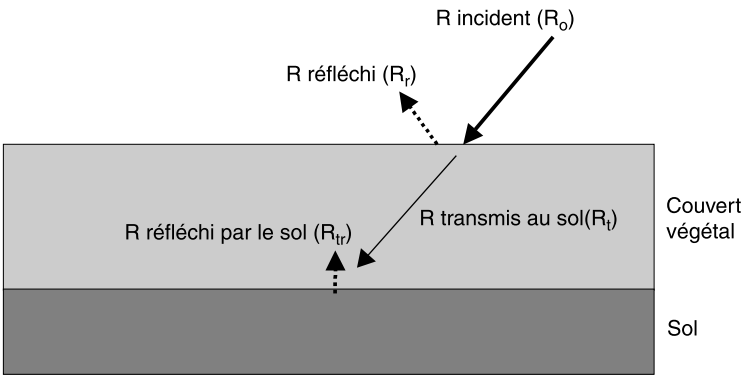


Figure 2.1. Représentation du bilan radiatif d'un peuplement végétal, soit pour le rayonnement global R_g , soit pour sa composante « visible » utile à la photosynthèse.

d'assimiler le peuplement végétal par analogie à un milieu poreux diffusant homogène, ce qui permet d'appliquer la loi de Beer-Lambert (Monsi et Saeki, 1953) et d'estimer ainsi les composantes du bilan à partir d'une caractérisation des propriétés géométriques du couvert végétal : densité des surfaces foliaires, orientation angulaire verticale des feuilles et propriétés optiques des surfaces foliaires (réflectance, absorbance et transmittance) vis-à-vis des gammes de longueur d'onde considérées R_g ou Par (Bonhomme et Varlet-Grancher, 1977).

Flux de carbone entre le peuplement végétal et l'atmosphère

L'estimation et la mesure des composantes du bilan radiatif dans le domaine visible (Par) ont permis le développement d'une approche de la photosynthèse d'un couvert végétal, c'est-à-dire du flux de CO_2 assimilé par la végétation. Pour cela, le couvert végétal est décomposé en tranches horizontales de densité de surface foliaire homogène au sein desquelles peuvent être estimées les composantes du bilan radiatif Par . À ces surfaces foliaires considérées globalement (*big leaf*) est appliqué un modèle de réponse de l'unité de surface foliaire à l'intensité d'éclairement. Ce modèle permet de prendre en compte les différents paramètres de la diffusion du CO_2 (résistance stomatique, résistance mésophyllienne, concentration interne, etc.), et des processus biochimiques de l'assimilation du carbone : efficacité quantique, activité de la rubisco, etc. (Chartier, 1966 ; Farquhar *et al.*, 1980). La photosynthèse du peuplement végétal est alors calculée par intégration des couches successives sous l'hypothèse d'homogénéité horizontale du couvert végétal (figure 2.2). Les pertes respiratoires de CO_2 du couvert végétal sont estimées par l'ordonnée à l'origine de la courbe de réponse de la feuille à l'éclairement ; elles sont donc intégrées également sur l'ensemble du couvert végétal, ce qui permet d'estimer la photosynthèse nette du couvert végétal, c'est-à-dire le bilan des échanges de CO_2 entre le couvert végétal et l'atmosphère. Cette approche comporte cependant une incertitude importante, qui est de ne pas prendre en compte des pertes de CO_2 dues à la respiration racinaire. En effet, il est très difficile de discriminer expérimentalement, dans le flux de CO_2 en provenance du sol, la part de la respiration des racines de celle des autres composantes biologiques du sol. L'utilisation d'un témoin « sol nu » n'est qu'un pis-aller, car la présence des racines dans un sol et leur activité s'accompagne d'une prolifération de micro-organismes rhizosphériques qui contribuent à la respiration propre du sol. Seules des techniques de traçage isotopique permettent d'appréhender ce problème (Nguyen *et al.*, 1999). Pour un couvert de fétuque élevée, Bélanger *et al.* (1994) ont montré que la respiration et l'exsudation racinaires pouvaient correspondre ensemble à une perte de carbone équivalant à 20 % de la photosynthèse brute.

Il est possible d'établir expérimentalement une courbe de réponse de la photosynthèse brute (P_b , en $\mu mol CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) d'un couvert végétal à l'éclairement (Gastal et Bélanger, 1993) :

$$P_b = P_{max} [1 - \exp(-c \cdot Par)] \quad (3)$$

avec P_{max} = photosynthèse brute maximale à Par saturant, et c = coefficient d'ajustement. La pente initiale de la courbe égale à $(P_{max}c)$ représente l'efficacité quantique (LY_{max}), ou rendement lumineux. De plus, il est possible de déterminer ces

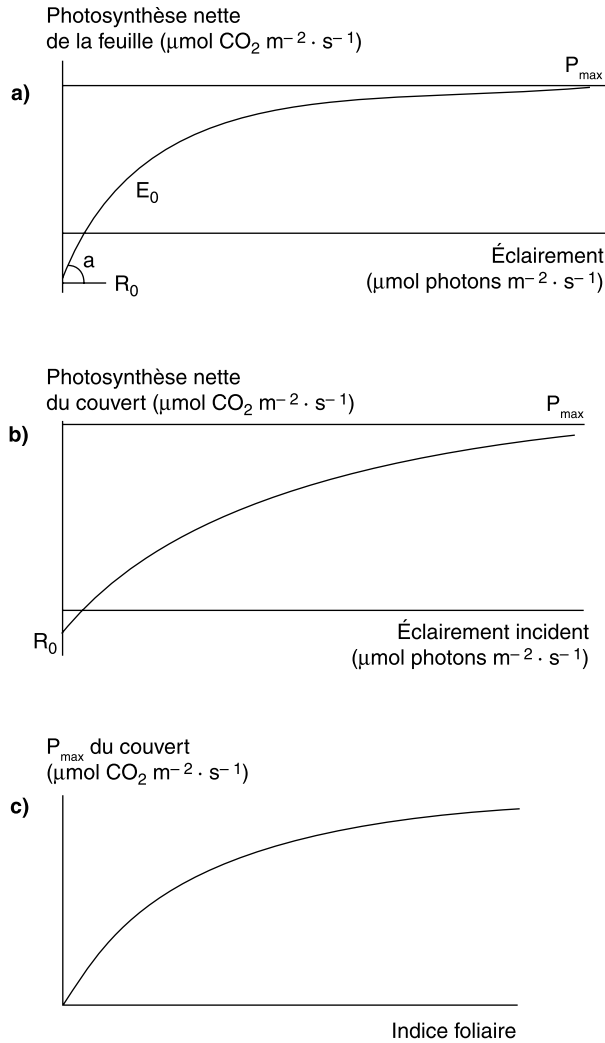


Figure 2.2. (a) Courbe de réponse de la photosynthèse de la feuille à l'éclairement. $P_{\max}$: photosynthèse nette maximale à éclairement saturant ; E_0 : éclairement au point de compensation ; R_0 : respiration obscure ; a : efficacité lumineuse. (b) Courbe de réponse de la photosynthèse nette du couvert végétal à l'éclairement incident. (c) Réponse du $P_{\max}$ d'un peuplement à l'évolution de l'indice foliaire.

courbes de réponse de $P_{\max}$ au cours du développement du couvert végétal en fonction de son indice foliaire — voir *figure 2.2 (c)*. On observe une augmentation moins que proportionnelle de la photosynthèse maximale avec l'indice foliaire. La même démarche entreprise sur $LY_{\max}$ (Gastal et Bélanger, 1993) indique également une augmentation moins que proportionnelle de l'efficacité quantique avec le développement de l'indice foliaire. Cette démarche constitue un changement d'échelle depuis celle de la feuille, et même de l'organite (chloroplaste, stomate), à celui du couvert végétal (population de feuilles considérée comme une surface d'échange), directement, sans passer par l'échelle de l'organisme entier qui est celui

de la plante individuelle. Cette approche « saute » un niveau d'organisation (la plante) et ne permet pas d'explicitier certaines régulations de la photosynthèse par les relations sources-puits au sein de la plante individuelle, comme nous le verrons.

Monteith (1977) et Varlet-Grancher et Bonhomme (1974) ont développé une approche permettant de décomposer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en biomasse par un peuplement végétal (ϵ) en :

- une efficacité climatique (ϵ_c) correspondant au rapport entre l'énergie incidente dans le spectre visible (Par) et l'énergie solaire incidente totale (R_g) ;
- une efficacité d'absorption (ϵ_a) correspondant au rapport entre le Par absorbé par le couvert végétal et le Par incident ;
- une efficacité biologique (ϵ_b) correspondant au rapport de l'énergie contenue dans la biomasse élaborée (MS_j) et le Par absorbé journalier (Par_a) :

$$\epsilon = (C \cdot \text{MS}_j) / R_{gj} \quad (4)$$

$$\epsilon = \epsilon_c \cdot \epsilon_a \cdot \epsilon_b \quad (5)$$

soit :

$$(C \cdot \text{MS}_j) / R_{gj} = \epsilon_c \cdot \epsilon_a \cdot \epsilon_b \quad (6)$$

avec C = capacité calorifique de la biomasse et R_{gj} = rayonnement solaire global journalier.

$$\text{Avec :} \quad \epsilon_c \cdot \epsilon_a \cdot R_{gj} = \text{Par}_a \quad (7)$$

$$\text{d'où :} \quad (C \cdot \text{MS}_j) = \epsilon_b \text{ Par}_a \quad (8)$$

$$(\text{MS}_j) = (\epsilon_b / C) \text{ Par}_a \quad (9).$$

ϵ_b / C a la dimension d'une biomasse produite par unité d'énergie absorbée par le couvert végétal ($\text{kg MS} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1}$) et est appelé communément en anglais « *radiation use efficiency* » (RUE).

Cette approche a été largement utilisée sur de nombreuses espèces cultivées (Monteith, 1977 ; Gosse *et al.*, 1986). La distinction entre les processus de captation de l'énergie solaire (ϵ_a) et les processus de conversion de celle-ci en biomasse végétale (ϵ_b) a fourni un cadre conceptuel pour l'analyse des effets du milieu et du génotype sur la croissance en biomasse des peuplements végétaux. La surface foliaire développée par le couvert végétal par unité de surface, c'est-à-dire l'indice foliaire (IF), ou « *leaf are index* » (LAI) en anglais, est la variable clef pour quantifier les phénomènes d'absorption ou d'interception. Pour un couvert homogène sur le plan horizontal, l'efficacité d'absorption (ϵ_a) augmente de façon asymptotique avec l'indice foliaire jusqu'à une valeur maximale ($\epsilon_{a, \text{max}}$) correspondant à l'extinction totale du rayonnement transmis au sol et dépendant des propriétés optiques des feuilles (albédo du couvert végétal dans le Par). On peut alors relier ϵ_a à l'indice foliaire par la relation empirique suivante (figure 2.3) :

$$\epsilon_a = \epsilon_{a, \text{max}} (1 - e^{-K \cdot \text{IF}}) \quad (10)$$

avec K (coefficient d'extinction de la lumière), paramètre empirique intégrant la structure du couvert végétal (port dressé vs port horizontal des feuilles), la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, et le rapport diffus/direct dans le rayonnement Par incident. Lorsque ϵ_a est intégré sur une journée, et *a fortiori* sur une période plus

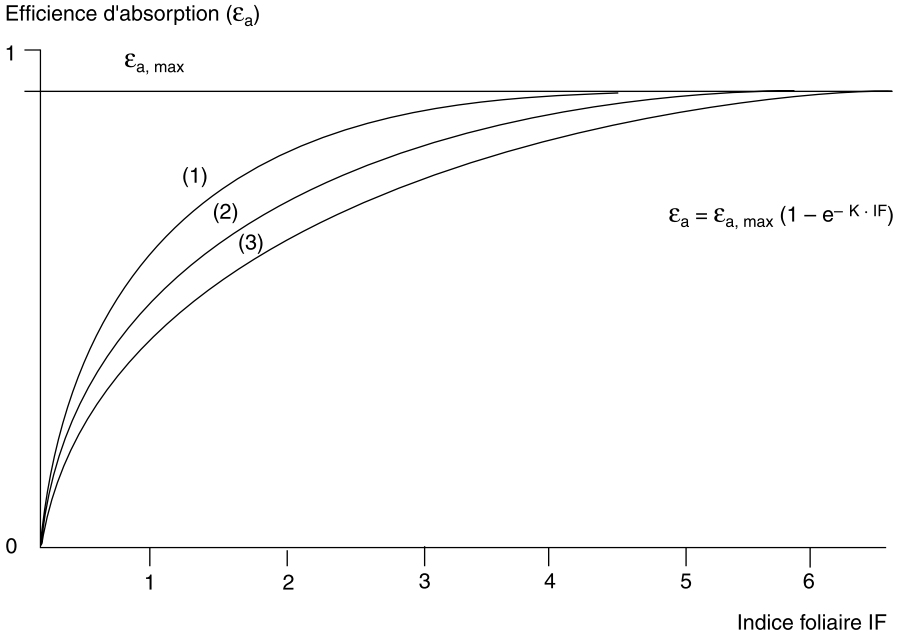


Figure 2.3. Efficience d'absorption du Par incident par un couvert végétal en fonction de son indice foliaire, pour différentes valeurs de K , depuis des ports de feuilles horizontaux jusqu'à des ports de feuilles verticaux.

longue, le poids des paramètres de la structure du couvert végétal devient prépondérant, et il est alors possible de caractériser les différentes espèces cultivées par leur valeur moyenne de K , qui peut varier d'une valeur de 0,86 pour une espèce à feuilles horizontales comme la luzerne (Gosse *et al.*, 1982) à 0,6 pour des espèces à port dressé comme le maïs par exemple. Cette démarche a permis une analyse plus détaillée et hiérarchisée des effets des contraintes du milieu (température, alimentation hydrique, nutrition minérale) et des pratiques culturales (dates et densité de semis, écartement entre rangs, etc.) susceptibles d'agir sur la production de biomasse, en permettant de séparer les effets sur les processus de captation (développement de l'indice foliaire) des effets sur les processus de conversion (photosynthèse, respiration, répartition des assimilats), et en explicitant les interactions entre ces deux ensembles d'effets. Ainsi, un déficit d'alimentation hydrique entraîne un ralentissement du développement foliaire bien avant de ralentir l'assimilation du carbone, comme cela a été montré sur la luzerne (Durand *et al.*, 1989). De même, une diminution de nutrition azotée a un effet beaucoup plus marqué sur la croissance foliaire (absorption du Par) que sur son efficacité de conversion en biomasse (ϵ_b/C), comme cela a été montré sur la fétuque élevée. Les faibles températures agissent également fortement sur le développement foliaire, et à un degré moindre sur l'assimilation du carbone (Gosse *et al.*, 1986).

L'une des hypothèses fortes fondatrices de la démarche est celle de la constance de l'efficacité biologique sur des périodes de temps longues. En effet, pour une espèce donnée, ϵ_b/C apparaît relativement constant, au moins durant la phase de

croissance végétative d'une culture (Gallagher et Biscoe, 1978 ; Gosse *et al.*, 1986). De plus, ϵ_b/C apparaît également très peu différent statistiquement pour des espèces du même groupe métabolique, C_3 ou C_4 (Gosse *et al.*, 1986) (figure 2.4). Cependant, la représentation d'une valeur moyenne de ϵ_b/C par cumul des valeurs de Par_a et de MS_j sur une longue période tend à occulter les variations de ϵ_b au cours du temps (Varlet-Grancher *et al.*, 1982). Ces variations correspondent souvent à des modifications phénologiques et des changements de phases de développement des cultures (Lecœur et Ney, 2003). Elles peuvent être dues à des régulations sources-puits au sein de la plante entière, la capacité d'assimilation du carbone par les plantes pouvant être amplifiée durant les phases de très forte croissance. À ces variations ontogéniques de RUE peuvent s'ajouter des variations du niveau d'éclairement. La courbe de réponse de la photosynthèse du couvert végétal au niveau d'éclairement étant curvilinéaire et asymptotique, les forts éclaircissements engendrent des ϵ_b/C en moyenne plus faibles que des éclaircissements plus modérés, comme l'illustre la figure 2.2 (b). De plus, l'augmentation de la part de diffus dans le Par incident tend à augmenter ϵ_b/C (Sinclair *et al.*, 1992). Cependant, ϵ_b/C dépend du bilan journalier photosynthèse-respiration et est, de ce fait, sensible à la durée de l'éclairement journalier, ce qui engendre des variations saisonnières (tableau 2.1). L'efficacité biologique est également sensible aux facteurs de l'environnement tels que la température (Andrade *et al.*, 1993), le déficit de pression de vapeur (Stockle et Kiniry, 1990) ou le déficit d'alimentation en eau (Whitfield, 1993), et la nutrition azotée (Sinclair et Horie, 1989 ; Bélanger *et al.*, 1994). Enfin, les résultats ci-dessus étant obtenus à partir de mesures de la matière sèche aérienne uniquement,

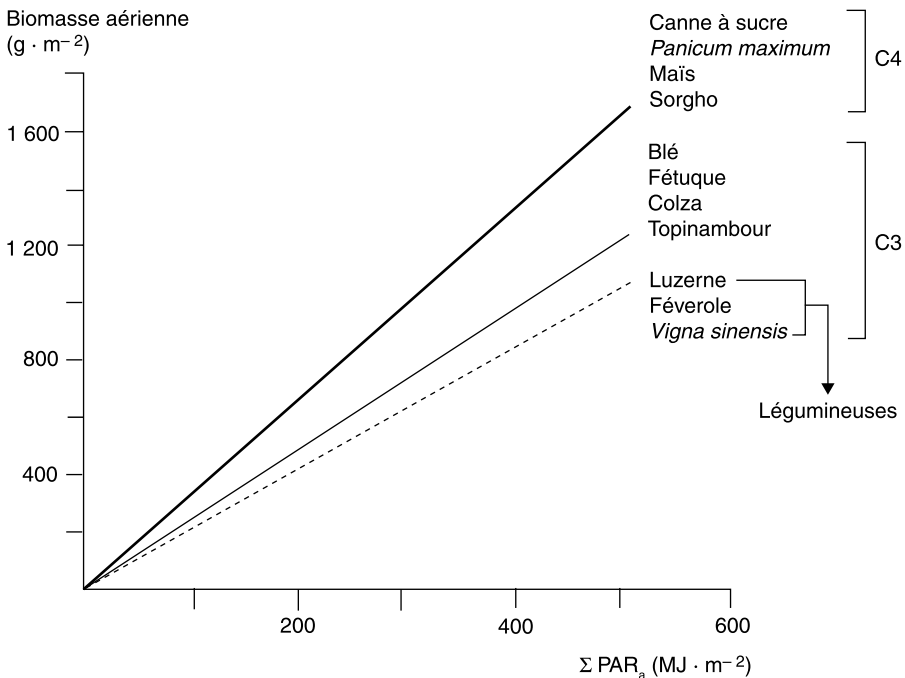


Figure 2.4. Accumulation de matière sèche aérienne de divers peuplements végétaux de types C3 ou C4 en fonction de la quantité de Par absorbé (Gosse *et al.*, 1986).

l'estimation des ϵ_b / C qui en découle prend en compte également l'effet direct du milieu sur la répartition de la matière sèche entre les racines et les parties aériennes. Ainsi, Bélanger *et al.* (1994) ont pu montrer que le principal effet de la nutrition azotée était bien une modification du rapport biomasse aérienne/biomasse racinaire, et que l'efficacité biologique pour la biomasse totale n'était que faiblement affectée (tableau 2.1). Khaity et Lemaire (1992) ont montré sur la luzerne que ϵ_b / C calculé sur la biomasse totale (aérien + souterrain) était beaucoup plus stable entre saisons que celui calculé uniquement à partir de la biomasse aérienne. Ce type de données est cependant assez rare du fait de la difficulté de mesure de la biomasse racinaire.

Tableau 2.1. Effet de la saison de croissance et de la nutrition azotée sur l'efficacité de conversion du Par intercepté (RUE) par un couvert de fétuque élevée (*Fetuca arrundinacea*) exprimé soit en biomasse aérienne (RUEa), soit en biomasse totale (RUEt), soit en photosynthèse nette (RUEpn), soit en photosynthèse brute (RUEpb). Source : Bélanger *et al.*, 1994.

Saison	N (kg · ha ⁻¹)	RUEa (g MS · MJ ⁻¹)	RUEt (g MS · MJ ⁻¹)	RUEpn (g MS · MJ ⁻¹)	RUEpb (g MS · MJ ⁻¹)
Été	0	0,69	1,07	1,86	3,74
	80	1,38	1,97	3,33	4,57
	240	1,80	2,35	3,47	5,26
Automne	0	0,69	1,08	2,25	5,91
	40	1,10	1,74	2,51	5,83
	160	1,68	2,32	2,49	5,83
Printemps	0	1,12	1,78	3,17	4,82
	60	1,73	2,28	3,29	5,03
	120	2,07	2,56	3,34	5,05
	180	2,21	2,65	3,83	5,62

La constance du paramètre C (capacité calorifique de la biomasse) peut également être remise en cause à certaines phases du développement sur certaines espèces. Si une valeur commune et constante de $16 \text{ à } 18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{ MS}$ (Varlet-Grancher *et al.*, 1982) peut être admise pour les phases de croissance végétative lorsque la plante élabore essentiellement de la cellulose et de la lignine et pour les espèces qui accumulent essentiellement de l'amidon dans leurs graines, des valeurs plus élevées peuvent être obtenues lors du remplissage des graines riches en protéines ou en lipides pour les oléoprotéagineux ($20 \text{ à } 22 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{ MS}$). Ces variations de la valeur de C doivent être prises en compte dans les calculs de ϵ_b / C et dans les comparaisons entre espèces.

L'approche énergétique de la conversion de l'énergie solaire en biomasse par un peuplement végétal a permis d'aborder de manière plus fonctionnelle l'effet des facteurs du milieu et des facteurs génétiques sur la croissance en masse des peuplements végétaux. Il s'agit donc d'une approche intégrative qui est réalisée à l'échelle d'un peuplement. Rien *a priori* n'empêche un changement d'échelle au niveau de la

plante individuelle, isolée ou en peuplement, si ce n'est la difficulté qu'il y a alors à estimer le rayonnement absorbé par la plante individuelle, ce qui requiert alors une approche de sa structure en trois dimensions. Comme nous l'avons vu, la limite de cette approche réside davantage dans le fait qu'elle ne s'applique en toute rigueur qu'à l'accumulation de biomasse totale, et qu'elle ne permet en aucune manière de considérer la répartition de la biomasse entre les différents compartiments morphologiques des plantes — feuilles, tiges, racines, graines ou fruits ou tubercules. Il s'agit là d'un handicap sérieux pour les approches à caractère agronomique qui visent à estimer ou à simuler la biomasse récoltable. Néanmoins, même pour une approche stricte d'écophysiologie visant à simuler la productivité primaire d'un peuplement végétal, le problème de la répartition des assimilats au sein d'une plante reste fondamental. En effet, dans cette approche, l'allocation des assimilats pour la croissance foliaire, et donc la dynamique du développement de l'indice foliaire, est primordiale puisqu'elle détermine la quantité de rayonnement absorbé par le couvert végétal.

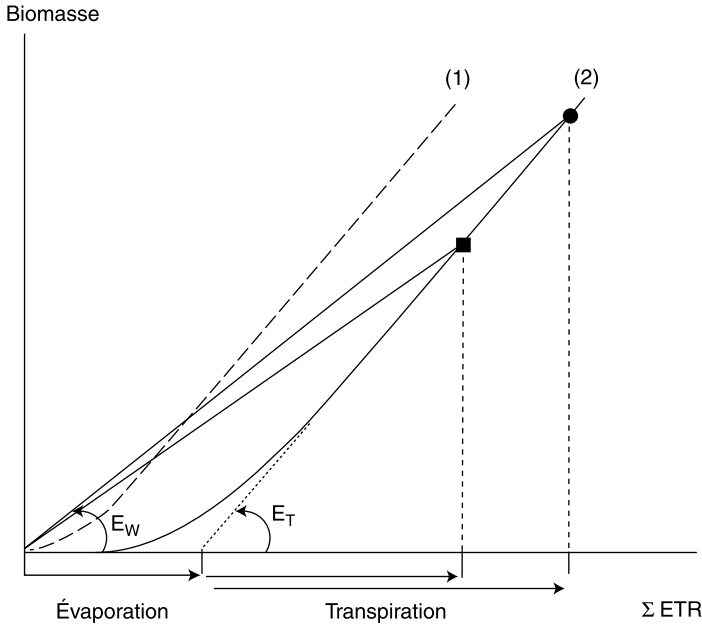
L'eau et le peuplement végétal : flux et efficience pour la production de biomasse

L'eau est un facteur essentiel à la production végétale. Elle a plusieurs fonctions au sein de la plante (Jones, 1992). Outre l'importance de l'eau constitutive des tissus, elle est le vecteur de transport de toutes les substances nécessaires au fonctionnement de la plante. Enfin, elle a un rôle essentiel dans le maintien d'une température de la plante compatible avec son métabolisme, grâce à la transpiration. Cette dernière fonction est de loin la plus consommatrice d'eau et participe du bilan d'énergie (cf. ci-dessus) au travers des transports de chaleur latente. Si l'on ajoute à ces derniers les transports de chaleur sensible, on obtient la composante advective du bilan d'énergie. Là encore, une analogie physique assimilant le *continuum* sol-végétation-atmosphère à un milieu conducteur pour l'eau a permis d'appliquer le formalisme de la loi d'Ohm et de dégager deux concepts fondamentaux : celui de potentiel hydrique et celui de résistance. Ces deux concepts permettent d'estimer le flux hydrique entre deux points quelconques du *continuum* sol-végétation-atmosphère (Ritchie, 1981). Il est rapidement apparu que la résistance stomatique, liée à la régulation de l'ouverture des stomates des feuilles par les plantes en fonction de l'environnement — et plus particulièrement en fonction de leur état hydrique —, est un moyen important pour elles d'ajuster leur flux transpiratoire à leur flux d'absorption racinaire et à la demande climatique. L'extension à l'échelle du peuplement du concept de résistance stomatique — régulation biologique à l'échelle de l'organe — a permis d'établir un formalisme générique d'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) des peuplements végétaux, en déterminant une résistance stomatique « équivalente » pour un couvert végétal. L'ETR recouvre à la fois la transpiration de la plante et l'évaporation du sol. La résistance stomatique du couvert est une propriété émergente du couvert végétal, autoréglant son flux d'eau vers l'atmosphère en fonction des potentiels hydriques appliqués aux bornes du système sol-végétation-atmosphère. Cette approche a été formalisée par Penmann et Monteith (Jones, 1992). Il s'agit là d'un véritable changement d'échelle à partir d'une fonction de régulation qui s'exerce au niveau de la plante individuelle et son extension au peuplement végétal sous forme d'analogie physique.

L'estimation simultanée et parallèle du flux d'eau consommé par un couvert végétal (ETR) et du flux net de carbone assimilé, c'est-à-dire de la biomasse produite (MS) (si l'on admet une concentration moyenne constante de $0,44 \text{ g C} \cdot \text{g}^{-1} \text{ MS}$) permet de calculer une efficacité d'utilisation de l'eau E_w :

$$E_w = \Sigma \text{ MS} / \Sigma \text{ ETR} \quad (11).$$

Cette approche peut être mise en œuvre à différentes échelles de temps et d'espace. Les incréments de ETR et de MS peuvent être estimés de manière quasi instantanée (seconde ou minute) ou intégrés à des pas de temps allant de la journée au cycle cultural complet. Le rapport entre ces deux composantes influence considérablement la valeur de E_w (*figure 2.5*). L'efficacité globale d'utilisation de l'eau d'une culture a donc tendance à augmenter au cours du développement de la culture, au fur et à mesure que la part de la transpiration du couvert végétal devient prépondérante du fait de la diminution progressive de l'énergie solaire transmise au sol. L'approche agronomique globale de l'efficacité de l'utilisation de l'eau à l'échelle du système sol-végétation-atmosphère doit donc intégrer la variabilité de la composante « évaporation du sol ». Cette dernière est fonction de la dynamique de développement de l'indice foliaire de la culture et de l'état hydrique des couches superficielles du sol. De plus, comme indiqué sur la *figure 2.5*, une culture ayant une croissance en biomasse importante aura tendance à avoir une forte efficacité globale d'utilisation de l'eau, ce qui ne permet pas de prendre ce critère d'efficacité comme base de comparaison entre espèces et génotypes. Pour avoir une analyse plus pertinente de l'efficacité d'utilisation de l'eau par les espèces végétales et/ou les génotypes, il convient donc de se limiter à la composante « transpiration » E_T puisque, par définition, l'efficacité de l'évaporation du sol est nulle. Il devient alors nécessaire d'effectuer un changement d'échelle, du peuplement (sol-végétation-atmosphère) à la feuille, puisque c'est au niveau de cet organe que le flux d'eau transpirée et le flux de carbone assimilé sont corégulés. Il est alors possible soit de mesurer directement ces flux, soit de les estimer en utilisant la relation fonctionnelle entre l'efficacité de transpiration de la feuille E_T et la discrimination isotopique du carbone assimilé : $\delta^{13}\text{C}$ (Farquhar et Richards, 1984). Les processus de diffusion et de carboxylation discriminent différemment l'isotope lourd ^{13}C . La discrimination isotopique traduit ainsi la part relative de l'eau utilisée pour l'élimination de la chaleur latente ou pour l'activité photosynthétique. Il y a une relation négative entre $\delta^{13}\text{C}$ et E_w . Cette méthode peut être mise en œuvre à l'échelle de la plante au sein d'un peuplement, car le $\delta^{13}\text{C}$ de sa biomasse totale est révélateur de l'efficacité moyenne de transpiration sur toute la durée de croissance correspondante. Cette méthode a été utilisée pour comparer la performance des différentes espèces et des différents génotypes dans des milieux à fortes contraintes hydriques. Il est possible d'utiliser cette approche sur des incréments de temps plus courts si l'on est capable d'échantillonner sur la plante la biomasse élaborée durant un intervalle Δt , comme par exemple pour les cernes annuels des arbres (Guehl *et al.*, 1993), et d'étudier l'évolution de E_T en fonction de facteurs environnementaux. L'efficacité de l'eau peut donc être étudiée à différentes échelles d'organisation — organe, plante, peuplement — selon les objectifs poursuivis — agronomique, écologique, physiologique ou génétique —, la connexion entre ces différentes échelles n'étant pas du simple domaine de l'intégration temporelle ou spatiale.



- et ■ : variations d'ETR engendrant une variation de E_W pour un E_T constant.
- (1) : culture rapidement couvrante, ou dont le sol reste sec en surface.
- (2) : culture à couverture lente du sol, ou dont le sol est fréquemment réhumecté par des pluies en début de cycle.

Figure 2.5. Représentation de la dynamique de croissance d'une culture en fonction de sa consommation en eau, et distinction entre la part de l'évaporation du sol et de la transpiration du couvert végétal.

Des modèles globaux de simulation de croissance des peuplements végétaux ont été basés sur l'hypothèse d'une certaine constance de E_W lorsque cette variable est intégrée sur un cycle de culture ou une période assez longue. Avec une estimation de l'ETR, il est alors possible d'estimer la production primaire correspondant comme suit :

$$MS = E_W \cdot ETR \quad (12).$$

Cette approche n'est pertinente que lorsque la composante « évaporation du sol » reste faible, comme dans le cas des forêts ou des prairies, et elle est sujette à erreur dans le cas des cultures annuelles.

►► L'approche fonctionnelle

L'approche précédente a été très largement utilisée dans les modèles de culture pour prévoir la production primaire des couverts végétaux. Si elle permet une estimation des besoins en eau d'un couvert par exemple — utile pour piloter l'irrigation —,

elle ne peut en aucun cas donner des informations sur l'état instantané de la plante vis-à-vis de son alimentation hydrique. De la même façon, et pour un autre facteur important de la production agricole — l'azote —, elle ne peut conduire à la prédiction des besoins d'un couvert végétal sans comprendre comment ce facteur de la production est absorbé et utilisé. Enfin, mis à part la production fourragère dont le rendement est la biomasse, les organes récoltés ne représentent souvent qu'une partie de cette biomasse. La quantification du partage de cette biomasse entre organes d'échange avec le milieu (feuilles, racines), de soutien des structures (tiges) et reproducteurs (graines, fruits) est alors nécessaire.

Pour ces différentes raisons, une approche tenant compte des processus physiologiques et métaboliques au sein de la plante, isolée ou en peuplement, donc fonctionnelle, devient nécessaire. Nous proposons d'illustrer cette approche complémentaire de la précédente à travers :

- l'étude de l'impact de la contrainte hydrique sur le fonctionnement de la plante et des couverts, et ses implications dans l'élaboration d'indicateurs de déficit hydrique ;
- la compréhension des rapports entre assimilation et utilisation du carbone et de l'azote par le peuplement végétal et leur répartition dans le couvert. Les fondements théoriques de cette répartition conduisent à l'explicitation de la « dilution » de l'azote dans la biomasse d'un couvert, et pratiquement à la détermination d'un indice de satisfaction des besoins en azote pour la croissance ;
- l'analyse de la répartition des assimilats entre les différents organes constituant la plante à l'aide de l'approche morphogénétique ; celle-ci conduit à la modélisation de l'élaboration du rendement de la plupart des espèces cultivées.

Caractérisation et indicateurs du statut hydrique instantané de la plante

Tous les processus de la plante sont affectés par un déficit hydrique, que ce soit le métabolisme, l'organogenèse (production d'organe par les méristèmes) et la morphogenèse (phénomène de différenciation et de croissance aboutissant à des organes matures) (Hsiao, 1973). Des exemples non exhaustifs sont donnés, en distinguant les réponses à court terme affectant généralement le métabolisme des réponses à long terme affectant la structure de la plante. Toutefois, il est possible d'ordonner ces réponses autour de quatre axes :

- limiter les pertes en eau par une réduction de la densité de flux, notamment la réduction de l'ouverture des stomates ;
- limiter les pertes en eau par une réduction de la surface d'échange, au travers de la taille et du nombre des feuilles ou de leur enroulement ;
- augmenter l'acquisition des ressources en eau grâce à l'exploration racinaire du sol ;
- éviter la déshydratation des tissus ou en limiter ses effets par un ajustement osmotique ou par la production de protéines de choc thermique qui protègent les organites et les membranes.

Ces types de réponses se manifestent dans l'ordre précisé ci-dessus lors du dessèchement progressif du sol. Suivant l'intensité du déficit, tout ou partie de ces

réponses se produisent. La première peut apparaître en quelques minutes lors d'un déficit temporaire et réversible, tandis que les autres nécessitent de plusieurs heures à plusieurs jours et sont irréversibles lorsqu'elles affectent la structure de la plante. Pour les trois premiers types de réponse, les tissus de la plante ne subissent pas d'altération de leur contenu en eau. Le métabolisme de la plante à l'échelle cellulaire n'est pas affecté, et les effets du déficit hydrique résultent d'une réduction des flux d'eau. La plante subit alors une contrainte hydrique. Pour le dernier type de réponse, les tissus de la plante commencent à se déshydrater, provoquant un stress cellulaire qui affecte le métabolisme cellulaire. On parle alors de stress hydrique. Si le dessèchement du sol se poursuit après la mise en œuvre de l'ensemble de ces réponses, la plante peut mourir par déshydratation de ses tissus. Ces réponses, y compris transitoires, ont des effets induits indésirables comme la baisse de l'activité photosynthétique ou la perte d'organes végétatifs et reproducteurs qui affectent la production de biomasse et le rendement (Passioura, 1994). Dans le cadre de la production agricole en zone tempérée, la contrainte hydrique est beaucoup plus fréquente que le stress hydrique.

On peut classer les plantes en deux groupes, suivant que la régulation de la conductance stomatique tend à maintenir l'état hydrique des tissus ou non (Tardieu et Simonneau, 1998). Les plantes dites « isohydriques », comme le maïs, ferment rapidement leurs stomates lors d'un déficit hydrique. Ceci conduit à une économie de l'eau du sol disponible, mais entraîne une baisse précoce de la photosynthèse. Ce comportement est bien adapté à des déficits hydriques forts en fin de cycle. Il permet à la plante de pouvoir terminer son cycle sans subir un stress hydrique trop prononcé. Les plantes dites « anisohydriques », comme le tournesol, maintiennent tardivement leurs stomates ouverts. L'état hydrique des tissus de ces plantes tend à suivre celui du sol lorsque ce dernier se dessèche. Ce comportement « optimiste » est bien adapté à des situations caractérisées par des successions de déficits hydriques modérés et temporaires, parce qu'il permet de valoriser des ressources en eau fluctuantes sans limiter de manière précoce la photosynthèse. L'impact majeur du déficit hydrique reste une réduction de la production primaire par le couvert (Jones, 1992). Cette production est reliée au bilan photosynthétique du couvert qui dépend de la surface foliaire de ce dernier et de son activité photosynthétique par unité de surface foliaire. Un déficit hydrique affecte ces deux composantes au travers de processus différents dont l'importance dépend du niveau de ce déficit hydrique, de sa position dans le cycle et de sa durée. Le mode d'action du déficit hydrique sur ces deux composantes est donc un déterminant important de l'effet global du déficit hydrique sur la production primaire.

Chronologiquement, la première cause de limitation de l'activité photosynthétique par unité de surface est la réduction de la fourniture de CO_2 aux sites de carboxylation dans les chloroplastes (Jones, 1992). Cette limitation se produit très tôt lors du dessèchement du sol. Elle est la conséquence de la fermeture des stomates en réponse à des signaux hormonaux racinaires émis dès la perception du déficit hydrique (Zhang et Davies, 1990). Cette limitation de la fourniture en CO_2 n'est pas un mécanisme adaptatif, mais une conséquence de la réduction des pertes en eau du couvert. Elle est totalement réversible en quelques minutes lorsque la plante est à nouveau bien alimentée en eau. Lors de cette réduction de transpiration, la

diffusivité supérieure du CO_2 par rapport à celle de la vapeur d'eau permet un maintien temporaire de l'activité photosynthétique en retardant la baisse de la concentration en CO_2 de la chambre sous-stomatique. Lorsque le dessèchement du sol se poursuit, la dégradation de l'état hydrique interne des cellules entraîne une baisse de l'activité des enzymes de la photosynthèse, ainsi qu'une augmentation de la résistance au transport du CO_2 entre la chambre sous-stomatique et le mésophylle. L'enzyme prédominante dans la réponse au déficit hydrique est la rubisco, dont la concentration et l'activité déterminent la photosynthèse maximale (Jones, 1992). Enfin, pour un déficit hydrique sévère, la « machinerie » photosynthétique est détériorée du fait de dégradations de la structure quaternaire des enzymes et des photosystèmes (PSI et PSII), ainsi que par la modification des propriétés des membranes, notamment de leur perméabilité. Ces événements provoquent une forte chute de production de pouvoir réducteur au niveau cellulaire, et des désordres importants dans le métabolisme de la plante.

La taille des organes végétatifs, y compris des feuilles, est réduite par un déficit hydrique quelle que soit la période où il se produit au cours du développement de ces organes et quelle que soit son intensité (Lecœur *et al.*, 1995). Cela implique que même les organes microscopiques à l'état d'ébauche sont susceptibles d'être affectés par un déficit hydrique. Une autre conséquence est que les effets d'un déficit hydrique ponctuel s'exprimeront aussi longtemps que tous les organes présents au moment du déficit n'auront pas achevé leur expansion. Cela peut prendre plusieurs semaines, étant donnée la durée d'expansion des organes végétatifs. Un déficit hydrique affecte l'expansion d'un organe au travers de la rigidification des parois cellulaires et de la réduction de la pression de turgescence intracellulaire (Lockhart, 1965). Le premier effet est lié au changement de propriétés mécaniques des parois, en partie sous le contrôle d'une signalétique hormonale. Le second est un effet hydraulique lié à la diminution du contenu en eau des cellules. Ces effets entraînent une réduction de la vitesse d'expansion des tissus du fait d'une réduction de la vitesse d'expansion cellulaire et d'une réduction de la vitesse de division cellulaire. Dans le cas des déficits hydriques modérés, il ne s'agit pas d'un effet direct sur le cycle cellulaire : la réduction du rythme des divisions cellulaires est une conséquence de la réduction de la vitesse d'expansion. Pour les déficits hydriques sévères, cette réduction résulte du stress trophique et de l'altération générale du métabolisme cellulaire causés par une forte limitation de l'activité photosynthétique.

La surface photosynthétiquement active peut également être affectée par un déficit au travers de la réduction du nombre des organes et de leur durée de vie. Dans ce cas, c'est la phénologie des organes et non leur morphogenèse qui est déterminante dans la réponse au déficit hydrique. Chez certaines plantes, la réduction de surface foliaire en réponse à un déficit hydrique résulte majoritairement de la réduction du nombre d'organes de la plante (Belaygue *et al.*, 1996). Un déficit hydrique accélère également la sénescence de la surface photosynthétique en déclenchant précocement les mécanismes moléculaires de dégradation des protéines de la feuille (par exemple Pic *et al.*, 2002).

Connaître le déficit hydrique subi par une culture est essentiel pour en analyser l'impact. Malheureusement, il n'existe pas actuellement de variable universelle

facilement accessible caractérisant l'état hydrique d'un couvert (Turner, 1981). Cette caractérisation peut être abordée sous trois angles auxquels correspondent des variables spécifiques :

- mesures de l'état hydrique de la plante basées sur l'état énergétique de l'eau dans les tissus (potentiels hydrique, osmotique et de turgescence) ;
- mesures de l'état hydrique de la plante basées sur le contenu en eau des tissus (teneur en eau des tissus, teneur en eau relative des tissus) ;
- mesures des flux d'eau au sein de la plante (conductance stomatique, flux de sève).

Ces variables apportent des informations de natures différentes et sont complémentaires pour avoir une image de l'intensité du déficit hydrique subi et de la réponse de la plante. L'état énergétique de l'eau indique la difficulté pour la plante à acheminer l'eau vers ses organes. Le contenu en eau des tissus est bien relié à l'activité métabolique au niveau cellulaire (Jones, 1992). Quant aux variables mesurant les flux d'eau, elles sont des indicateurs de la perception précoce par la plante du déficit hydrique. La plupart de ces variables sont reliées quantitativement à l'état hydrique du sol. À l'origine de cette relation, il y a une signalétique hormonale racinaire (Zhang et Davies, 1990). Le dessèchement du sol induit la production et la décompartimentation d'acide abscissique dans les apex racinaires. Cette hormone migre alors vers les parties aériennes avec le flux xylémien, et est perçue par les parties aériennes comme un signal de déficit hydrique. La réponse de la plante, notamment en termes de réduction de la conductance stomatique et de l'expansion foliaire, est proportionnelle à la concentration de la sève xylémique en acide abscissique. Cette chaîne de réponse est à l'origine de la relation étroite entre la réponse de la plante et le déficit hydrique lors des premières phases de dessèchement du sol. Par la suite, l'impact du dessèchement du sol sur l'état hydrique de la plante explique ces relations pour des niveaux de déficit hydrique plus importants.

La caractérisation de l'état hydrique du sol apparaît ainsi comme un indicateur de déficit hydrique subi par la plante (Ritchie, 1981). Pour qu'il soit pertinent, cet indicateur doit être représentatif de l'état hydrique moyen du sol perçu par les racines. Deux variables permettent de caractériser cet état. La première est le potentiel hydrique de la plante en fin de nuit, ou « potentiel hydrique de base ». À ce moment, il n'y a plus de flux d'eau dans la plante depuis plusieurs heures. Cette dernière est en équilibre énergétique en tous ses points avec le potentiel hydrique moyen du sol. Ce potentiel représente donc bien une intégration de l'état énergétique moyen du sol perçu par la plante. La seconde variable est la quantité d'eau disponible dans la zone de sol explorée par les racines. Cette dernière peut être exprimée en valeur absolue, généralement en millimètres d'eau. On utilise cette expression lorsque l'on veut indiquer la quantité d'eau que le sol peut fournir pendant tout ou partie du cycle de la plante. On parle alors de la « réserve hydrique du sol » ou d'« état de la réserve utile » (voir partie 3). On considère généralement que la plante n'est pas capable d'extraire l'eau du sol si le potentiel hydrique de ce dernier est inférieur à $-1,5 \text{ MPa}^1$. Toutefois, cette manière d'exprimer l'eau du sol disponible ne permet pas d'avoir une idée du niveau de déficit hydrique perçu instantanément par la plante, parce que sa valeur dépend de la profondeur

1. Mégapascal.

d'enracinement. Pour pallier cet inconvénient, on peut exprimer cette quantité d'eau disponible relativement à la quantité maximale que le sol peut physiquement contenir. On parle alors d'« état de la réserve hydrique racinaire » ou de « fraction d'eau transpirable du sol » (Ritchie, 1981 ; Sinclair et Ludlow, 1986).

Ces deux variables ont été largement utilisées pour établir des relations quantitatives robustes entre le niveau de déficit hydrique et les fonctions essentielles de la plante comme la transpiration, la photosynthèse, l'expansion des tissus ou la production d'organes (Sinclair et Ludlow, 1986 ; Lecœur et Sinclair, 1996). Ces relations ont permis de comparer la sensibilité relative des processus, mais aussi celle des espèces (Sadras et Milroy, 1996). Ainsi, l'expansion des tissus est très généralement réduite plus précocement que l'ouverture des stomates. Pour ces mêmes processus, les monocotylédones sont moins sensibles que les dicotylédones pour l'expansion des tissus, tout en présentant la même sensibilité pour l'ouverture des stomates.

La répartition des assimilats dans la plante

Dynamique de croissance et prélèvement d'azote par un peuplement végétal

Comme nous l'avons vu précédemment, la production de biomasse végétale est directement liée à la fixation de CO_2 par le peuplement, du fait qu'en première approximation la concentration en carbone de la biomasse végétale peut être considérée comme constante, ainsi que les concentrations en oxygène et en hydrogène. En revanche, la concentration de la biomasse végétale en azote est susceptible de varier dans des gammes de 0,5 à 6 %. Ces variations entraînent bien évidemment des variations importantes du prélèvement d'azote par les peuplements végétaux. Des variations analogues, bien que de plus faible amplitude, sont également observables pour les autres minéraux constitutifs de la biomasse végétale tels que le phosphore, le potassium, le calcium, le manganèse. L'origine principale de ces variations réside dans la disponibilité de ces nutriments dans le sol. L'azote, du fait de son cycle biologique et des apports par la fertilisation, est le nutriment dont la disponibilité dans le sol varie le plus à court terme, ce qui explique en partie la grande variabilité de sa concentration dans la biomasse végétale. Cependant, Lemaire et Gastal (1997) ont montré que, même en situation de forte disponibilité en azote minéral dans le sol, la concentration en azote de la biomasse d'un peuplement végétal diminue au cours de sa croissance du fait d'une accumulation du carbone plus importante que l'azote, ce qui conduit à la « dilution » de l'azote dans la plante au cours de sa croissance. Cet effet de dilution a été mis en évidence sur un grand nombre d'espèces, et une formulation générale a pu être proposée :

$$N(\%) = a (W)^{-b} \quad (13)$$

avec $N(\%)$, teneur en azote de la biomasse aérienne du peuplement ; W , biomasse en $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$; a , teneur en azote pour $W = 1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$; et b , coefficient sans dimension.

De cette relation, il est possible de déduire la quantité d'azote prélevée par le peuplement :

$$N_{\text{exp}} (\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = 10 a (W)^{1-b} \quad (14)$$

le coefficient 10 étant nécessaire pour exprimer l'azote prélevé en $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. En situation de disponibilité constante du milieu en azote, le coefficient a varie avec le niveau de celle-ci, tandis que le coefficient b reste invariant. Il est alors possible de déterminer trois valeurs remarquables de a :

- une valeur maximale $a_{\max}$ qui est la teneur maximale en azote de la plante pour $W = 1$, et qui correspond à une saturation des capacités d'absorption d'azote par la plante ;
- une valeur minimale $a_{\min}$ qui correspond au minimum de concentration en azote nécessaire de la plante pour l'activité de croissance ;
- une valeur critique a_c qui correspond au minimum de concentration en azote de la plante pour une vitesse de croissance maximale.

Ces différentes valeurs de a déterminent des courbes correspondantes (*figure 2.6*). Les courbes correspondant à $a_{\max}$ et à $a_{\min}$ sont difficiles à déterminer expérimentalement au champ avec précision, car il est difficile de maintenir une saturation de la nutrition azotée constante dans le temps sur un cycle de culture, et impossible d'approcher la situation de nutrition minimale du fait de la fourniture d'azote par la minéralisation du sol. Ces deux valeurs $a_{\max}$ et $a_{\min}$ ne sont donc qu'approchées par l'ajustement de courbes-enveloppes encadrant les valeurs maximale et minimale observées (*figure 2.6*). En revanche, la valeur de a_c peut être déterminée par une approche plus rigoureuse en estimant, par l'ajustement des courbes de réponse à l'azote, la teneur en azote à partir de laquelle toute augmentation de disponibilité en azote se traduit par une augmentation de la concentration en azote sans augmentation significative de croissance en matière sèche correspondante, selon la méthode présentée à la *figure 2.6* (Justes *et al.*, 1994 ; Plénet et Lemaire, 2000). Cette approche a été réalisée sur diverses espèces C3 et C4. Les valeurs de a_c et de b correspondante sont présentées dans le *tableau 2.2*. On peut constater que, pour un groupe métabolique d'espèces donné — C3 ou C4 —, la variabilité de a_c est faible et que la valeur de b varie peu entre l'ensemble des espèces, avec une valeur moyenne très proche de $1/3$, soit de $2/3$ pour $1 - b$ (équation 13). La différence de a_c entre les espèces C3 et C4 est conforme à ce que l'on connaît de leur métabolisme, les feuilles des plantes C4 étant moins concentrées en azote. Il est possible, à partir de l'équation (14), de déterminer la demande en azote $(dN_{\text{exp}}/dt)_c$ d'un peuplement pour réaliser à chaque instant sa vitesse de croissance maximum $(dW/dt)_{\max}$ (Lemaire *et al.*, 2004) :

$$(dN_{\text{exp}}/dt)_c = 10 a_c (1 - b) W^{-b} (dW/dt)_{\max} \quad (15).$$

Ainsi, plusieurs conclusions s'imposent :

- la demande instantanée en azote d'un peuplement est proportionnelle à son maximum de croissance instantanée, les effets du milieu sur ce potentiel de croissance entraînent donc des effets équivalents sur la demande en azote ;
- le coefficient de proportionnalité entre potentiel de croissance et demande en azote décroît cependant avec l'augmentation de biomasse du peuplement, ce qui correspond à la « dilution » de l'azote dans la biomasse produite ;
- lorsque les espèces ou les génotypes d'un même groupe métabolique sont comparés à une même biomasse W , leurs différences de demande instantanée en azote sont essentiellement expliquées par leurs différences de vitesse de croissance du fait de la faible variation de a_c et de b entre espèces d'un même groupe

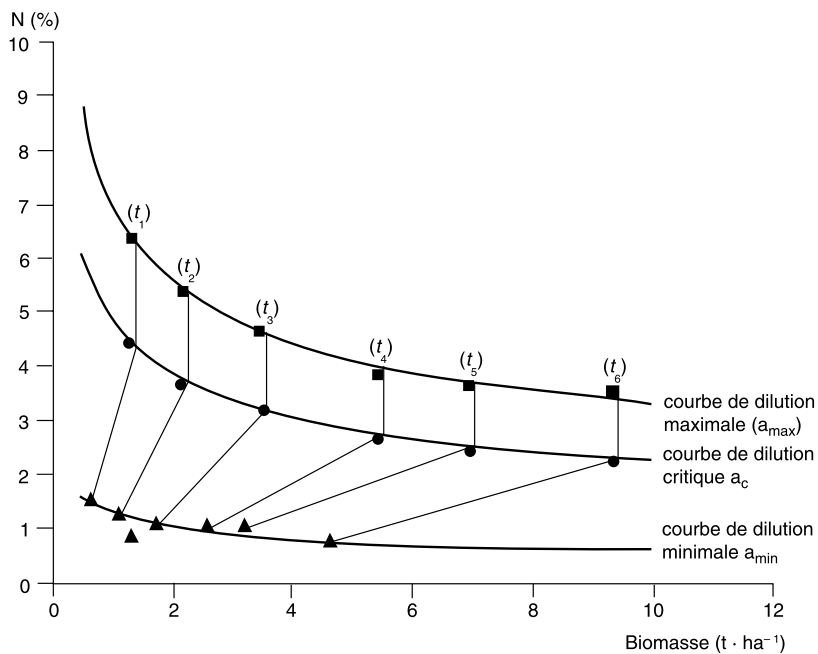


Figure 2.6. Courbes de dilution critique, maximale et minimale de l’azote pour un peuplement de plantes en C3. Les traits reliant les courbes représentent la réponse de la croissance à la nutrition azotée à différents moments de la croissance ($t_1, t_2, t_3, \dots$). Au-dessous de la courbe critique, les plantes s’enrichissent en azote et leur croissance augmente ; au-dessus, les plantes s’enrichissent en azote sans que leur croissance n’augmente.

Tableau 2.2. Valeurs des paramètres de la courbe critique de prélèvement d’azote : $N_{uc} = a(W)^{1-b}$ (équation 14) pour différentes espèces en C3 et en C4 (a en kg N · ha⁻¹ pour W en t · ha⁻¹).

Espèce	10a	b	Sources
Graminées C3	48	0,32	Lemaire et salette, 1984
Luzerne C3	48	0,33	Lemaire <i>et al.</i> , 1986
Pois C3	51	0,32	Ney <i>et al.</i> , 1997
Blé C3	53	0,44	Justes <i>et al.</i> , 1994
Colza C3	45	0,25	Colnenne <i>et al.</i> , 1998
Tomate C3	45	0,33	Tei <i>et al.</i> , 2002
Maïs C4	34	0,37	Plénet et Lemaire, 2000
Sorgho C4	39	0,39	Plénet et Cruz, 1997

métabolique ; il ne semble donc pas y avoir de variabilité génétique de la demande « intrinsèque » en azote, en dehors de celle correspondant au métabolisme C3 ou C4.

Il ressort de cette analyse que la dynamique de croissance en matière sèche d’un peuplement végétal et son prélèvement d’azote dans le milieu sont liés. Pour aller au-delà de cette relation corrélative, il convient d’effectuer un changement

d'échelle et de revenir au niveau de la plante. Comme l'ont rapporté Lemaire et Millard (1999), l'absorption d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) par les racines ainsi que la fixation de N_2 sont rétrocontrôlées par des signaux en provenance des parties aériennes. Interviennent ainsi une régulation positive liée à la nutrition en carbone et au flux d'assimilats vers les racines, et un *feed-back* négatif lié à la recirculation vers les racines d'azote organique non utilisé par la plante pour sa croissance ou pour une mise en réserves. Ce dernier signal est interprété comme un signal de « satiété » en azote (Lejay *et al.*, 1999 ; Forde, 2002). Ces deux signaux qui interagissent sont liés à la croissance de la plante. L'action de ces signaux sur les deux types de transporteurs de nitrate ou d'ammonium à forte ou à faible affinité (Glass *et al.*, 2002) est maintenant bien établie. Les transporteurs racinaires à haute affinité sont seuls actifs pour les faibles concentrations en azote dans la solution du sol, tandis que les transporteurs à faible affinité sont actifs et complètent ceux-ci pour des concentrations élevées. Ainsi, l'absorption de l'azote par une plante serait corégluée à la fois par l'offre, c'est-à-dire la disponibilité de l'azote dans le sol au contact des racines (concentration de la solution), et par la demande, c'est-à-dire la vitesse de croissance potentielle de la plante. Devienne-Barret *et al.* (2000) ont proposé une relation permettant de rendre compte de cette coréglulation :

$$dN_{\text{exp}} / dt = a_c (1 - b) W^{-b} (dW / dt)_{\text{max}} [V_H C / (K_H + C) + V_L C / (K_L + C)] \quad (16)$$

avec (V_H , K_H) et (V_L , K_L), constantes de la formule de Michaelis-Menten pour les deux systèmes de transport à haute et faible affinité respectivement ; et C , concentration en NO_3^- de la solution du sol. L'équation (12) mélange en fait une approche à l'échelle du peuplement qui reprend le formalisme de l'équation (11) pour définir la demande en azote, et une approche à l'échelle de la plante identifiant les constantes de Michaelis-Menten caractérisant le fonctionnement des transporteurs racinaires en fonction de l'offre. Il y a donc une extension de cette deuxième approche de l'échelle organe-plante entière à celle du peuplement, qui suppose qu'une caractéristique moyenne des transporteurs racinaires des plantes à l'échelle du peuplement ait un sens, et que la concentration du sol en nitrates soit spatialement uniforme. Ces deux hypothèses ne sont certainement pas valides au champ, et seules les vérifications expérimentales de ce modèle (Devienne-Barret *et al.*, 2000) permettent de s'assurer que les approximations effectuées par ce changement d'échelle restent acceptables.

La répartition de l'azote au sein du peuplement végétal et le changement d'échelle plante-peuplement

La dilution de l'azote dans la biomasse élaborée par un peuplement végétal apparaît comme une loi très générale indépendante de distinctions entre espèces, et *a fortiori* entre génotypes d'une même espèce. Il importait donc de dépasser l'approche empirique initiale et de rechercher les déterminants de la dilution, soit au niveau de la plante individuelle, soit au niveau d'une propriété émergente du peuplement végétal. Deux hypothèses pouvaient apporter une explication théorique à la dilution de l'azote.

Premièrement, les travaux de Hirose et Werger (1987) avaient montré que dans un peuplement végétal, la quantité d'azote par unité de surface de feuille n'était pas

uniformément répartie au sein du couvert, et qu'il existait un gradient depuis les feuilles du sommet les plus éclairées, plus riches en azote, vers les feuilles de la base ombrées, plus pauvre. On pouvait ainsi expliquer la baisse de teneur en azote d'un peuplement en même temps que croissait sa matière sèche par l'augmentation progressive de l'ombrage entre plantes voisines. Cette hypothèse était d'autant plus séduisante que cette répartition de l'azote dans le couvert végétal contribuait à optimiser la photosynthèse, et donc sa croissance en matière sèche. L'analyse de ce phénomène sur les peuplements de luzerne (Lemaire *et al.*, 1991) a permis de montrer que si ce phénomène est bien réel, il ne suffit pas à expliquer l'ampleur de la dilution, car les diminutions importantes de quantités d'azote par unité de surface foliaire entre les feuilles éclairées et les feuilles ombrées sont accompagnées de diminution parallèle de la masse surfacique des feuilles, ce qui atténue notablement l'effet lorsqu'il est exprimé en teneur en azote.

Deuxièmement, les travaux de Caloin et Yu (1984) puis de Greenwood *et al.* (1990) ont permis de tester l'hypothèse selon laquelle la plante était constituée de deux compartiments, l'un métabolique correspondant à la biomasse de la plante directement impliquée dans les processus de croissance W_m et ayant une teneur en azote $N_m(\%)$ élevée, et l'autre structural, correspondant à la biomasse inerte W_s et ayant de ce fait une concentration en azote $N_s(\%)$ faible. La teneur en azote d'une plante peut alors s'exprimer comme suit :

$$N(\%) = (1 / W) (N_m W_m + N_s W_s) \quad (17)$$

avec : $W = W_s + W_m \quad (18).$

Or par définition, seul le compartiment W_m étant actif, on peut écrire que la vitesse de croissance de la plante est proportionnelle à W_m :

$$dW / dt = K W_m \quad (19)$$

ou : $W_m / W = dW / (K W dt) \quad (20)$

ou, selon (17) et (18) : $N(\%) = (N_m - N_s) dW / K W dt + N_s \quad (21).$

Ceci implique donc une relation linéaire entre la teneur en azote d'une plante et sa vitesse de croissance relative, ce qui a été confirmé par plusieurs auteurs sur de nombreuses espèces (Greenwood *et al.*, 1991). Pour une plante isolée, si l'on admettait une croissance exponentielle, c'est-à-dire une vitesse de croissance relative constante, on devrait avoir $N(\%) = \text{Cte}$, c'est-à-dire ne pas observer de dilution. Or il n'en est rien, comme le montre la *figure 2.7* (Lemaire et Gastal, 1997). Pour cela, il faut admettre que W_m augmente de façon moins que proportionnelle à la biomasse totale de la plante :

$$W_m = K' (W)^{\beta_v}, \quad (22)$$

avec $0 < \beta_v < 1$, ou :

$$W_m / W = K' (W)^{\beta_v - 1} \quad (23)$$

soit, d'après (20) :

$$dW / W dt = K K' (W)^{\beta_v - 1} \quad (24)$$

et d'après (17) :

$$N(\%) = K' (N_m - N_s) (W)^{\beta_v - 1} + N_s \quad (25)$$

Cette formulation théorique de la dilution se rapproche de la formulation empirique de l'équation (13), à ceci près qu'il devient nécessaire d'introduire une asymptote non nulle à la loi de dilution correspondant à la teneur en azote du compartiment structural de la plante N_s qui, du fait de sa valeur assez faible (0,7 %), n'a pas d'effet très sensible dans la gamme des biomasses habituellement explorée (1 à 30 t MS · ha⁻¹). Pour une plante isolée, la valeur du coefficient β_v a été expérimentalement déterminée pour différentes espèces (luzerne, sorgho) avec une gamme de 0,79 à 0,85 (Lemaire et Gastal, 1997) ce qui donne une gamme de -0,21 à -0,15 pour $\beta_v - 1$, significativement plus faible que ce qui est obtenu en peuplement dense. La *figure 2.7* montre que la dilution de l'azote dans une culture de sorgho n'est pas monotone. En tout début de croissance, pour des indices foliaires inférieurs à 1, la dilution moyenne de la plante suit celle de la plante isolée, puis elle s'accélère pour s'établir avec une pente proche de -0,33, caractéristique des peuplements denses. Il existe donc un terme de passage entre la dilution de l'azote au sein de la plante isolée et la dilution au sein d'un peuplement, et le changement d'échelle devient alors possible. Ceci confirme que la compétition pour la lumière entre les plantes accélère la dilution de l'azote. Il ne peut s'agir d'une compétition pour l'azote, car l'application de doses d'azote plus élevées ne permet pas de diminuer la dilution du peuplement. L'hypothèse retenue est que la croissance des plantes en peuplement dense accélère la diminution du rapport W_m / W .

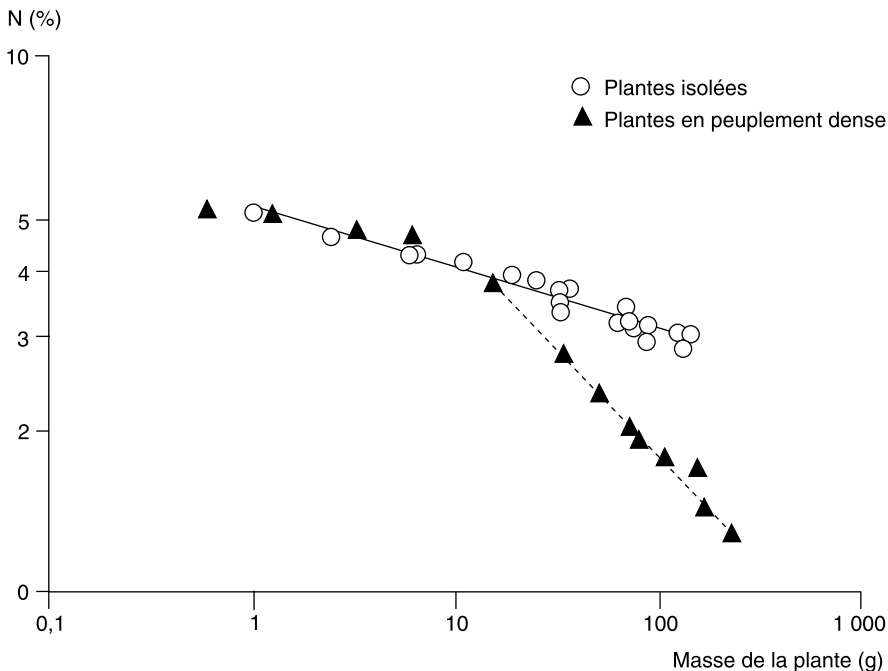


Figure 2.7. Dilution de l'azote en coordonnées log-log pour des plantes de sorgho isolées ou des plantes en peuplement dense (Lemaire et Gastal, 1997, avec la permission de Springer Science and Business Media).

Lorsque l'on analyse la croissance de l'indice foliaire d'un peuplement en fonction de sa croissance en matière sèche, on retrouve une relation allométrique :

$$IF = K (W)^{b'} \quad (26)$$

avec une valeur de b' proche de 0,66 équivalente à la valeur du coefficient $1 - b$ de l'équation (14) (*figure 2.8 [a]*). Si on fait alors l'hypothèse que $b' = 1 - b$, alors on peut écrire :

$$N_{\text{exp}} = (10a / K) IF \quad (27)$$

Ce qui revient à dire que l'azote s'accumule dans le peuplement végétal en proportion du développement de l'indice foliaire, le coefficient $10a / K$ représentant l'accroissement d'azote du peuplement par unité d'indice foliaire. La *figure 2.8 (b)* illustre cette relation dont la linéarité atteste bien de l'égalité entre b' et $1 - b$. On observe que du fait de la sensibilité du coefficient a à la disponibilité en azote, la pente de la droite diminue en situation de déficit de nutrition N. On remarque par ailleurs sur la *figure 2.8 (a)* que le coefficient K (équation 26), qui est l'analogue du coefficient K' (équation 22) ne varie pas avec le niveau de nutrition azotée du peuplement. Cette démarche a été également appliquée sur les plants isolés de luzerne, pour lesquelles on a obtenu des relations analogues aux équations (26) et (27), les valeurs des coefficients b' et $1 - b$ étant identiques entre elles et égales à celle obtenue communément pour une plante isolée : 0,82 (Lemaire *et al.*, 2005). La linéarité de la relation entre la surface foliaire et la biomasse résiste donc au changement d'échelle de la plante isolée au peuplement.

Si l'on admet une proportionnalité entre la surface foliaire d'une plante (ou l'indice foliaire d'un peuplement) et la taille du compartiment métabolique W_m de la plante (ou du peuplement), alors les équations (26) et (27) tendent à valider l'approche compartimentale de la croissance de la plante. Le fait que pour un peuplement dense la valeur du coefficient b' ou de $1 - b$ soit proche ou égale à $2/3$ peut s'interpréter comme le fait que le compartiment métabolique W_m a la dimension d'une surface (l^2) tandis que la biomasse a la dimension d'un volume (l^3). L'équation (27) indiquerait donc que la croissance de la plante « moyenne équivalente » du peuplement serait isométrique, c'est-à-dire avec la même valeur relative dans les trois dimensions. Et c'est cette croissance isométrique qui apparaît être une propriété émergente de tout peuplement dense qui, du fait de la proportionnalité entre IF , W_m et N_{exp} , impose une valeur voisine de $2/3$ au coefficient d'allométrie de l'équation (14), ou de $-1/3$ à la courbe de dilution (équation 13). Pour une plante isolée et non soumise à la compétition pour la lumière, la croissance n'est pas isométrique puisque b est nettement supérieur à $2/3$. Cela signifie que la plante a une croissance relative en surface plus grande que sa croissance relative en volume. Une valeur de b' égale à 1 signifierait que seule la surface de la plante augmente, ce qui maximiserait son interception d'énergie et donc sa croissance. Cette valeur n'est pas atteinte, car la plante doit mettre en place un minimum de structures de soutien (W_s) lui permettant de maintenir ses feuilles en position d'interception du rayonnement et d'assurer des fonctions de transport. L'isométrie de croissance n'est donc pas l'optimum architectural d'une plante isolée pour atteindre la vitesse relative de croissance la plus élevée, mais elle apparaît comme un optimum à l'échelle du peuplement. L'investissement supplémentaire dans la biomasse structurale (W_s) est

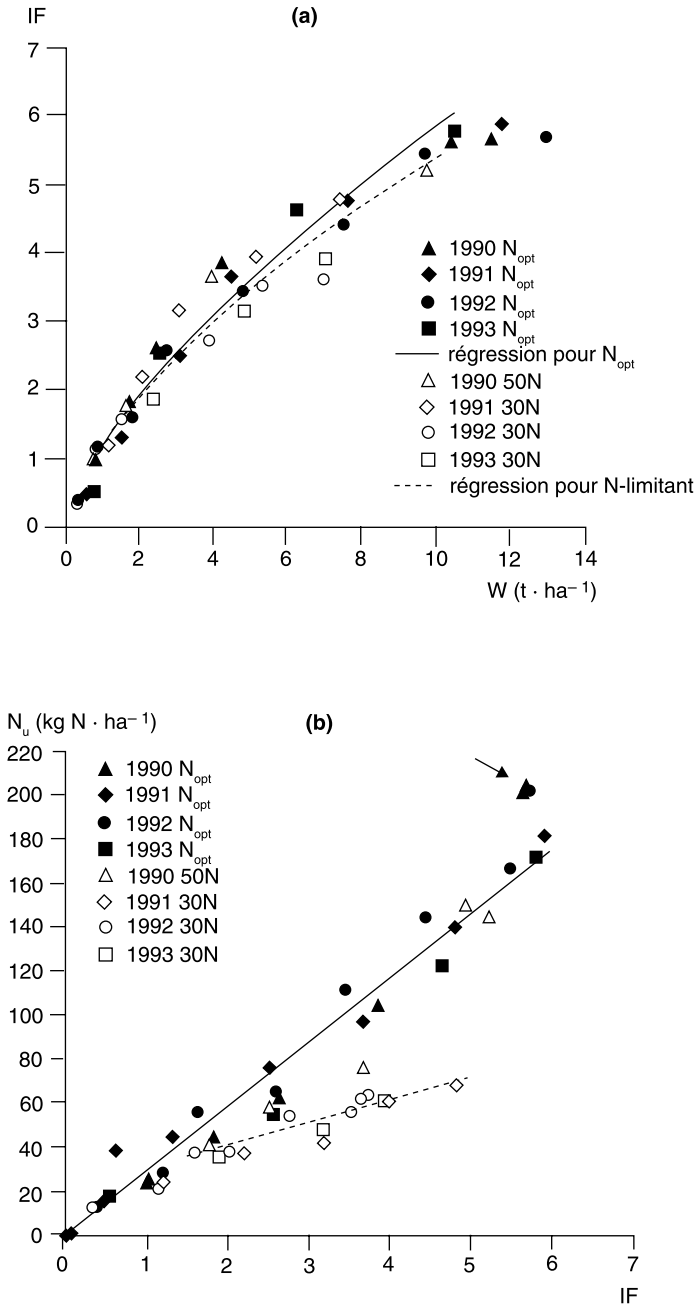


Figure 2.8. (a) Évolution de l'indice foliaire (IF) d'une culture de maïs en fonction de la croissance en biomasse (W) : $IF = 1,23 W^{0,68}$ pour N optimum, et $IF = 1,25 W^{0,64}$ pour N limitant. (b) Relation entre le prélèvement d'azote par la culture N_u et l'expansion de l'indice foliaire : $N_u = 28,9 IF$ pour les traitements N optimum, et $N_u = 10,2 IF + 20,3$ ($IF > 1,5$) pour les traitements N limitants. La flèche indique les données obtenues après floraison (IF maximum), montrant ainsi que le prélèvement d'azote continue au-delà et est alors relié à la croissance de l'épi et au remplissage des grains (d'après Plénet et Lemaire, 2000, avec la permission de Springer Science and Business Media).

nécessaire à la plante pour positionner ses surfaces foliaires dans les strates éclairées et maintenir ainsi en activité sa biomasse métabolique (W_m). Le coût de cette optimisation est l'accélération de la dilution de l'azote et une réduction de la vitesse relative de croissance des plantes. La figure 2.9 montre que cette isométrie de croissance semble être la règle pour toutes les catégories de plantes (dominées ou dominantes) au sein d'un couvert végétal dense. L'une des conséquences majeures de cette différenciation au sein du couvert végétal entre les catégories de plantes est que le partage des ressources azotées semble s'effectuer au prorata de la masse (ou de la surface ?) foliaire développée par chacune des plantes ou, plus probablement, de leur contribution à l'interception du rayonnement par le peuplement.

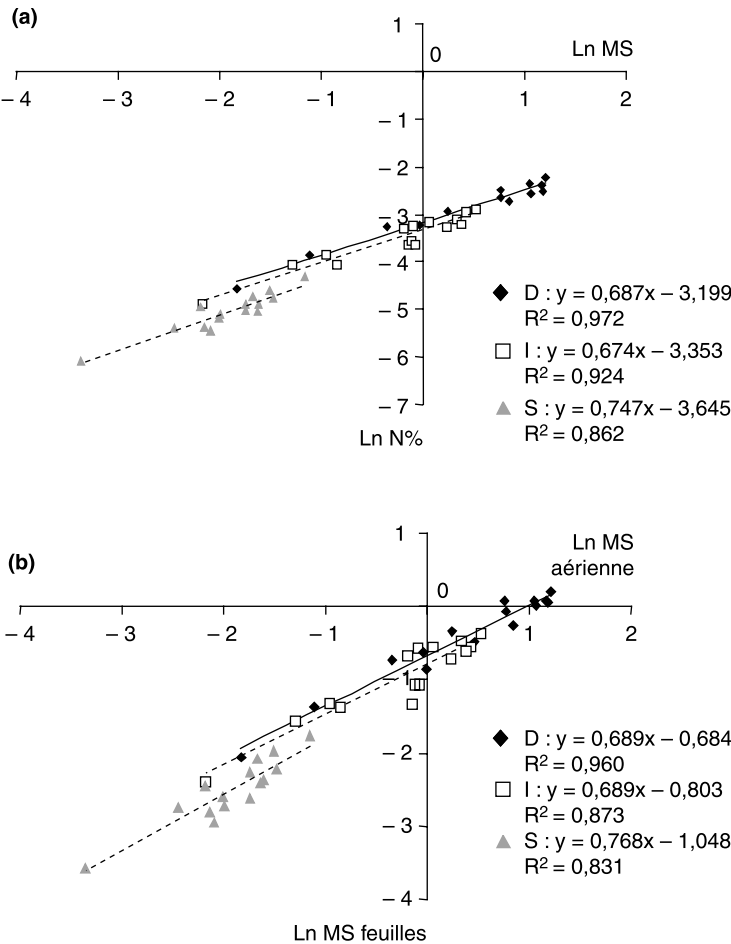


Figure 2.9. Relations logarithmiques entre (a) la concentration en azote dans la partie aérienne et sa biomasse sèche, et (b) entre la biomasse sèche des feuilles et celle de la partie aérienne de plantes ayant des positions hiérarchiques différentes au sein d'un couvert de luzerne à haute densité (D : dominantes ; I : intermédiaire ; S : dominées). D'après Lemaire *et al.*, 2005, avec la permission d'Oxford University Press.

Des indicateurs du niveau de satisfaction des besoins en azote

Les fondements théoriques précédents trouvent une application directe dans le champ de l'agronomie. La courbe critique, qui conduit à une croissance maximale pour le régime de nutrition azotée le plus bas, permet de caractériser le niveau de nutrition azoté instantané des plantes. Au-dessous de la courbe, le régime de nutrition est déficitaire, tandis qu'au-dessus de la courbe, le régime est excédentaire. Pour quantifier le déficit, un indice de nutrition (INN) est calculé comme suit :

$$\text{INN} = N_{\text{obs}} / N_{\text{crit}} \quad (28)$$

où N_{obs} représente le pourcentage d'azote observé dans la biomasse de la partie aérienne du prélèvement, et N_{crit} le calcul du pourcentage d'azote sur la courbe critique pour la biomasse aérienne observée. Cet indicateur a été largement utilisé pour caractériser des états de nutrition de cultures variées et contribue à l'évaluation des méthodes de fertilisation azotée des cultures (voir partie 1). Il présente le défaut d'être coûteux (prélèvements de biomasse, analyse d'azote) à mettre en œuvre. D'autres indicateurs des états du niveau d'alimentation en N ont été proposés et sont utilisés dans la pratique. Deux types sont maintenant couramment utilisés. Le premier fait appel à l'analyse de la teneur en nitrate du jus de base de tige à l'aide d'un kit et est fondé sur la circulation de cet élément dans la plante, dont le niveau peut être relié aux états de nutrition (Justes *et al.*, 1997). Le second est basé sur les changements de couleur des feuilles, celle-ci étant modifiée par le régime d'alimentation en azote. Cette méthode a donné lieu à des développements métrologiques différents, de la mesure directe sur un échantillon de feuilles par une pince jusqu'à la mesure embarquée, soit sur tracteur, soit par image satellitaire. Ces techniques sont prometteuses pour l'agriculture de précision, la modulation de l'épandage des engrais devenant possible en fonction des besoins et des zones géographiques. Ces deux indicateurs doivent être étalonnés par rapport à l'INN qui correspond ainsi à une référence de niveau de nutrition azotée.

Répartition des assimilats dans la plante au sein d'un couvert

Les approches précédentes ne rendent pas compte de la répartition des assimilats dans la plante. Pourtant, la partie récoltée des plantes ne représente souvent qu'une fraction de la biomasse totale produite, appelée « indice de récolte » (*harvest index* en anglais), rapport de la biomasse récoltée et de la biomasse totale. La compréhension du partage des assimilats entre les différentes parties de la plante est donc un enjeu important pour l'agronomie. C'est par l'augmentation de l'indice de récolte que de nombreuses espèces cultivées, par exemple les céréales à paille, ont été améliorées. Une part de la biomasse allouée à la surface foliaire et aux tiges, excédentaire dans les variétés anciennes, a été redistribuée au profit des grains sans altérer la capture des ressources du milieu. Certaines pratiques culturales (la taille des arbres fruitiers ou de la vigne par exemple) visent à assurer un équilibre favorable entre parties récoltées, consommatrices d'assimilats, et parties productrices de ces assimilats (racines et feuilles).

La répartition des assimilats au sein de la plante a été abordée dans de nombreux travaux en considérant les relations entre les organes producteurs d'assimilats (les « sources »), leur transport à travers les tubes criblés phloémiens, et les organes consommateurs ou stockeurs (les « puits »). Ce concept « source × puits » a été très largement utilisé au cours des trente dernières années et s'est révélé particulièrement fécond (Warren-Wilson, 1972). Le formalisme permettant de décrire la répartition des assimilats au sein d'une plante implique de connaître l'activité des sources, à la fois par l'absorption et l'assimilation d'éléments présents dans le milieu, mais aussi par la mobilisation des réserves accumulées préalablement, le transport des assimilats produits et l'activité des puits, et leurs influences respectives. Nous ne considérerons pas ici l'activité des sources déjà abordée précédemment et pour lesquelles de nombreux ouvrages de synthèse existent (par exemple Jones, 1992). Le transport entre sources et puits est souvent négligé, même si certains travaux intègrent des résistances au transport (Minchin *et al.*, 1993).

Une première définition de la force de puits est donnée par Warren-Wilson en 1967 : c'est le flux net d'assimilats importés par ce puits. Cette définition a été remise en question (Patrick, 1993), car elle ne fait pas la part de l'influence du puits lui-même et de celle de la quantité d'assimilats disponibles dans la détermination du flux constaté. De nombreux travaux ont été conduits pour tenter d'isoler ce qui pourrait provenir du puits, en définissant une croissance potentielle de l'organe lui-même. Pour ce faire, plusieurs types de dispositifs ont été utilisés. Dans certains, les ressources disponibles ont été augmentées (CO_2 , lumière...), ou bien des organes ont été supprimés (ablation de gousses par exemple) pour saturer les puits restant. Dans d'autres, des organes ont été prélevés pour être cultivés *in vitro* dans des milieux très riches en éléments nutritifs. Ces travaux ont souvent été peu concluants, la valeur de la force de puits trouvée restant très contingente des conditions de milieu et des conditions de culture, très artificielles *in vitro* en particulier, ou très déstabilisantes pour les ablations d'organes. Pour éviter ces défauts, certains auteurs ont cherché les déterminants du potentiel de croissance d'un organe. Thaler et Pagès (1998), par exemple, montrent que le potentiel de croissance d'une racine peut être relié à la taille de son apex lorsque la disponibilité en photoassimilats n'est pas limitante. Le potentiel de croissance des organes reproducteurs a été relié à leur nombre de cellules produit lors de l'organogenèse (Munier-Jolain et Ney, 1998, pour les graines ; Bertin, 2005, pour un fruit de tomate ou Jullien *et al.*, 2001b pour la banane par exemple). La période de division cellulaire, brève et précoce, fixerait un potentiel ultérieur : la vitesse de croissance des graines de pois par exemple apparaît étroitement corrélée à leur nombre de cellules cotylédonaire lorsque les conditions ne limitent pas la croissance. Munier-Jolain *et al.* (1998) montrent également qu'un doublement de la concentration du CO_2 ambiant dans une chambre de culture après que les divisions cellulaires des graines d'une plante de lupin (*Lupinus albus* L.) ont cessé n'augmente pas leur croissance par rapport au témoin, montrant en cela l'existence d'un potentiel précocement déterminé.

Le concept de potentiel de croissance, même s'il est utile pour formaliser en première approche les relations entre sources et puits, notamment dans une modélisation quantitative de ces rapports, ne résiste en revanche pas à une analyse plus

approfondie, physiologique, des processus. Patrick (1993), parmi d'autres auteurs, préfère définir la force d'un puits comme sa capacité à maintenir un gradient osmotique entre les sources et lui-même. La différence de concentration qui entretient le flux d'assimilats vers l'organe provient d'une transformation (dans les zones d'accumulation comme les graines par exemple) ou d'une consommation des assimilats parvenant au puits (comme dans les zones méristématiques, par respiration). Les étapes de déchargement du phloème puis de transformation sont soumises à des processus enzymatiques que l'on sait gouvernés par des lois non linéaires, souvent michaeliennes (Minchin et Thorpe, 1993), remettant en cause l'idée de proportionnalité d'un déchargement des assimilats en fonction des caractéristiques d'un puits (taille, nombre de cellules...).

Dans les règles de partage des assimilats, ceux produits en excès sont généralement considérés comme mis en réserve dans un compartiment qui se remplit au gré des surplus ou des besoins en assimilats. Dans les formalismes courants, ce compartiment se remplit lorsque les autres puits sont saturés, et se vide lorsque la production d'assimilats est déficitaire. Ce point de vue est en contradiction avec l'analyse des processus de polymérisation et d'hydrolyse des composés carbonés stockés dans les tissus. Ces deux processus interviennent au même moment, mais à des intensités différentes selon les besoins, dans les mêmes cellules, et sont régulés probablement séparément. Le compartiment « réserves » pourrait même être considéré comme un puits à part entière, entrant en compétition avec les autres, lors du partage des assimilats, la polymérisation se produisant alors même que les puits ne sont pas saturés. On trouvera un exemple d'analyse et de modélisation de la balance polymérisation/hydrolyse et de la contribution des réserves lors du remplissage du grain dans Bancal et Soltani (2002). Les formes moléculaires de mise en réserves peuvent être très variables et diverses. Elles peuvent être, pour le carbone, des sucres plus ou moins polymérisés ou des protéines (VSP : *vegetative storage proteins*) chez certaines plantes. On admet souvent par exemple qu'elles contribuent fortement à la repousse d'espèces fourragères après la coupe. Pour l'azote, l'ensemble des protéines peut être mobilisé, notamment dans les organes en sénescence. La rubisco, produite en quantité excédentaire, peut être, à certains égards, considérée comme une protéine de réserve, au-delà de son rôle fonctionnel dans la photosynthèse. La formation des réserves, et la compréhension des processus y conduisant, joue un rôle important puisque ces réserves forment la partie utile de certaines cultures comme la canne à sucre ou la betterave par exemple. On sait pour la première que la richesse peut se trouver affaiblie par des conditions favorables à une reprise de croissance qui mobilise ces ressources.

L'accumulation de réserves carbonées ou azotées rétroagit sur les fonctions d'acquisition correspondant. L'accumulation de sucres solubles et d'amidon dans les feuilles est connue pour diminuer leur photosynthèse (Crookston *et al.*, 1974). De même, l'absorption de NO_3^- est fortement régulée par les produits de son assimilation par la plante (NO_2^- , NH_4^+ , et le NO_3^- lui-même) (Touraine et Gojon, 1997). Ces mécanismes de régulation sont encore l'objet de nombreux travaux, notamment en biologie moléculaire et en physiologie.

Les difficultés d'analyse des relations « source $\times$ puits » n'ont cependant pas empêché d'estimer le partage des assimilats au sein de la plante entière par la

mesure (emploi d'isotopes par exemple pour le suivi des éléments absorbés) ou la modélisation. Les travaux correspondants sont très variés quant au degré de complexité introduit selon les mécanismes mis en cause (d'une règle de priorité préétablie selon les stades de la plante jusqu'à une gestion précise des flux), ou les compartiments pris en compte (d'une simple bicompartimentation aérien-racinaire² ou végétatif-reproducteur, jusqu'à un décompte exhaustif des organes en présence, fourni par la description du développement de la plante et de ses organes). Pour les plantes herbacées, une approche simple (Fournier et Andrieu, 1999 ; Drouet et Pagès, 2003) est de considérer que tous les organes ont un accès équivalent à un *pool* unique. Cette démarche peut être affinée en prenant en compte les distances entre sources et puits (Balandier *et al.*, 2000). Enfin, l'analogie à un réseau électrique (Minchin *et al.*, 1993) fournit un cadre théorique qui a été récemment implémenté dans des modèles de plantes (Bidel *et al.*, 2000 ; Daudet *et al.*, 2002 ; Allen et Richardson, 1968). Buck-Sorlin *et al.* (2005) ont développé un modèle d'orge dans lequel l'élongation des entrenœuds est pilotée par un module simulant la biosynthèse des gibbérellines. Toutefois, les exemples de travaux dans ce domaine sont rares. Les approches « plantes virtuelles » décrites ci-après ont suscité de nombreuses recherches visant à simuler la prospection des ressources, mais un important travail demeure nécessaire pour concrétiser les possibilités qu'elles ouvrent dans l'approche des régulations et des transferts internes à la plante. Ces formalismes, modélisation orientée objet (Drouet et Pagès, 2003), ou *L-systems* par exemple, offrent donc des perspectives prometteuses.

►► L'approche architecturale

Les approches précédentes ont montré leur efficacité pour comprendre et simuler la production des cultures. Mais, dans le même temps, elles conduisent à un certain nombre de limites pour les modèles :

- l'hypothèse de milieu homogène et continu (*figure 2.10 [a]*) limite la précision des calculs physiques concernant les échanges avec l'environnement ; en outre, les prédictions portent sur des moyennes sur la parcelle alors que la variabilité entre plantes ou au sein de la plante peut avoir des conséquences importantes, notamment en termes de qualité des produits ;
- la morphologie des organes et l'organisation de l'architecture jouent un rôle dans l'activité fonctionnelle et dans les transferts au sein des plantes ; l'assimilation de la structure fonctionnelle à un ensemble de compartiments limite donc la gamme des processus qui peuvent être pris en compte.

Pour contourner ces limites, se développent depuis une quinzaine d'années (de Reffye *et al.*, 1988 ; Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1990), des approches dites « plantes virtuelles » ou « structure-fonction » qui visent à une modélisation « botaniquement réaliste » de la plante individuelle (*figure 2.10 [b]*) (Room *et al.*, 1996 ; Prusinkiewicz, 2004). Le numéro de juin 2005 de la revue *New Phytologist* présente un bon aperçu des travaux récents en la matière. Dans ces approches, le peuplement est représenté comme une population de plantes individuelles qui se

2. Par exemple Tabourel-Tayot et Gastal (1998) pour le carbone et l'azote.

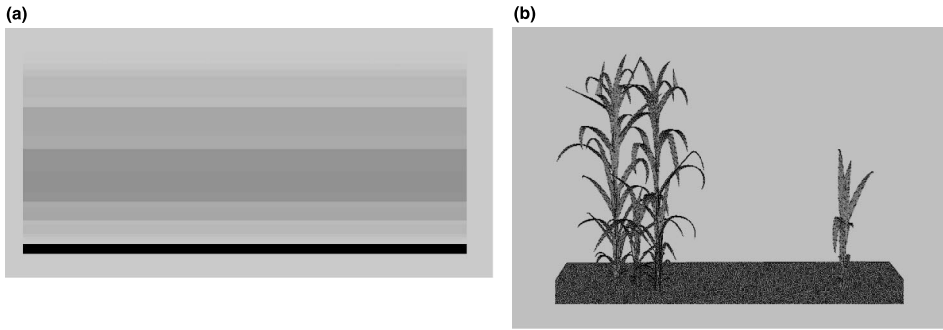


Figure 2.10. Représentation des couverts dans les modèles : analogie à un milieu continu (a), ou représentation explicite des plantes (b).

développent en parallèle. Les interactions entre plantes sont prises en compte du fait que l'environnement et les ressources disponibles pour une plante dépendent de la façon dont les plantes voisines modifient le milieu physique, et notamment les ressources disponibles. De telles approches nécessitent donc le couplage entre des modèles simulant les processus biologiques (fonctionnement de la plante) et des modèles simulant les échanges physiques au sein d'un couvert végétal, et calculant les conditions physiques (rayonnement, température, humidité du sol) perçues par chacun des organes des plantes. Les apports attendus à terme sont :

- une extension du domaine de validité des modèles (plante isolée, plante en peuplement, plante en serre) ;
- une plus grande cohérence entre la façon dont le fonctionnement de la plante est étudié et celle dont on peut l'exprimer dans les modèles ;
- la possibilité d'aborder des problèmes nouveaux. Dans cette approche, le fonctionnement d'un peuplement plurispécifique se représente « naturellement », car chacune des plantes constituant les peuplements virtuels peut avoir ses propres propriétés, représentant une espèce particulière. Les conséquences d'une coupe de prairie, de la taille d'un arbre, ne peuvent être simulées sans prendre en compte la structure botanique des plantes.

Un point essentiel dans cette approche est que l'organisation du modèle est calquée sur la structure botanique des plantes. Les entités du modèle seront donc des éléments botaniques : feuille, pétiole ou gaine, entrenœud, segment racinaire, méristème, affectés de variables morphologiques (longueur, diamètre, orientation). Les compartiments et les fonctions sont distribués dans la plante et représentés par des variables (masse, teneur en carbone, en azote, en eau, etc.) et des lois de comportement associées à ces entités. Ce changement de représentation a des conséquences importantes : d'une part sur les processus et les variables à prendre en compte dans les modèles — puisqu'il faut notamment prendre en compte l'architecture de la plante —, d'autre part sur la façon de modéliser, du fait du caractère distribué des fonctions et des compartiments et de l'évolution de leur nombre avec le développement de la plante.

Principe de la modélisation

Croissance en dimension des organes

Dans l'approche « plante virtuelle », l'extension individuelle de chacun des organes doit être simulée. Ceci nécessite de développer des modèles d'extension des différentes entités (limbe, pétiole, entrenœud, racine, pétale, etc.), tandis que dans les modèles de cultures, seuls les limbes foliaires sont généralement pris en compte. Ceci conduit donc à rechercher des modèles génériques pouvant représenter la diversité des cinétiques de croissance et des dimensions des organes matures au sein de l'architecture (Thaler et Pagès, 1998 ; Dosio *et al.*, 2003 ; Fournier *et al.*, 2005). D'autre part, les coordinations temporelles au sein de l'architecture doivent être simulées. Dans les modèles existant, coordinations et durées de croissance sont souvent exprimées sous forme d'un « calendrier » de développement des organes au sein de la plante, supposé stable en temps thermique³. Cette stabilité n'est qu'approximative, et les variations de durée de croissance jouent un rôle considérable dans la régulation des dimensions par les contraintes environnementales (Durand *et al.*, 1999). L'importance d'une meilleure compréhension des régulations du développement qui puisse fournir une alternative à l'approximation d'un « calendrier » invariant est une des questions importantes soulevées par l'approche « plantes virtuelle ». En retour, la prise en compte dans cette approche du fonctionnement des organes dès le début de leur développement ouvre des perspectives pour comprendre les réponses différentielles des génotypes aux stress (Tardieu, 2003) et inclure les effets différés résultant des répercussions sur les organes matures de conditions subies lors des premiers stades de développement (cf. *supra* « l'approche architecturale »).

Disposition des organes dans l'espace

La disposition des organes dans l'espace dépend de lois morphogénétiques (phyllo- ou rhizotaxie), de forces physiques comme la gravité, mais également très largement de régulations actives en réponse à l'environnement perçu comme la quantité et la composition spectrale de la lumière (photomorphogenèse), la résistance du sol à la pénétration, ou les chocs physiques (thigmomorphogenèse). En raison de la complexité de ces processus, la plupart des modèles utilisent des descriptions statistiques — c'est-à-dire visant à reproduire au mieux les observations — plutôt que déterministes. Des modélisations déterministes commencent toutefois à se développer (Gautier *et al.*, 2000). L'intégration de réponses dans des modèles de plante virtuelle vise à valider les hypothèses sur les lois de réponse, et à comprendre les conséquences de ces régulations sur le comportement global de la plante.

3. Le temps thermique (ou somme de température) est couramment employé en agronomie pour suivre l'avancée du développement d'une plante. Les stades de développement sont en effet plus stables lorsque le temps est exprimé par la somme de température. Celle-ci est souvent calculée par la somme des températures moyennes de chaque jour à laquelle est retranchée la température de base, dépendant de l'espèce et en dessous de laquelle le processus de développement considéré est arrêté.

Distribution et intégration du fonctionnement

À défaut de mobilité, les plantes s'adaptent à leur environnement par une forte plasticité, conférée par leur organisation modulaire (Hallé, 1999). Dans une certaine mesure, la plante peut être vue comme un réseau d'organes fonctionnant en parallèle, chacun en fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Celui-ci est externe (lumière, température) et interne (caractéristiques des tissus voisins et des organes avec lesquels il est lié vasculairement). Ainsi, la vitesse de croissance d'un organe dépend de la température de sa propre zone de croissance. La teneur en azote foliaire s'ajuste au rayonnement perçu par la feuille, les feuilles les plus éclairées étant aussi les plus aptes à la photosynthèse. L'orientation et la croissance des feuilles et des tiges (Ballaré et Casal, 2000) ainsi que des racines (Doussan *et al.*, 2003) sont elles aussi régulées par l'environnement local, permettant des stratégies de recherche de ressources. Pour autant, le fonctionnement des différents organes n'est pas indépendant : les transferts de proximité par diffusion au sein des tissus ou à plus longue distance par les connexions vasculaires conduisent à des échanges de matière et de signaux. Identifier les règles locales de fonctionnement et les schémas de communication d'où émerge cette combinaison de plasticité et de régularité est certainement un pari et un enjeu majeur de l'approche « plante virtuelle ». La représentation des plantes en trois dimensions — conjointement à des modèles de microclimat — permet de calculer l'environnement perçu par chaque organe. Elle est bien adaptée pour prendre en compte les régulations par l'environnement externe. En revanche, la perception de l'environnement interne par un organe n'est que très partiellement comprise (Pagès, 2000).

Simulation du peuplement

Les approches de simulation du peuplement se fondent sur l'idée selon laquelle les interactions entre plantes ne sont pas directes entre individus, mais résultent des modifications que chaque plante apporte à l'environnement physico-chimique des autres plantes. L'approche « plante virtuelle » permet alors d'aborder le fonctionnement du peuplement végétal vu comme un ensemble de plantes dont chacune interagit avec l'environnement qu'elle perçoit (*figure 2.11*). Cet environnement est caractérisé par des variables globales (durée du jour, gravité) et par des variables locales, distribuées sur l'architecture de chaque plante, (lumière, température, humidité, concentrations en nutriments, etc.) et qui évoluent constamment au cours du temps, notamment en fonction du développement des plantes avoisinantes (par exemple l'ombrage) et de celui de la plante elle-même (auto-ombrage, phototropisme). Un apport majeur de l'approche dans ce domaine est donc de permettre de simuler explicitement les boucles de rétroaction par lesquelles chaque plante perçoit, répond et, à son tour, modifie son environnement physique et celui de ses voisines. Les implémentations élaborées jusqu'à présent n'intègrent qu'une fraction des multiples processus mis en jeu, et sont pour la plupart focalisées sur la simulation des réponses à la lumière (Fournier et Andrieu, 1999 ; Gautier *et al.*, 2000).

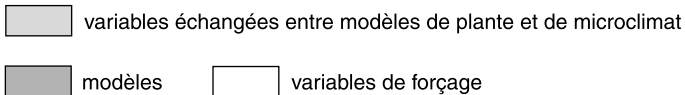
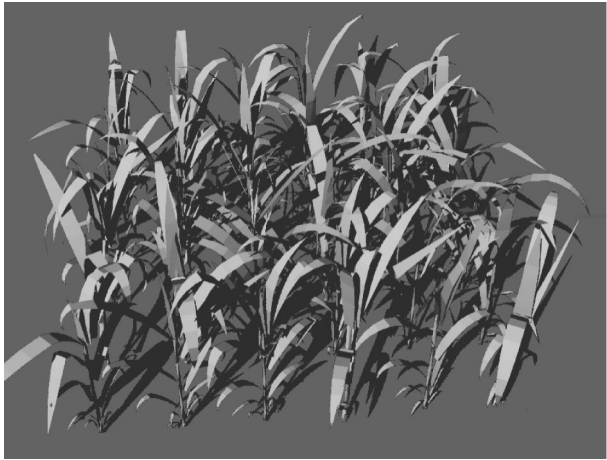
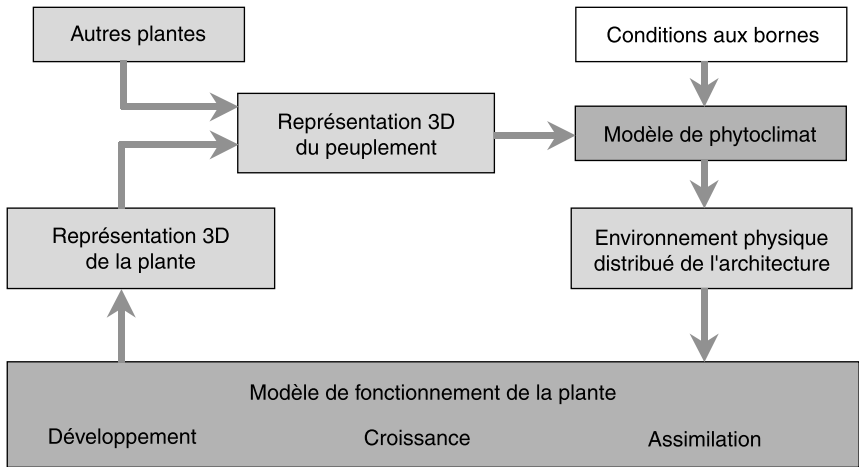


Figure 2.11. Principe de modélisation liant l'environnement local, la réponse de ses organes constitutifs et l'intégration des processus. En bas, résultat de la simulation dans le cas d'un peuplement de maïs (d'après Fournier et Andrieu, 1999).

Aspects informatiques

Le développement de l'approche « plante virtuelle » a été rendu possible par l'évolution des méthodes de modélisation des systèmes dynamiques complexes. Il a lui-même contribué à cette évolution. L'approche « individu-centrée » de modélisation du peuplement, et plus encore celle de la modélisation de la plante en tant que colonie d'organes fonctionnant en réseau, rejoint les approches « multi-agents » pour la modélisation de sociétés animales (fourmis, coraux). Des méthodes multi-

agents ont été mises en œuvre pour la modélisation des interactions entre plantes (Lattaud, 2004). Les langages objets tels que le C++ sont bien adaptés pour rendre compte du caractère modulaire de l'architecture (Bidel *et al.* 2000 ; Drouet et Pagès, 2003). Le caractère dynamique de la structure pose des difficultés informatiques pour certains calculs comme la résolution des équations explicitant les flux par analogie avec un réseau électrique, car il faut maintenir la cohérence des relations entre modules au cours du développement. Toutefois, dans les plantes, l'absence de mobilité des cellules contraint fortement le système de relations entre modules : celui-ci est évolutif par ajouts, branchements et différenciations des modules, mais les interconnexions créées sont prédictibles par les « règles » botaniques de développement et, en première approximation, n'évoluent ensuite que par mortalité ou abscission. Les travaux de Lindenmayer ont fourni un cadre théorique pour la conservation du réseau de relations au sein de ce type de structure dynamique. L'équipe de Prusinkiewicz (université de Calgary, Canada) et celle de Kurth (université de Cottbus, Allemagne) ont développé les fonctionnalités de ces systèmes pour exprimer les processus de développement, de croissance et de transferts au sein des plantes, et pour permettre une représentation en trois dimensions ainsi que l'échange d'information avec des programmes externes, simulant par exemple le rayonnement ou la température. Les logiciels développés sur cette base (Prusinkiewicz *et al.*, 2000 ; Kniemeyer *et al.*, 2004) sont aujourd'hui le support le plus utilisé pour l'implémentation de modèles dynamiques de plantes. Outre les aspects liés à la simulation, le développement de cette approche a conduit à la mise au point de développements théoriques et d'outils spécifiques permettant l'exploration et les calculs statistiques au sein de bases de données architecturées (Godin, 2000), qui peuvent être expérimentales ou issues de simulations.

Modélisation de l'environnement

Comme on l'a vu plus haut, la modélisation de l'environnement a pour mission, compte tenu de la géométrie du peuplement, des propriétés d'échanges (comme les propriétés optiques des feuilles) ainsi que des conditions de forçage (par exemple le rayonnement incident, la température au-dessus du couvert), de déterminer les conditions environnementales perçues en chaque point de la structure. Les variables concernées sont multiples : les transferts de rayonnement, les échanges à l'interface feuilles-atmosphère, ou racines-sol, les transferts par convection dans l'atmosphère, par conduction dans les sols, mais aussi le transport et l'impact de corps particuliers (goutte d'eau, pollen). On pourra se référer à Chelle (2005) pour une revue de ces aspects. Vis-à-vis du couplage avec des modèles de fonctionnement de plante, les modèles les plus opérationnels concernent la distribution du rayonnement et, dans une moindre mesure, de la température des organes végétaux. Les travaux dans ce domaine ont largement bénéficié des approches développées pour d'autres applications impliquant des représentations en trois dimensions (éclairage ou thermique de bâtiment, visualisation en trois dimensions). En retour, les approches « plantes virtuelles » permettent de faire progresser la modélisation des transferts pour des applications autres que la simulation des plantes. Ainsi, la simulation des signaux mesurés en télédétection et celle des transferts physiques plante-atmosphère progressent *via* les possibilités de représentation en trois dimensions des plantes. En outre celle-ci permet d'aborder de nouveaux aspects, comme

le transport de l'eau au sein des couverts, qui met en jeu des phénomènes de ruissellement (Bussière *et al.*, 2002) et d'éclaboussure (Saint-Jean *et al.*, 2004) pour lesquels l'analogie au milieu continu est inadaptée. La meilleure structuration des interactions entre la plante et son environnement, par dissociation entre les modèles et définition de procédures de communication entre modèles, se prête aussi au couplage avec des modèles d'environnement biotique : modèle de développement de maladies ou d'insectes (Skirvin, 2004) dont il fournit, en plus de la représentation architecturée des plantes, des informations clefs (environnement physique des pathogènes, teneur en azote des feuilles...).

Pour conclure, le développement de l'approche « plante virtuelle » représente pour la modélisation des peuplements végétaux un changement important vis-à-vis des modèles de culture usuels. Ce changement élargit grandement les domaines d'application, en particulier vers le fonctionnement de communautés végétales plus variées que les cultures monospécifiques, et vers une meilleure prise en compte des réponses aux contraintes environnementales. Plus fondamentalement, l'approche conduit à identifier la plante individuelle comme un système dynamique à modéliser. Maillon de départ pour l'étude du fonctionnement des communautés végétales, la plante individuelle est aussi le maillon d'arrivée de la biologie végétale.

Chapitre 5

La parcelle, lieu d'interactions entre différentes populations

Marie-Odile BANCAL, Bertrand NEY, Jean-François SOUSSANA

Le peuplement végétal a été vu dans les sections précédentes comme une entité à part entière ou comme une collection d'individus, de la même espèce et interagissant. De nombreux systèmes de culture utilisent la complémentarité de variétés ou d'espèces (cultures associées, prairies...) pour mieux utiliser les ressources du milieu (mélanges entre légumineuses et graminées dans les prairies par exemple), pour assurer une production d'une qualité supérieure (les mêmes mélanges pour l'alimentation animale, ou les jardins créoles pour l'alimentation humaine), ou pour la lutte contre les bioagresseurs par des associations (mélanges variétaux pour résister contre des champignons aériens des céréales, ou association de bananiers et de *Canavalia* pour limiter les attaques de nématodes...). Les exemples de gestion du milieu par des associations végétales sont nombreux. De plus, dans le champ cultivé, le végétal n'est évidemment pas la seule entité biologique : macro- et micro-flores et faunes lui disputent les ressources ou l'aident à mieux les capter. L'objectif de cette section est de montrer comment il est possible de rendre compte de ces compétitions ou associations dans le champ cultivé.

» Effets des bioagresseurs (agents pathogènes et mauvaises herbes)

De nombreuses contraintes conduisent aujourd'hui à revoir la protection des plantes contre les maladies, les ravageurs et les mauvaises herbes : diminution des coûts de production, préservation de l'environnement, production saine et sûre pour le consommateur. La diversité des manières de produire complique encore l'adaptation des méthodes de lutte aux cahiers des charges correspondants. La protection des plantes ne peut dès lors s'envisager sans tenir compte des autres techniques et éléments des systèmes de culture, et l'ensemble des filières de production aspire à la création d'une protection intégrée. Mais ces méthodes (cf. partie 3)

ne peuvent voir le jour qu'au prix d'une meilleure connaissance des interactions entre le peuplement végétal et les bioagresseurs qui en réduisent les performances.

Trois grandes étapes marquent les recherches des agronomes sur l'impact des bioagresseurs sur le fonctionnement du peuplement végétal.

Estimation des dommages des bioagresseurs

Avant les années 1970, de nombreuses relations sont établies entre des pertes de rendement et des infestations à un stade donné. Parmi les premiers travaux, les pertes de rendement sont reliées par des régressions simples ou multiples à la maladie, caractérisée par la mesure des surfaces nécrosées, ou des notes à une ou plusieurs dates clefs au cours du cycle (James, 1974). D'autres travaux relient les pertes de rendement à une variable caractéristique de la progression de la maladie (par exemple la surface morte de feuilles), l'AUDPC (*area under disease progression curve* ou « aire sous la courbe de progression de la maladie »). L'AUDPC est calculée, dans une situation donnée, par l'aire de la courbe, généralement logistique ou exponentielle, d'évolution de la sévérité de la maladie. Les pertes de rendement sont ensuite corrélées à la valeur d'AUDPC prise dans les différentes situations. Ces démarches ont été et sont encore utilisées avec succès pour aider aux décisions des praticiens. Ces relations, peu mécanistes, ne prennent pas en compte le fonctionnement du couvert. Par exemple, un pourcentage élevé de nécrose peut laisser suffisamment de surface photosynthétique saine pour assurer une production d'assimilats suffisante. Ces relations statistiques souffrent donc d'une faible possibilité de généralisation.

Classification des bioagresseurs selon leur mode d'action

Les années 1980 sont marquées par une volonté de rechercher les raisons de la nuisibilité. Les acquis de la décomposition des processus aboutissant au rendement et la modélisation du fonctionnement des peuplements sont mis à profit. La maladie y est cependant considérée comme une variable d'entrée mesurée et n'est donc pas modélisée en fonction de variables climatiques. Dans ces travaux, l'évolution de la propagation et du développement de l'agent pathogène reste donc sommaire. La modélisation naissante du fonctionnement des peuplements végétaux cultivés révolutionne l'approche de l'impact des bioagresseurs. Les modèles de culture offrent l'opportunité d'une prédiction de la nuisibilité, mais donnent aussi un cadre conceptuel propre à décomposer l'effet des bioagresseurs. Dans cet esprit, certains auteurs ont tenté une classification des bioagresseurs à travers les variables de l'élaboration du rendement qu'ils affectent et leur hiérarchie (Boote *et al.*, 1983 ; Rabbinge et Bastiaans, 1989). D'après cette classification, les ennemis des cultures peuvent agir par :

- la compétition pour les ressources : ils prélèvent et captent une partie des ressources du milieu (énergie lumineuse, eau, nutriments...) dont ne dispose plus la plante cultivée. Ce sont par exemple les mauvaises herbes, dont la formalisation des effets a été réalisée dans des modèles comme Almanach et Intercom par exemple (Kiniry *et al.*, 1992). Par rapport aux autres bioagresseurs, elles ont pour originalité de modifier le milieu (ressources en lumière, eau et nutriments) sans altérer

directement le fonctionnement de la plante. Ces modèles permettent de prendre en compte les répartitions verticales spécifiques de l'indice foliaire et de leur évolution dynamique au cours du temps ;

- la consommation de tissus qui affecte le rendement de la plante soit directement après consommation des organes récoltables, soit indirectement en consommant les organes destinés à la capture des ressources du milieu (racines attaquées par les nématodes, par exemple) ;

- la consommation d'une partie des assimilats produits par la plante ; c'est le cas des insectes comme les pucerons (Rossing, 1993) ;

- la réduction du taux d'assimilation nette qui diminue la quantité d'assimilats produits par la plante, en diminuant la photosynthèse et/ou en augmentant la respiration de la plante. Dans cette catégorie se trouvent certaines maladies foliaires cryptogamiques qui nous serviront d'exemples par la suite. Ces maladies, très nombreuses, peuvent être occasionnées par des parasites biotrophes ou nécrotrophes. Les premiers ne se développent que sur des tissus vivants et ponctionnent les nutriments nécessaires à partir des assimilats de l'hôte ; en revanche, les seconds ne fructifient que sur des tissus morts : après une phase de développement biotrophe, ils dégradent les tissus de l'hôte, avec ou sans émission de toxines, puis utilisent les assimilats ainsi solubilisés pour achever leur cycle. Dans ces deux cas, l'interception du rayonnement par la plante est diminuée lors de l'apparition des symptômes observés, mais des assimilats sont également ponctionnés sur la plante pour assurer la sporulation (Robert *et al.*, 2002 ; 2004a), et la mort des tissus foliaires peut aboutir à une défoliation précoce (Johnson, 1987). Sur cet exemple, on constate donc que chaque parasite peut affecter, à des degrés qu'il convient de quantifier, plusieurs variables de fonctionnement du couvert végétal.

Cette classification qualitative permet de généraliser les modèles aux divers ennemis des cultures selon leur type d'impact. Elle est souvent complétée, à l'intérieur de chaque type, par de nombreux travaux quantifiant la nuisibilité à l'échelle de l'organe touché. Historiquement, quelques travaux ont tenté de relier les pertes de rendement à des variables du fonctionnement du couvert affectées par la maladie. Ainsi, Johnson (1987) souligne que les catégories présentées peuvent être regroupées en deux grands groupes : les bioagresseurs diminuant l'interception du rayonnement et ceux affectant l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse. Waggoner et Berger (1987) ont utilisé la relation linéaire existant entre le rendement de l'arachide (*Arachis hypogea* L.) et le rayonnement absorbé par le couvert. Ils calculent le rayonnement absorbé par les surfaces saines d'une culture d'arachide attaquée par *Cercosporidium personatum* et *Cercospora arachidicola*, et montrent que la relation précédente est conservée. Ils en concluent que le concept d'HAA (*healthy area radiation absorption* ou « absorption du rayonnement par les parties saines ») qu'ils développent est pertinent pour quantifier la nuisibilité des maladies. Johnson (1987) quant à lui considère que ce concept n'est adéquat que dans le cas d'une maladie uniformément répartie dans le couvert. Si certaines maladies peuvent être effectivement réparties de façon relativement homogène (par exemple la pyriculariose du riz, *Pyricularia orizae*), ce n'est pas le cas pour la grande majorité des agents pathogènes. Certains progressent de bas en haut dans le couvert (Roger et Tivoli, 1996), d'autres atteignent préférentiellement le sommet du couvert (Robert *et al.*, 2004c), enfin d'autres se développent en foyers dans la

parcelle (Schoeny *et al.*, 2001). La contribution des différentes strates du couvert à l'interception du rayonnement n'étant pas équivalente, une maladie peut affecter très fortement les feuilles du bas sans que cela soit dommageable au peuplement. La nuisibilité résulte dans ce cas des positions respectives de la maladie dans le couvert et des feuilles qui assurent la photosynthèse.

Johnson (1987) note une deuxième limite importante au concept de HAA qui présuppose que l'absorption du rayonnement soit la principale fonction affectée par les pestes. Ainsi par exemple, pour la pyriaculariose du riz, Bastiaans (1991) a montré que la photosynthèse des parties vertes des feuilles malades était fortement diminuée. Il a établi une relation entre la perte de photosynthèse d'une feuille malade et la surface nécrosée par le champignon. La formalisation de la relation qu'il emploie est :

$$P_x / P_0 = (1 - x)^\beta \quad (29),$$

où P_x / P_0 est le rapport de photosynthèse de la feuille malade sur celle d'une feuille saine de même surface, et x la surface nécrosée. Cet auteur justifie ce formalisme en démontrant que le coefficient β représente le rapport entre la surface nécrosée visible (x) et la surface de la feuille réellement soumise à l'action du parasite, le mycélium s'étendant bien au-delà de la surface nécrosée visible. Il montre ainsi que le coefficient β est très supérieur à 1 pour la pyriculariose. Cette formalisation a permis de classer les maladies non plus en fonction du seul critère qualitatif, mais aussi sur un plan quantitatif.

Les maladies fongiques aériennes ont un effet « en profondeur » très différent. Ainsi sur blé d'hiver (*Triticum aestivum*), *Puccinia recondita* (agent de la rouille brune) a un effet pratiquement proportionnel à la surface restée verte de la feuille malade ($\beta = 1,26$), tandis qu'*Erysiphe graminis* (agent de l'oïdium) a un effet très supérieur à ce que laisserait penser la surface nécrosée ($\beta = 8,74$), alors que ces deux parasites sont biotrophes. Bassanezi *et al.* (2001) puis Jesus Junior *et al.* (2003) ont proposé de remplacer les lésions visuelles (x) par les lésions virtuelles (y) dans le calcul du HAA pour rendre compte du non-fonctionnement d'une partie de la surface verte dans le cas des maladies foliaires du haricot. Cela conduit à une amélioration des relations HAA $\times$ rendement pour les maladies du haricot ayant un β et des niveaux de sévérité élevés.

Enfin, dans certains cas comme pour *Mycosphaerella pinodes* (anthracnose du pois), d'une part la maladie est répartie de manière très hétérogène entre les strates foliaires, d'autre part son impact *souterrain* sur la photosynthèse foliaire est très fort ($\beta = 12$). Béasse *et al.* (2000) proposent alors de calculer la baisse de croissance d'un couvert malade par rapport à un couvert sain en rendant compte de la contribution de chaque étage foliaire à la photosynthèse du couvert. Le formalisme de Bastiaans est appliqué à chaque strate foliaire, en tenant compte de la distribution verticale de l'interception du rayonnement et des notes de maladies acquises par étage foliaire. Ce modèle relatif simple permet de rendre compte de manière fiable des pertes de croissances occasionnées par des scénarios épidémiques très variés (génotypes, années, sites).

Plusieurs auteurs ont intégré dans des modèles de culture les fonctions de nuisibilité d'un ou de plusieurs pathogènes établies à l'échelle de l'organe malade

(Johnson, 1992 ; Bastiaans, 1993a et b ; Pinnschmidt *et al.*, 1995 ; Savary *et al.*, 2000). Bastiaans (1993a) sépare ainsi les effets directs de la pyriculariose du riz — sénescence prématurée, diminution de la photosynthèse, augmentation de la respiration, prélèvements d'assimilats par le pathogène — des effets induits par la diminution du bilan de carbone du couvert — réduction de la formation de feuilles et du remplissage des grains. La modélisation permet de hiérarchiser les réponses de la plante. Malgré un β de 3,5, c'est la sénescence et la disparition des feuilles qui provoquent la réduction la plus importante de production d'assimilats carbonés d'une plante affectée par la pyriculariose du riz, plutôt que la réduction de photosynthèse par unité de surface (Bastiaans, 1993b). L'identification des variables du fonctionnement directement impliquées dans les pathologies et leur hiérarchie peuvent être d'un grand secours dans le tri des résistances génétiques à la maladie et dans l'identification des périodes les plus sensibles, donc les plus propices aux traitements.

L'intégration de ces processus locaux à l'échelle du peuplement végétal et à des pas de temps plus larges pose cependant de nombreux problèmes méthodologiques. La sensibilité d'une plante à un parasite est différente selon son stade et selon son âge. La réceptivité du blé à la carie est forte lorsque la plante est juvénile, et faible lorsqu'elle est adulte ; c'est l'inverse pour le charbon nu (Rapilly, 1991). Les agents pathogènes perturbent une ou plusieurs fonctions de la plante ou de ses organes ; par exemple, les champignons aériens modifient souvent la photosynthèse des feuilles, mais peuvent également obstruer les vaisseaux de ces mêmes feuilles (Bastiaans, 1991) et modifier leur fonctionnement hydrique (Bethenod *et al.*, 2001). La plante peut mettre en œuvre des capacités de compensation lors d'une attaque. La diminution de photosynthèse des parties malades peut être compensée soit par une augmentation de photosynthèse des parties saines, soit par une augmentation de surface foliaire (Ayres, 1991). La photosynthèse des feuilles saines d'une plante malade ou des parties saines d'une feuille malade peut être dans certains cas augmentée temporairement en présence de maladie (Robert *et al.*, 2005) ; la quantification du niveau et du seuil maximal de compensation n'est pas aisée.

Enfin, la quantification de la nuisibilité pose un certain nombre de difficultés. La première réside dans l'intégration de plusieurs pathogènes dans les modèles de culture ; dans la majeure partie des cas, les effets sont considérés comme additifs, et aucune interaction entre dommages n'est prise en compte, hormis à travers les fonctions du modèle utilisé (Pinnschmidt *et al.*, 1995 ; Johnson, 1992). L'absence d'interaction est plutôt supposée que montrée sur des processus individuels et à l'échelle de l'organe (Lopes et Berger, 2001 ; Robert *et al.*, 2004c).

La seconde difficulté résulte de la structure même des modèles de culture, considérant le couvert végétal comme une population de plantes moyennes soumise à une contrainte moyenne, horizontalement homogène (mises à part les maladies à foyer) ; or, Ayres (1991), Madden et Nutter (1995) et Hughes (1996) soulignent à juste titre que le mode d'agrégation des plantes et des bioagresseurs au sein d'un couvert peut conduire à des surestimations conséquentes des pertes, les mécanismes de compensations entre plantes n'étant pas pris en compte. Ces mêmes auteurs pointent le faible nombre d'études mettant en œuvre un échantillonnage

spatialisé tant des plantes dans le couvert que des bioagresseurs pour paramétrer les relations sévérité-rendement en fonction des modes d'agrégation.

La dernière difficulté, comme le signalent Kropff *et al.* (1995), réside dans la combinaison entre la réponse de la plante et les compensations qu'elle met en œuvre d'une part, et dans la construction de la structure de la plante d'autre part. Seule une approche architecturale du fonctionnement d'un peuplement de plantes malades peut prendre en compte une interaction dynamique et symétrique entre couvert et épidémie, à partir de lois locales de fonctionnement des organes malades.

Malgré ces difficultés, de nombreuses tentatives, réussies, ont été menées pour introduire les bioagresseurs, les maladies ou les mauvaises herbes dans des modèles de culture pour en mesurer l'impact. Dans ce type d'étude, la progression de la maladie est une variable d'entrée : elle est soit mesurée, soit estimée à partir de quelques observations et d'ajustements statistiques. De nombreux exemples peuvent être cités : Bastiaans et Kropff (1993) utilisent le modèle Macros-L1D pour simuler les réductions d'assimilation nette et de production de biomasse d'un couvert de riz à partir du suivi des surfaces nécrosées de chaque strate de feuilles. Pinnschmidt *et al.* (1995) ont introduit dans le modèle Ceres-riz différentes fonctions de dommage sur des variables d'état ou de flux du modèle plante, et en déduisent des isocourbes de pertes pour tous les couples (date d'initiation du stress biotique, sévérité maximale) avec une ou plusieurs contraintes. Cette approche a permis une première hiérarchie des dégâts, avec l'hypothèse d'une absence d'interaction entre les pestes. Enfin, Willocquet *et al.* (2002) affinent cette approche en limitant les interactions possibles entre nuisibles par zone géographique ; ne sont d'ailleurs prises en compte que les fonctions de dommage importantes dans les pertes. Quoique très développés sur riz, des modèles de nuisibilité ont été élaborés et évalués sur de nombreuses autres espèces. Boote *et al.* (1983) utilisent le modèle Soygro modifié pour l'arachide (*Arachis hypogea* L.) pour estimer les dommages causés par *Cercospora arachidicola* et *Cercosporidium personatum*. Johnson et Teng (1990) quantifient la nuisibilité d'*Alternaria solani* sur la pomme de terre en développant un modèle spécifiquement adapté à l'introduction des stress biotiques. Béasse *et al.* (2000) estiment les dommages de l'anthracnose du pois provoquée par *Mycosphaerella pinodes*. Enfin, Kropff (1988) modélise les dommages des mauvaises herbes.

Modélisation des interactions entre peuplements végétaux cultivés et bioagresseurs

Après les approches statistiques et les modèles de dégâts, une troisième étape est envisagée, plutôt prospective. Elle concerne encore très peu de travaux, comme le signalent Kropff *et al.* (1995). Elle traite de l'intégration de modèles épidémiologiques avec des modèles de fonctionnement des populations végétales. Comme le résume Ayres (1991), la plante, l'agent pathogène et le milieu environnant interagissent fortement et de façon dynamique au cours du cycle de culture. Dans les exemples existant, la modélisation révèle souvent un parti pris :

- celui de l'épidémie dans ses composantes spatio-temporelles (Ferrandino, 1989 ; Rossi et Racca, 1997), le couvert et les dégâts étant décrits très succinctement, et aucune rétroaction du couvert ne modifiant en retour l'épidémie ;

– celui des dégâts (Johnson et Teng, 1990) en fonction du développement de la culture, mais la variabilité spatio-temporelle de l'épidémie avec le climat ou le microclimat est alors négligée.

De fait, les relations liant ces modules sont difficiles à quantifier ; par exemple, pour les parasites aériens, l'agent pathogène, en perturbant le fonctionnement de la plante, modifie la structure du couvert et donc le microclimat dans lequel il se développe. Robert (2003), en essayant de lister les points de couplage et d'interaction entre l'agent pathogène et l'organe malade, puis l'épidémie et le couvert végétal, souligne par ailleurs l'importance de la propagation verticale de la maladie entre feuilles d'une part pour la nuisibilité, d'autre part pour la dynamique épidémique, ainsi que le manque de données expérimentales à des échelles d'espace et de temps compatibles sur la plupart des pathosystèmes.

Ces exemples réussis ne doivent cependant pas occulter la difficulté de généralisation de la démarche. L'introduction de la maladie comme variable d'entrée d'un modèle de fonctionnement d'un couvert sain peut, dans certains cas, être mise en défaut. Le modèle de fonctionnement du couple hôte $\times$ pathogène ne peut se restreindre à la seule adjonction d'un « module parasitaire ». En effet, toute modification du fonctionnement de la plante agit sur la construction de la structure du peuplement, ce qui modifie le microclimat et la proximité des organes (lors d'une propagation par la pluie par exemple, dispersant les spores) ; le milieu biologique et physique qui en résulte est plus ou moins favorable à la progression de la maladie. Lors de la comparaison du comportement de variétés de pois commercialisées vis-à-vis de l'anthracnose, Le May *et al.* (2005) montrent que la différence de comportements provient essentiellement de la différence de structures du peuplement de ces variétés, plutôt que de la réponse en soi des plantes (β de Bastiaans). Cette analyse est aisée lorsque la maladie intervient après que la structure du peuplement a été construite, et donc n'affecte pas la construction de la structure (interaction simple). En revanche, pour les maladies précoces, une simple démarche décomposant le peuplement en strates est impossible, puisque la maladie agit sur la construction même de son milieu *via* la structure du peuplement. Une description architecturée de la plante est alors nécessaire pour élaborer un modèle dynamique d'interaction. Mais cette approche se heurtera, comme signalé ci-dessus, au problème des compensations par la plante. Certaines expérimentations montrent que la surface foliaire peut être maintenue lors de l'attaque parasitaire malgré une diminution de croissance de la plante (Ayres, 1991). Ce maintien s'opère au prix de profondes modifications de son comportement. Il peut être dû à l'augmentation du rapport entre la surface foliaire développée et la masse de la plante, ou bien à une modification du rapport racines/parties aériennes en faveur des parties aériennes. Ces exemples montrent que la quantification de la nuisibilité à une échelle (la plante ou le couvert par exemple) ne peut pas toujours être réduite à la somme des nuisibilités quantifiées à l'échelle inférieure (la feuille par exemple). À ce jour, ce type de modèle pour quantifier les interactions n'a pas été utilisé. Pourtant, il s'agit d'une voie intéressante pour mieux comprendre les interactions hôte $\times$ bioagresseurs (Kropff *et al.*, 1995).

Un autre écueil pour une intégration utile provient des faibles connaissances sur les interactions avec les contraintes abiotiques et entre contraintes biotiques elles-

mêmes. C'est pourtant ici que se situe l'un des enjeux pour la construction de systèmes de culture intégrés. Ces interactions peuvent s'exprimer à des niveaux divers. Les stress abiotiques précoces modifient la structure du peuplement et donc agissent sur la propagation de la maladie. Savary *et al.* (1995b) montrent que l'alimentation azotée d'une population de riz favorise la propagation de *Rhizoctonia solani* par la modification de la densité du feuillage. L'augmentation de cette densité augmente la durée de mouillage des feuilles et les contacts entre tissus, favorisant le développement de la maladie. De même, un couvert contraint par son alimentation hydrique aura une croissance plus faible et une structure plus ouverte. À même niveau de progression (ce qui est évidemment faux, le microclimat s'en trouvant modifié), un champignon aérien progressant du bas vers le haut dans le couvert sera plus dommageable dans la structure ouverte, correspondant au couvert stressé, en raison de la plus forte contribution à la photosynthèse globale des feuilles du bas. Les stress abiotiques trop tardifs pour affecter la structure modifient la physiologie de l'organe atteint, et localement le cycle épidémique.

Tiedemann (1996) et Leitch et Jenkins (1995) montrent que la teneur surfacique en azote des feuilles de blé diminue la durée de la phase de latence et augmente la sporulation de la rouille brune et de la septoriose. Aubertot *et al.* (2004) montrent même que l'état de nutrition azoté du colza modifie l'équilibre des races de phoma qui s'y développent, modifiant l'agressivité moyenne de la population. En revanche, Robert *et al.* (2005) ne trouvent pas d'effet du statut azoté des feuilles de blé attaquées par la rouille sur la diminution de leur photosynthèse. Les exemples bibliographiques concernant l'impact de la fertilisation azotée sur le développement épidémique et la nuisibilité montrent l'enjeu crucial qu'il y a à séparer et hiérarchiser les divers effets pour comprendre une situation sanitaire particulière. Enfin, dans les modèles, les stress biotiques sont la plupart du temps considérés comme additifs ou n'interagissent que par l'intermédiaire des variables de fonctionnement du couvert qu'elles affectent. Or, expérimentalement (Savary et Zadocks, 1992) comme par simulation (Johnson, 1992), des infestations multiples aboutissent à des baisses de rendement et de surface verte moindres que la somme des dégâts dus aux bioagresseurs pris individuellement. De la même manière, Robert *et al.* (2004c) montrent qu'à l'échelle foliaire, la rouille brune et la septoriose du blé n'interagissent pas dans le cas de la baisse de photosynthèse (β inchangé), mais interagissent négativement dans le cas de la sporulation de la rouille brune (Robert *et al.*, 2004a). Quoique très coûteux à paramétrer, ces modèles couplant modules épidémiologiques et modèles de culture sont le seul moyen de hiérarchiser les dégâts occasionnés par les différents bioagresseurs d'un pathosystème complexe, et de faire des études fréquentielles des risques encourus en l'absence de traitement ou en différant un traitement. Ils peuvent aider régionalement à définir les périodes critiques de prise de décision des traitements.

La conception de systèmes de culture intégrés repose en grande partie sur l'emploi de systèmes d'aide à la décision d'ordres à la fois tactique et stratégique. Pour cela sont nécessaires des modèles servant à la fois au diagnostic et au pronostic. Ces outils, pour être performants, doivent être fondés sur une bonne connaissance, quantifiée, des relations au sein du pathosystème. Les modèles à construire doivent cependant être adaptés au pathosystème étudié. Ils peuvent être simples dans le cas

où l'élaboration du rendement de la plante étudiée est simple, et où le pathogène affecte une seule fonction et n'a pas une propagation spatialisée. Ceci explique peut-être l'emploi et le succès de modèles simples, faisant intervenir le rayonnement absorbé par les parties restées saines pour prédire le rendement de l'arachide comme dans le cas de la cercosporiose décrit précédemment. La modélisation de la nuisibilité est plus complexe, mais possible, pour des maladies spatialisées qui interviennent en fin de cycle, lorsque la structure du couvert est déterminée (pas de possibilités de compensation) et que les règles de partage des assimilats sont simples (un seul puits actif, les graines par exemple). En revanche, la démarche se complique lorsque le parasite est précoce et spatialisé, dans le cas d'un complexe parasitaire ou d'une interaction avec les facteurs abiotiques. Dans ce dernier cas, la connaissance et la modélisation des changements de structure du couvert sous les effets des facteurs limitants nous font souvent défaut. Ces changements influencent pourtant profondément la propagation de la maladie en modifiant le microclimat au sein du couvert (durée de mouillage des feuilles, modification de la température...). Des modèles couplés hôte $\times$ pathogènes sont alors nécessaires, mais ils restent en grande partie à construire. Kropff *et al.* (1995) y voyaient déjà l'enjeu important pour produire des modèles pertinents.

► Modélisation de la dynamique et du fonctionnement de peuplements végétaux complexes

Comme évoqué ci-dessus, il existe de nombreux exemples de peuplements plurispécifiques en agriculture : associations entre graminées et légumineuses, mélanges fourragers, prairies permanentes, cultures intercalaires dans des vignes ou des vergers, semis d'une culture annuelle sous le couvert d'une autre, etc. Le fonctionnement de tels peuplements, leurs interactions avec l'environnement et leur valeur d'usage dépendent de la dynamique des espèces végétales qui les constituent. La maîtrise de l'équilibre entre espèces végétales constitue donc un objectif agronomique important pour ces peuplements complexes.

Par exemple, dans le cas des prairies permanentes et des associations fourragères semées, on peut citer trois objectifs agronomiques qui supposent une maîtrise de la dynamique des espèces :

- économiser l'azote et augmenter la teneur en protéines des fourrages en favorisant la croissance de légumineuses fixatrices ;
- offrir une végétation d'une digestibilité suffisante pour les animaux en jouant sur la nature des espèces présentes ;
- empêcher l'envahissement par des espèces ligneuses ou herbacées refusées par le bétail.

Peut-on construire des modèles qui permettraient de prédire la dynamique des espèces dans les peuplements plurispécifiques gérés par l'agriculture ? Sur quelles bases fonder ces modèles ? Comment les rendre applicables à une gamme étendue de situations agronomiques ? Autant de questions qui ont motivé des recherches visant à comprendre les interactions entre populations végétales et à les théoriser

via des modèles mathématiques. Plusieurs disciplines scientifiques se sont intéressées à la dynamique des espèces végétales et ont formulé des théories et des modèles. On peut notamment citer la biologie des populations, l'écologie et l'écophysiologie. La biologie des populations modélise la démographie des populations végétales, mais non leur fonctionnement. L'écophysiologie analyse le fonctionnement, mais non la démographie. Il est donc nécessaire de relier ces deux approches en modélisant la démographie et le fonctionnement des plantes individuelles dans le peuplement complexe, ce qui suppose de savoir passer de la plante isolée au peuplement (cf. p. 113).

La prise en compte de la compétition entre espèces constitue un point de passage obligé pour cette interface entre démographie et fonctionnement, comme l'indique la définition de Begon *et al.* (1990) : « La compétition est une interaction entre individus, induite par le partage d'une *ressource limitée*, et aboutissant à une réduction de la croissance ou de la reproduction de la population concernée. » Cette définition souligne que l'étude de la compétition renvoie à la fois à la biologie des populations (individus, reproduction) et à l'écophysiologie (partage des ressources, croissance). On rejoint alors l'écologie fonctionnelle qui considère le fonctionnement des populations dans les écosystèmes, en lien avec leur dynamique.

Nous présenterons tout d'abord quelques exemples de modèles théoriques formulés en biologie des populations et en écologie, avant de revenir de manière plus détaillée sur la contribution de l'écophysiologie végétale et sur la nécessité de modèles détaillés permettant de simuler à la fois la dynamique et le fonctionnement de peuplements végétaux complexes.

Les premiers modèles de dynamique de populations associées

Le principe d'exclusion compétitive a été formulé mathématiquement par Lotka (1925) et indépendamment par Volterra (1926). En utilisant un modèle simple, dérivé de l'équation logistique et fondé sur la densité-dépendance de la croissance des populations, ils ont démontré que la coexistence d'espèces associées se produit lorsque les effets d'une population sur elle-même sont plus grands que ceux qu'elle a sur les autres populations. Dans ce cas, la compétition entre espèces est relativement faible, et une coexistence stable est prédite. À l'inverse, lorsque la compétition entre espèces est forte, le modèle de Lotka-Volterra prédit un résultat qui dépend des conditions initiales. Appliqué à deux espèces, ce modèle a quatre solutions possibles : l'exclusion compétitive de l'espèce A par l'espèce B, l'exclusion compétitive de l'espèce B par l'espèce A, une coexistence stable des deux espèces, ou un effet pionnier (l'équilibre entre espèces est alors instable et dépend des conditions initiales). La présence d'un effet pionnier indique que le résultat de la compétition dépend beaucoup de l'avantage initial d'une population par rapport à l'autre. Cet effet pourrait rendre compte de la forte variabilité de l'abondance relative des espèces dans des mélanges. Le mélange de deux espèces ou de deux variétés constitue le modèle expérimental le plus simple pour étudier les effets de la diversité. De nombreuses expériences ont tenté de tester les prédictions des équations de Lotka-Volterra en utilisant des dispositifs d'addition ou de substitution (Harper, 1977). Dans les dispositifs d'addition, deux espèces sont cultivées ensemble : la

densité de l'une est maintenue constante et celle de l'autre est variée. Ce type de dispositif, qui permet d'évaluer l'effet propre de l'ajout d'un compétiteur, a un intérêt par rapport à de nombreuses situations de terrain, où une espèce envahit la surface occupée par une autre. Les dispositifs de remplacement (de Wit, 1960) consistent à semer deux espèces en proportion variable, tout en maintenant leur densité totale constante. Dans ce cas, une partie de la compétition au sein d'une espèce (intraspécifique) est remplacée par une compétition entre espèces (interspécifique). Lorsque deux espèces de graminées sont semées en mélange, la production totale excède rarement celle de l'espèce la plus productive (Donald, 1963 ; Harper, 1977). En revanche, la productivité des associations graminées-légumineuses dépasse souvent celle des cultures pures. En effet, à même densité totale, le mélange avec une légumineuse favorise généralement la nutrition azotée de la graminée, mais cet effet interagit avec la fertilisation azotée puisque la fixation symbiotique d'azote est inhibée par l'azote minéral (Cruz et Soussana, 1997). Les interactions graminées $\times$ légumineuses dépendent donc fortement de la disponibilité d'une ressource du sol, l'azote minéral (Frame et Newbould, 1986). Cet exemple souligne que les coefficients d'interaction, qui sont supposés constants dans les équations de Lotka-Volterra, varient en réalité selon la disponibilité des ressources et l'environnement. Pour cette raison, les modèles démographiques fondés sur la seule densité-dépendance, comme celui de Lotka-Volterra, ne parviennent pas à prédire la dynamique d'espèces végétales associées en dehors de la gamme de situations pour laquelle ils ont été calibrés.

Prendre en compte la disponibilité des ressources dans des modèles de dynamique des populations

De nombreux milieux gérés par l'agriculture et l'élevage, comme les prairies ou les parcours, permettent la coexistence de plusieurs dizaines d'espèces végétales. Comment expliquer cette coexistence, si seules quelques ressources (lumière, eau, nutriments) limitent la croissance et la démographie des populations végétales ? Tilman (1980) développe une théorie de la dynamique des espèces végétales fondée sur leur compétition pour des ressources. Le modèle consiste en une paire d'équations de consommation des ressources, qui décrivent la croissance en fonction de l'état et de la dynamique des ressources dans le milieu. Selon ce modèle, la concentration critique d'une ressource R^* est un paramètre clef du succès compétitif. Ce paramètre peut être déterminé expérimentalement en tant que concentration minimale d'une ressource limitante qui permet la survie d'une culture pure d'une espèce. R^* varie en fonction des besoins relatifs en nutriments, qui sont augmentés par les pertes de nutriments (*via* l'abscission des feuilles, le renouvellement des racines ou la défoliation). Si toutes les espèces étaient limitées par un même nutriment, celle qui aurait la valeur de R^* la plus faible exclurait toujours ses compétiteurs, indépendamment de sa densité initiale. Ce modèle ne permet d'expliquer la coexistence locale d'espèces végétales qu'à condition de supposer que chacune est limitée par une ressource différente et que la disponibilité relative des ressources du sol varie dans l'espace ou dans le temps (Grace, 1991). Pourtant, la théorie de Tilman semble pouvoir rendre compte de la dynamique de succession à long terme des espèces dans des friches où le niveau de perturbation est faible (Tilman et

Wedin, 1993). Toutefois, dans de nombreuses situations agronomiques, la gestion induit une perturbation qui interagit avec la compétition : en prairie, la fauche et le pâturage créent des perturbations qui évitent l'invasion par des ligneux et la transition vers la forêt. On ne peut donc se contenter en agronomie de prédire des situations d'équilibre à long terme. Afin de simuler la dynamique des espèces végétales et ses conséquences pour la productivité et la valeur d'usage, il faut décrire, grâce aux connaissances de l'écophysiologie, les interactions hors équilibre entre individus au sein de peuplements gérés comprenant plusieurs espèces.

Modélisation écophysiologique de peuplements plurispécifiques

Cahier des charges des modèles écophysiologiques

La construction d'un modèle de dynamique des populations végétales fondé sur la description des mécanismes écophysiologiques permet de satisfaire simultanément deux objectifs : simuler la dynamique des espèces et quantifier la production végétale. Ce type de modèle permet également de lier écophysiologie et écologie fonctionnelle : à chaque pas de temps, la composition spécifique détermine les flux d'éléments (par l'estimation des processus écophysiologiques) et la disponibilité des ressources. Réciproquement, la disponibilité des ressources structure la communauté (par le biais des interactions plante $\times$ plante, plante $\times$ sol et plante $\times$ herbivore dans le cas des prairies). S'agissant de modèles dynamiques, le temps est nécessairement pris en compte de manière explicite. Les flux correspondent aux dérivées des variables d'état du système biologique modélisé. Comme dans tout simulateur, ces flux sont intégrés numériquement à chaque pas de temps, ce qui conduit à une remise à jour des variables d'état de chaque population végétale. Du fait de la complexité du système modélisé, des hypothèses simplificatrices s'avèrent généralement nécessaires. Elles concernent notamment :

- la compétition pour les ressources. De nombreux modèles de compétition se contentent d'utiliser des coefficients fixes de compétition (ou d'agressivité) pour classer entre elles les espèces et prédire l'évolution des abondances dans un mélange. Une simulation explicite de la capture, du partage entre espèces et de l'utilisation des ressources constitue l'un des apports essentiels des modèles d'écophysiologie. Le bilan des échanges radiatifs permet de simuler la compétition pour la lumière. La simulation des transferts d'eau et de nutriments du sol vers la plante apporte une description fine des compétitions souterraines ;
- le nombre de ressources potentiellement limitantes (lumière, eau, azote, phosphore, potassium...). La plupart des modèles considèrent seulement deux à trois ressources potentiellement limitantes (azote, lumière et eau). Ce choix restreint le domaine d'application du modèle, en excluant toutes les situations où une ressource non modélisée constitue le principal facteur limitant ;
- la structure spatiale du peuplement. Une description simplifiée est fréquemment adoptée en négligeant l'hétérogénéité spatiale dans le plan horizontal. On réduit alors le système étudié à une « soupe végétale » dont la seule dimension spatiale est la structure verticale de la communauté. Cette simplification peut être adaptée pour des peuplements où les espèces sont bien mélangées, elle ne l'est pas pour des cultures intercalaires ou des arbres ;

- la démographie et la morphogenèse. Certains modèles se contentent de simuler la plante comme un ensemble de compartiments (aérien, souterrain...), sans recourir à une description explicite de la démographie (des individus ou des axes) et de la morphogenèse (des parties aériennes et des racines). Ces processus sont alors représentés implicitement par des équations de *turn-over* et d'allocation entre compartiments, celles-ci devant toutefois être paramétrées différemment dans des environnements différents, ce qui limite les possibilités d'utilisation du modèle ;
- la plasticité des plantes. La plasticité phénotypique constitue un moyen d'éviter l'exclusion compétitive, puisque les plantes développent des réactions d'évitement ou de tolérance en réponse à une disponibilité réduite de ressources aériennes ou souterraines (Soussana et Lafarge, 1998). Cette plasticité n'est généralement pas simulée, alors que sa prise en compte pour la forme (rapport parties aériennes/racines, épaisseur des feuilles...) et la composition chimique (teneurs en éléments des tissus...) des plantes peut permettre de simuler de manière plus réaliste la dynamique des espèces en compétition.

Exemple d'outil de simulation d'association graminée-légumineuse

Un modèle fonctionnel et partiellement mécaniste de la croissance de peuplements associant deux espèces fourragères pérennes (graminées ou légumineuses) a été proposé (Soussana *et al.*, 2000). Construit à partir d'un sous-modèle d'allocation, il considère deux ressources (lumière et azote) qui sont partagées entre deux espèces dont la structure verticale est décrite, mais dont on suppose qu'elles forment une communauté homogène dans le plan horizontal. Le sol est considéré, à ce stade, comme une boîte noire dont la minéralisation nette d'azote est constante. Pour chaque espèce, on suppose que la population végétale est constituée par des individus identiques, comprenant tous le même nombre de talles ou d'axes. Le modèle simule à la fois la démographie des populations (ramification, mortalité, émission des feuilles), leur croissance pondérale, leur morphogenèse (taille et hauteur des feuilles) et les flux de carbone (photosynthèse, respiration) et d'azote (absorption, fixation symbiotique). L'application informatique, orientée vers l'objet, comprend cinq modules :

- le module de gestion (coupe, fertilisation, pâturage) ;
- le module d'environnement, qui calcule le microclimat et l'azote minéral fourni à partir du sol et de l'engrais ;
- le module de croissance végétale, qui simule les bilans en carbone et en azote dans la plante et l'allocation aux structures aériennes, aux protéines foliaires et aux racines ;
- le module de morphogenèse aérienne, qui calcule la démographie et la taille des feuilles et des axes ;
- le module de compétition, qui calcule le partage de la lumière entre les feuilles des deux espèces (bilan radiatif) et le partage de l'azote minéral entre leurs racines.

Ce type d'outil de modélisation permet de formuler dans un cadre mathématique et informatique cohérent des hypothèses concernant les liens entre la compétition interspécifique, les réponses plastiques des individus à la disponibilité des ressources et à la défoliation, et la dynamique de populations associées.

Apports et limites de modèles écophysiologiques appliqués à des peuplements complexes

Une fois calibré grâce à des données expérimentales, le modèle présenté ci-dessus permet de simuler de manière assez satisfaisante les effets à court terme de la gestion (rythme de coupe, fertilisation azotée) sur le taux de trèfle dans une association avec une graminée, à condition toutefois de rester dans des conditions compatibles avec les limites du modèle : peuplement au stade végétatif, homogène dans le plan horizontal et sans limitation hydrique ou par le phosphore et le potassium (Soussana et Oliveira-Machado, 2000). Une autre application de ce type de modèle consiste à l'utiliser pour comprendre le rôle d'un trait de morphologie ou de physiologie, toutes choses égales par ailleurs, pour la compétition et pour l'équilibre entre espèces. Par exemple, en accord avec l'observation, le modèle prédit qu'une vitesse faible d'émission des feuilles confère un avantage compétitif à une graminée fourragère lorsque le rythme de coupe est lent.

Cependant, fondés sur une description des mécanismes à l'échelle de la plante, les modèles écophysiologiques comprennent généralement plusieurs dizaines d'équations et un nombre comparable de paramètres pour chaque population végétale décrite. Si tous les paramètres étaient connus avec une grande précision et si, de plus, leurs valeurs étaient constantes d'un site à un autre, il n'en résulterait vraisemblablement pas de difficulté majeure. Toutefois, le fait d'avoir à la fois un grand nombre de paramètres, de fortes incertitudes sur la valeur de certains d'entre eux et des raisons de penser que cette valeur peut varier selon les conditions environnementales (lorsque des paramètres empiriques sont utilisés) crée des difficultés réelles pour l'utilisation de modèles détaillés.

En conclusion, la dynamique des populations végétales a des bases mécanistes qui peuvent être étudiées grâce aux méthodes de l'écophysiologie végétale. La synthèse de ces connaissances sous la forme de modèles dynamiques prédisant l'équilibre entre espèces permet d'évaluer l'exactitude de notre représentation des processus dans la plante et le peuplement. Toutefois, ces modèles mécanistes détaillés demeurent dans le champ de la recherche. Afin de mieux maîtriser la dynamique des espèces associées dans des parcelles agricoles, des outils prédictifs plus simples, nécessitant moins de données d'entrée, devront être développés en valorisant les connaissances acquises grâce aux modèles écophysiologiques.

Chapitre 6

Les modèles en écophysiologie pour l'action en agronomie et la création variétale

Michel GÉNARD, Marie-Hélène JEUFFROY,
Alexandra JULLIEN, Bénédicte QUILOT

Nous avons vu précédemment comment rendre compte d'un peuplement végétal mono- ou plurispécifique, dans son environnement tant physique et chimique que biologique. Pour agir sur celui-ci en vue d'un objectif donné, se posent les questions du choix du mode de représentation pertinent, du degré d'explicitation des processus impliqués et de la précision requise. Nous considérerons ici le choix variétal comme l'une des possibilités d'action. Cette section a pour but de fournir des éléments d'appréciation de ces choix pour une approche multicritère du peuplement végétal, destinée à fournir des produits de qualité en quantité voulue, tout en préservant l'environnement.

» Modèles pour la gestion multicritère des peuplements végétaux

Les travaux de l'agronomie ont longtemps visé à améliorer le rendement des cultures. Dans ce but, de nombreux modèles le simulant ont été mis au point et utilisés pour gérer les cultures. Ces modèles contiennent souvent un module « plante », ou « sous-modèle écophysiologique », utilisant les principes fondamentaux de fonctionnement carboné, azoté et hydrique du couvert. Cependant, de nouveaux critères concernant la qualité des produits (qualité sanitaire, qualité de service, qualité nutritionnelle, qualité gustative...) et, plus récemment, l'impact environnemental des cultures sont de plus en plus fréquemment considérés comme éléments des cahiers des charges de la production. Pour proposer des moyens de gestion des peuplements cultivés visant à atteindre simultanément les objectifs fixés

selon les différents critères attendus à la récolte, il devient nécessaire de prendre en compte, dans les modèles utilisés comme outils de gestion des peuplements et dans les modèles écophysologiques sur lesquels ils s'appuient, de nouveaux processus, et de considérer des gammes de variation différentes des variables classiquement simulées.

Nous proposons ici :

- de définir les types de critères pour rendre compte d'objectifs multiples : rendement, qualité et impacts environnementaux ;
- d'établir les conséquences de ces définitions pour la modélisation ;
- de mesurer comment et sous quelles conditions ces modèles peuvent devenir des outils de gestion des peuplements.

Critères de qualité et d'impact environnemental pour gérer les peuplements végétaux

La qualité est l'« aptitude d'un produit à satisfaire les besoins d'un utilisateur » (Afnor). On distingue quatre domaines de classification des critères de qualité : santé, satisfaction des sens, nutrition et service (Mainguy, 1989). Les produits végétaux non transformés issus de l'agriculture peuvent présenter des critères de qualité dans chacun de ces quatre domaines. Par exemple, la teneur en protéines des grains de blé conditionne leur aptitude à la transformation en boulangerie, en biscuiterie... Il s'agit d'une qualité de service. Des critères comme la teneur en nitrate des laitues ou en mycotoxines des céréales par exemple (Doré *et al.*, 2002a) répondent à des exigences en termes de qualité sanitaire des aliments (santé), la teneur en sucres de la pêche (Quilot, 2003) à des critères de satisfaction des sens, la teneur en matière azotée totale ou le rapport feuille/tige d'une prairie conditionne sa valeur nutritionnelle (Duru et Delabry, 2003). En fonction de la nature du produit, de son utilisation et des utilisateurs potentiels, la nature et les valeurs requises pour caractériser sa qualité seront donc variées.

Le premier obstacle à l'étude et à l'estimation d'un critère de qualité est sa nature souvent qualitative (saveurs, arômes, fraîcheur...). Il est alors nécessaire, en vue d'introduire ce critère dans des modèles de culture, de traduire la qualité étudiée en une variable quantitative. Il convient ensuite de relier cette dernière à des processus écophysologiques que l'on sait modéliser. Ce travail est parfois relativement aisé lorsque la mesure de la variable est facile ou évidente : c'est le cas du calibre de la tomate, de la pomme de terre ou de la banane (diamètre), qui fait directement référence à des fonctions de production classiquement étudiées en écophysologie. Dans ces situations, il est néanmoins nécessaire de transformer la quantité de biomasse produite par plante ou par unité de surface, variable classiquement simulée par les modèles écophysologiques, en une variable de taille d'organe, moins fréquente. Dans le cas du blé, on mesure la teneur en protéines des grains, une variable indirecte d'estimation de son aptitude à la panification qui présente l'avantage d'être directement liée au fonctionnement carboné et azoté de la culture. Cette teneur est donc calculable à partir d'un modèle écophysologique classique. Certains critères de qualité sont parfois plus difficiles à appréhender lorsqu'il s'agit de composants dont la mesure est délicate ou coûteuse (arômes), ou

lorsqu'ils sont issus de processus complexes (maturation), l'écophysiologie s'intéressant très peu aux critères de qualité mettant en jeu les métabolites secondaires. On a alors recours à des indicateurs qui permettent une estimation indirecte ou simplifiée de la qualité étudiée.

Parmi les très nombreux critères environnementaux utilisés aujourd'hui pour évaluer la production agricole (risques de pollution nitrique, de pollution par les pesticides, biodiversité, risques d'inondations, érosion, flux de graines et de pollen engendrant des mauvaises maîtrises de mauvaises herbes, présence d'inoculum...), très peu sont actuellement pris en compte dans des modèles de culture. Les premiers à avoir été privilégiés dans les modèles sont certainement ceux concernant l'azote, sans doute du fait des nombreuses connaissances antérieures acquises sur le fonctionnement azoté des cultures (voir chapitre 7) et du seuil de la teneur en nitrate fixé par la directive européenne 91/6/76. La quantité d'azote minéral contenu dans le sol à la récolte d'une culture et la quantité susceptible d'échapper au prélèvement racinaire au cours du cycle cultural (par exemple du fait de fortes pluies hivernales qui entraînent l'ion nitrate hors de portée des racines) ont été deux variables privilégiées par les modèles visant à servir de base de raisonnement aux techniques culturales (Mary *et al.*, 1997 ; Beaudoin *et al.*, 2004). Avec l'accroissement des connaissances sur les processus de transformation de l'azote apporté sur une culture, les pertes azotées par voie gazeuse ont été plus récemment explicitement prises en compte dans certains modèles de culture (Meynard *et al.*, 2002, pour le modèle Azodyn ; Gabrielle *et al.*, 1998, pour le modèle Ceres). Plus récemment, la teneur trop élevée en pesticides de certaines nappes ou de l'atmosphère a été reliée à l'utilisation croissante de pesticides en agriculture. Cependant, l'étude du devenir des pesticides a démarré depuis trop peu de temps et fait appel à des processus trop complexes pour être déjà prise en compte dans les modèles écophysiologiques.

Selon les cultures prises en compte et l'utilisation prévue des produits récoltés, ces critères peuvent être en synergie ou antagonistes. Ainsi, chez les céréales, il existe un lien entre le rendement, la teneur en protéines des grains et la quantité d'azote minéral restant dans le sol à la récolte (Machet et Recous, 1995) : quand la dose d'azote apporté à la culture croît, le rendement augmente jusqu'à un niveau maximal puis reste constant, la teneur en protéines augmente quasiment linéairement sans présenter de seuil maximal apparent, et la quantité d'azote minéral dans le sol à la récolte commence à augmenter quand la dose d'azote dépasse celle permettant d'obtenir le rendement maximal. De ce fait, pour un blé meunier pour lequel on souhaite maximiser le rendement et atteindre de hautes valeurs de teneurs en protéines, il sera difficile de laisser de faibles quantités d'azote minéral dans le sol ; pour une orge de brasserie, dont l'objectif est d'atteindre des teneurs en protéines inférieures à 11,5 % (Le Bail et Meynard, 2003), les risques de reliquat d'azote minéral élevé à la récolte sont relativement faibles, mais le risque sera grand de limiter le rendement par une fertilisation azotée limitante. Chez le blé dur, les risques de mitadinage (dégradation de la qualité pastière des grains), limitant leur utilisation par l'industrie, sont d'autant plus faibles que le niveau de nutrition azotée de la culture est élevé pendant la période de remplissage des grains (Samson *et al.*, 2004). Dans ce cas, on observe une synergie entre les objectifs de rendement et ceux

de qualité, mais un antagonisme avec l'objectif environnemental. Pour les fruits, la qualité gustative est étroitement corrélée à la composition, en particulier à la teneur en sucres. Or celle-ci décroît quand la croissance des fruits augmente, c'est-à-dire quand la production de l'arbre augmente (Génard *et al.*, 1999 ; Génard *et al.*, 2003). Plus les critères attendus à la récolte seront antagonistes, plus les moyens de gérer le peuplement dans un objectif multicritère sera difficile et plus les solutions proposées seront rares (Loyce, 1998) : il est donc particulièrement nécessaire de hiérarchiser les critères et de proposer des compromis acceptables.

Démarches pour la modélisation multicritère du fonctionnement des cultures

La nature des modèles dépend des critères à simuler

Selon les critères à modéliser (relatifs à la qualité des produits et à l'environnement), les processus généralement simulés dans la plupart des modèles de culture peuvent être suffisants, mais il est parfois nécessaire d'en introduire de nouveaux plus spécifiques. Ainsi par exemple, la teneur en protéines des grains de blé résulte du rapport entre l'accumulation d'azote et de carbone dans les grains. L'azote provient essentiellement de remobilisations depuis les organes végétatifs (Austin *et al.*, 1977) — où il est stocké avant floraison — vers les grains, une petite fraction supplémentaire pouvant être issue de l'absorption postfloraison (Girard, 1997). En revanche, l'essentiel de la biomasse qui s'accumule dans les grains provient des assimilats carbonés issus de la photosynthèse postfloraison. La variabilité de la teneur en protéines des grains résulte donc de l'interaction entre les métabolismes azoté et carboné de la plante après floraison, qui se traduit par le phénomène d'autodestruction de la plante (Sinclair et de Wit, 1976) : la remobilisation d'azote, nécessaire pour le remplissage des grains en azote induit une perte importante d'azote des parties végétatives de la plante, réduisant ainsi sa capacité à photosynthétiser, donc à produire des assimilats carbonés pour le remplissage des grains en biomasse. Il est donc possible de rendre compte de la variabilité de teneur en protéines observée au champ en simulant les processus d'accumulation d'azote dans la culture, de transferts d'azote entre organes au sein de la plante, d'accumulation de biomasse dans la plante, ainsi que l'interaction étroite qui existe entre les métabolismes azoté et carboné pendant le remplissage des grains (Girard, 1997 ; Jeuffroy *et al.*, 2000a et b).

Dans certains cas, il peut être nécessaire de descendre à un niveau d'organisation plus fin pour simuler les processus en cause dans la variation des critères de rendement et de qualité. Ainsi, pour la banane d'exportation, on considère deux critères de qualité : la taille (estimée par le calibre et la longueur), qui conditionne le classement des fruits en différentes catégories de prix, et la durée de vie verte (temps en jours entre la récolte du fruit et le début de sa maturation), qui traduit son aptitude à l'exportation⁴. Reculer la date de récolte permet d'augmenter la taille des

4. En effet, les fruits doivent arriver encore verts dans le pays d'importation pour être ensuite mûris artificiellement à l'éthylène en mûrisserie.

fruits et le rendement, mais conduit à récolter des fruits plus vieux avec un risque important de maturation pendant le transport. Le pilotage des récoltes vise donc un optimum entre rendement et calibre des fruits d'une part, et aptitude à l'exportation, d'autre part. Une approche morphogénétique a été développée pour mettre au point un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité permettant d'affiner le pilotage des récoltes. Il a ainsi été montré (Jullien *et al.*, 2001a et b) qu'il y avait, à l'échelle du fruit, une phase de division cellulaire qui conditionne de façon précoce sa longueur, et une phase de remplissage des cellules qui détermine le calibre et le poids. La vitesse de remplissage du fruit dépend du nombre de ses cellules et la vitesse de remplissage des cellules, du rapport sources/puits pendant cette phase. Le décalage de développement entre les étages florifères du régime induit des compétitions pour les ressources qui affectent soit la phase de divisions cellulaires, soit la phase de remplissage, selon le stade de développement des fruits. Ceci est à l'origine de la variabilité de taille et de poids des fruits au sein du régime à la récolte. La durée de vie verte dépend quant à elle de l'âge du fruit, exprimé en somme de degrés-jours, et n'est pas significativement différente pour les fruits d'un même régime. Pour rendre compte de ces processus dans un modèle, on a besoin principalement d'un module simulant le développement des organes, interagissant avec un module de croissance, tenant compte des principaux facteurs du milieu (température et rayonnement). Cela nécessite de décrire les processus à l'échelle de la cellule, pour des variables de sortie à l'échelle du fruit et du régime. Le choix du niveau d'organisation est également fortement présent dans le cahier des charges de la modélisation pour la culture de tomates (Dayan *et al.*, 1993 ; Bertin, 1995 ; Gary *et al.*, 1995), ou pour celle de kiwis, pour lesquelles la taille individuelle de chaque fruit et leur distribution sont essentielles pour leur commercialisation (Lescourret *et al.*, 1999).

La prise en compte d'une plus large gamme de facteurs limitants dans les modèles utilisés pour gérer les cultures nécessite généralement une complexification de la représentation des processus. C'est le cas notamment de la prise en compte de l'infestation par des parasites, qui peut nécessiter de modéliser le fonctionnement de chaque étage foliaire plutôt que de considérer une surface foliaire globale (cf. chapitre 5). De même, la prise en compte de l'état structural du sol, facteur déterminant de l'élaboration du rendement du pois (Doré *et al.*, 1998) et des reliquats d'azote dans le sol à la récolte (Wibawa, 1992) rend nécessaire une représentation détaillée du système racinaire dans les modèles, alors que de nombreux modèles de culture se contentent actuellement d'une représentation simplifiée (Brisson *et al.*, 1998), voire de l'absence de représentation de ce compartiment (Jeuffroy et Recous, 1999). Or, la prise en compte de ce facteur dans les modèles est nécessaire pour le raisonnement d'un certain nombre de techniques comme les techniques culturales simplifiées ou le non-labour.

La nature des critères conditionne la précision de calcul et le domaine de validité des modèles

L'erreur moyenne de prédiction des modèles simulant le rendement, notamment en grande culture, est souvent de l'ordre de 15 à 20 % de la valeur moyenne observée (Gabrielle *et al.*, 2001 ; Brisson *et al.*, 2002 ; David *et al.*, 2004 et 2005b). Cela peut

suffire pour rendre compte des différences de rendement entre des situations pédo-climatiques contrastées. En revanche, la prise en compte de critères qualitatifs et environnementaux peut conduire à augmenter le niveau de précision requis. Par exemple, chez le blé, les seuils de teneur en protéines proposés pour orienter les grains récoltés vers des débouchés privilégiés nécessitent de prévoir ce critère à moins de 1 % près. L'amélioration de la précision des modèles repose alors plus souvent sur une prise en compte explicite de l'état réel du couvert simulé à un instant donné au cours du cycle de culture que sur une simulation plus mécaniste des processus (Makowski *et al.*, 2004). En effet, celle-ci induit généralement une augmentation du nombre de paramètres, souvent peu aisés à mesurer et donc sources d'incertitude supplémentaire dans les modèles. Ainsi par exemple, la prédiction de la teneur en protéines des grains de blé est meilleure lorsque les simulations commencent au stade de la floraison (Jeuffroy *et al.*, 2000a) plutôt qu'à la sortie de l'hiver (David *et al.*, 2004), avec le modèle Azodyn. Aujourd'hui sont développées des méthodes bayésiennes performantes pour améliorer la précision des modèles à partir de mesures en temps réel (Makowski *et al.*, 2004).

L'utilisation de modèles pour une gestion multicritère des cultures n'est pas non plus sans poser de problèmes, par exemple pour optimiser la gestion des cultures en agriculture biologique. En effet, celles-ci sont caractérisées par des facteurs limitants variés, nombreux et intenses, peu pris en compte dans les modèles habituels (mauvaises herbes, état structural, voir David *et al.*, 2004 ; insectes du colza, voir Valantin-Morison, 2004). Dans ce cas, il convient d'élargir le domaine de validité des modèles existants ou d'adapter leur usage à des gammes de variations différentes, comme le proposent David *et al.* (2004). Ce point fait l'objet de travaux de recherche en cours. Cependant, l'utilisation des modèles pour gérer les peuplements végétaux, c'est-à-dire pour prendre des décisions techniques permettant d'atteindre un objectif donné, implique avant tout que le modèle soit utile pour prendre la bonne décision, et donc pour classer les décisions possibles entre elles. Ces aspects concernant l'évaluation de la précision des modèles et de leur valeur en tant qu'outil d'aide à la décision sont développés dans cet ouvrage dans le chapitre 3.

Utilisations des modèles pour améliorer la gestion des peuplements

Simplification de la représentation des processus

L'analyse écophysiological conduit généralement à une description très détaillée des différents processus en jeu, rendant parfois le modèle qui en est issu trop complexe à utiliser, soit parce qu'il possède de nombreux paramètres difficiles à adapter à de nouvelles situations (nouvelle variété, nouveaux milieux...), soit parce que les entrées requises par le modèle sont difficiles d'accès. Pour faciliter l'utilisation de modèles pour la gestion des peuplements végétaux, il est parfois nécessaire de simplifier la représentation des processus écophysiological connus. Ainsi par exemple, la modélisation de la remobilisation d'azote chez le blé peut être décrite comme la conséquence des différents mécanismes de dégradation protéique au

niveau des feuilles et des tiges, et du transfert, depuis ces organes vers les grains, des acides aminés produits (Vos, 1981 ; Van Keulen et Seligman, 1987), ou par une simple proportion de la quantité d'azote stocké dans les parties végétatives à floraison, le coefficient de remobilisation étant stable pour une large gamme de génotypes et de conditions culturales (Barbottin *et al.*, 2005).

Dans certains cas, la compréhension des mécanismes d'élaboration des critères étudiés permet de traduire le modèle écophysiologique conceptuel en un indicateur simple pour le pilotage des cultures. C'est par exemple le cas de l'indicateur « jus de base de tige » de la méthode Jubil (voir chapitre 1), dérivé de la compréhension des mécanismes d'absorption et de répartition de l'azote dans les plantes et de la mise en évidence de l'intérêt du fractionnement des apports pour piloter conjointement rendement, teneur en protéines des grains et bilan environnemental de la culture. C'est également le cas pour la banane, où l'étude du développement du régime et des fruits a permis de construire un outil de pilotage de la durée de conservation des fruits à la récolte sur la base du calcul des sommes de température. Parfois, le manque de connaissances de certains processus ou l'hétérogénéité dans la description quantitative des processus écophysiologiques conduit même, pour accroître notre performance à gérer les cultures, à utiliser d'autres types de modèles, par exemple composés de relations statiques décrivant de manière plus complète les effets des différentes techniques culturales appliquées sur une culture (Betha, Loyce *et al.*, 2002a). Ces outils sont présentés dans le chapitre 3.

Une difficulté traditionnellement rencontrée dans l'usage de modèles écophysiologiques pour raisonner la gestion des cultures est la difficulté d'accès à l'ensemble des variables d'entrée nécessaires pour que le modèle fonctionne. Une manière de pallier cette difficulté est d'analyser la sensibilité du modèle à ces variables, pour ne chercher à mesurer précisément que celles auxquelles les variables de sortie du modèle seront très sensibles, et faire l'économie des autres, pouvant alors être estimées de manière moins précise. Des méthodes d'analyse de sensibilité performantes ont été proposées et sont en cours d'adaptation pour les modèles de culture (Makowski *et al.*, 2005), mais certaines difficultés techniques restent à résoudre, comme la possibilité de tenir compte des corrélations existant entre les variables analysées ou la possibilité d'étudier la sensibilité de sorties dynamiques du modèle.

Intégration de modèles écophysiologiques dans des cadres plus larges

Gérer un peuplement, c'est lui appliquer un ensemble de techniques visant à atteindre un objectif fixé. Or, les modèles de culture ont rarement les techniques culturales directement en entrée, mais plutôt les facteurs de croissance considérés (quantité d'eau ou d'azote disponible, courbe d'évolution d'une maladie dans le couvert...). Pour pouvoir utiliser un modèle écophysiologique pour gérer un peuplement végétal, il faut donc être capable de hiérarchiser les techniques susceptibles d'avoir une influence sur les critères à simuler (Meynard, 1997) et de représenter — et donc d'introduire dans le modèle — l'effet des techniques à privilégier sur les variables d'état du modèle, pour en simuler l'effet attendu sur les variables de sortie (Meynard *et al.*, 2001). Parmi l'ensemble des techniques

culturelles susceptibles d'être appliquées à une culture, celles qui sont explicitement prises en compte par les modèles sont le plus souvent la date de semis, parfois la densité de semis, la fertilisation azotée (Meynard *et al.*, 2002), l'irrigation (Hook, 1994), la date de fauche dans le cas des prairies, la taille dans le cas des arbres fruitiers (Habib *et al.*, 2001a) et, plus récemment, le choix variétal (Agüera *et al.*, 1997). Certaines techniques culturales sont encore mal prises en compte dans les modèles de culture, pour différentes raisons : la protection fongicide (car la relation entre l'application de fongicide et l'évolution de la maladie est mal connue), les modalités de travail du sol (car la relation entre l'état structural du sol et le fonctionnement de la culture a été peu étudiée), la protection contre les mauvaises herbes (car ses conséquences sur le niveau d'infestation et la nuisibilité des adventices restantes sont difficilement prévisibles).

Les modèles écophysiologiques sont généralement centrés sur une représentation du fonctionnement de la culture, c'est-à-dire des plantes qui la composent. Or, ce fonctionnement est en permanence en interaction étroite avec les composantes du milieu dans lequel les plantes sont situées. De ce fait, les modèles écophysiologiques utilisés pour gérer les cultures sont généralement associés à des modèles décrivant, de manière plus large, l'évolution du milieu sous l'influence des techniques culturales appliquées. Ceci nécessite d'articuler les variables environnementales résultant de l'effet des techniques sur le milieu et les variables environnementales à l'origine des variations du fonctionnement de la culture. Ainsi, les modèles de culture utilisés pour gérer la fertilisation azotée ont tous un module « sol » décrivant le devenir de l'azote issu de la fertilisation azotée ou de la matière organique du sol, et la variable « pont » entre le milieu et la culture est souvent la quantité d'azote minéral disponible dans le sol à un instant donné (Brisson *et al.*, 1998 ; Jeuffroy et Recous, 1999 ; de Willigen, 1991). De même, les modèles qui permettent de raisonner les éléments du système de culture visant à éviter de graves infestations de piétin-échaudage sur blé (*Gaeumannomyces graminis*) sont composés d'un module simulant les conséquences de la maladie sur le fonctionnement de la culture (Schoeny *et al.*, 2001) et d'un module simulant les conséquences du système de culture sur la dynamique de la maladie. Ce type de module n'est pas encore au point pour ce qui concerne les maladies aériennes, pour lesquelles les variables d'entrée des modèles sont encore, le plus souvent, une cinétique d'évolution de la maladie concernée au sein du couvert végétal (cf. chapitre 5).

Les modèles écophysiologiques existants fournissent donc des cadres d'analyse du comportement des cultures, qui peuvent être valorisés en agronomie pour une meilleure gestion des peuplements cultivés.

Ces modèles sont construits selon des objectifs qui sont spécifiques à la culture étudiée et qui conditionnent les processus qu'ils simulent, les échelles de temps et d'espace qu'ils considèrent, la gamme de validité qu'ils couvrent et la précision qu'ils atteignent. Ces modèles peuvent par la suite être simplifiés, complexifiés ou intégrés dans des modèles plus globaux (modèle de culture, modèle de système de culture, modèle sol-plante-atmosphère...) afin soit d'en faciliter l'utilisation (facilité d'accès aux variables d'entrée et/ou aux paramètres), soit d'en améliorer la représentativité. Au fur et à mesure de l'avancement des connaissances, de nouveaux processus sont introduits dans les modèles. On peut ainsi simuler, outre

le rendement, des variables de qualité des produits ou d'impact environnemental, et les modèles peuvent ainsi contribuer à une gestion multicritère des conduites culturales. De même, le nombre de facteurs limitants pris en compte augmente (azote, eau, maladies, état structural du sol, variété...). Ceci renouvelle la possibilité de raisonner une technique culturale en fonction de son effet, explicité de manière plus ou moins mécaniste, sur le fonctionnement de la culture et en interaction avec les autres techniques.

On peut envisager que les modèles à venir pourront également se nourrir des apports d'autres disciplines sur certains processus encore peu intégrés de manière mécaniste dans les modèles de culture. On pourra par exemple envisager une modélisation plus fine de l'élaboration de la qualité (profils d'acides gras, éléments minéraux, nature des sucres, arômes...), une modélisation des effets signaux et des effets seuil pour rendre compte notamment des régulations hormonales... La prise en compte de ces processus décrits à l'échelle de la cellule ou de l'organe en physiologie cellulaire dans des modèles d'écophysiologie nécessite de pouvoir intégrer les processus à l'échelle de la plante et d'explicitier leurs interactions avec les autres facteurs déjà pris en compte dans les modèles. Le problème de changement d'échelle se pose également dans le cas où la représentation du peuplement comme un couvert homogène symbolisé par une plante moyenne (modèle « *big leaf* », voir partie 1) n'est plus valide.

► Modèles écophysiologiques pour la génétique quantitative et l'innovation variétale

D'abord empirique, l'amélioration variétale s'est progressivement basée sur une discipline scientifique à part entière, la génétique, à partir des découvertes de Mendel en 1865 sur l'hérédité des caractères. Plus récemment, les marqueurs moléculaires associés à des méthodes biométriques ont constitué de nouveaux outils permettant d'identifier des gènes contrôlant les caractères des plantes. Cependant, les généticiens se heurtent encore à deux difficultés majeures. La première est que les caractères-objets de la sélection sont complexes (rendement, qualité des produits, résistances aux maladies...) : ils résultent de nombreux processus imbriqués et sont donc contrôlés par de nombreux gènes. La deuxième difficulté provient du fait que ces caractères sont sous l'influence de l'environnement et des pratiques culturales. Cela se traduit souvent par de fortes interactions génotype $\times$ environnement $\times$ pratiques culturales qui rendent difficiles les travaux de génétique et leur application en sélection. Une démarche permettant de faire face simultanément aux deux difficultés consiste à étudier un caractère quantitatif *via* un modèle écophysiologique qui décrit son élaboration en fonction des conditions environnementales et des pratiques culturales. Au lieu d'appliquer directement les outils d'analyse génétique à ce caractère, on les applique aux paramètres du modèle écophysiologique qui interviennent dans les différentes fonctions d'élaboration de ce caractère (Shorter *et al.*, 1991). La connaissance de ces paramètres pour chaque génotype permet d'en déduire, *via* le modèle écophysiologique, chaque phénotype pour un environnement et des pratiques culturales donnés. On s'attachera dans ce qui suit à

définir le type de modèle écophysologique nécessaire à cette démarche, et on montrera comment on y introduit l'information génétique. On présentera ensuite l'intérêt du couplage entre modèle écophysologique et modèle génétique. Enfin, on montrera comment les modèles écophysologiques peuvent contribuer à l'amélioration des programmes de sélection.

Quels modèles écophysologiques ?

Bien que des essais aient été réalisés avec un certain succès chez les organismes unicellulaires (*et al.*, 1999), il est impossible, dans l'état actuel des connaissances, de représenter dans un modèle l'ensemble des fonctions associées à l'expression des gènes d'une plante. La modélisation à l'échelle de l'organe, de la plante ou du couvert végétal est le domaine des modèles écophysologiques, lesquels sont fondés sur des lois physiques et biologiques qui régissent le fonctionnement des plantes à ces différentes échelles. Ces lois, qui déterminent les flux hydriques et carbonés, le bilan d'énergie, etc., sont caractérisées par des paramètres décrivant des caractéristiques de l'environnement — notamment les propriétés hydrauliques du sol, le microclimat — ou de la plante — sa conductance hydraulique, sa photosynthèse maximale, sa respiration d'entretien à 20 °C... Les processus qu'elles décrivent sont souvent soumis à des régulations génétiques coordonnées de telle façon que la plante réagisse de façon prévisible à l'environnement. Ces lois et les régulations associées sont définies par un ensemble limité de paramètres (de quelques dizaines à quelques centaines) qui sont des caractéristiques des génotypes appelées « coefficients génétiques », à comparer avec les vingt à quarante mille gènes d'une plante. Tout se passe donc comme si un nombre limité de gènes présents dans la plante étaient nécessaires à son fonctionnement (White et Hoogenboom, 2003), ou comme si des groupes de gènes avaient des actions coordonnées (Tardieu, 2003) qui contrôlèrent des caractères définissant les caractéristiques biophysiques de la plante (conductance hydraulique, plasticité des tissus, etc.), et des « métamécanismes » définissant la réponse de la plante à l'environnement et aux pratiques culturales. Ces métamécanismes sont définis par Tardieu (2003) comme des courbes de réponse à un facteur de l'environnement ou à un signal de la plante.

Les modèles écophysologiques ainsi définis doivent être capables de révéler des propriétés émergentes, résultant par exemple d'interactions entre processus qui peuvent représenter des phénomènes de pléiotropie (un gène affectant plusieurs caractères) ou d'interactions entre processus et environnement ou entre pratiques culturales. Ainsi, Lescourret *et al.* (2001) ont montré, en utilisant un modèle de croissance de fruit, que la variation d'un coefficient génétique lié à la conductance de la peau de la pêche à l'eau influait sur de nombreuses variables caractérisant le fruit (transpiration, potentiel hydrique, pression de turgescence, masse du fruit), et ce de façons différentes selon l'état hydrique de la plante.

Les coefficients génétiques à considérer dans les travaux de génétique sont les paramètres des modèles dont la variation est forte dans les populations étudiées et qui influent grandement sur les caractères agronomiques (rendement, qualité du produit, résistance aux pathogènes...). Certains processus physiologiques sont communs aux génotypes d'une population, voire aux espèces, et il n'est pas

nécessaire de les caractériser par des coefficients génétiques (Boote *et al.*, 2003). Ainsi Quilot *et al.* (2004a) ont-ils montré que la photosynthèse maximale en rayonnement saturant, qui est un paramètre important dans les modèles, ne varie pas selon les génotypes chez la pêche, et semble même invariante dans le genre *Prunus*. En ce qui concerne les processus variables entre génotypes, les coefficients génétiques importants sont ceux qui influencent grandement les caractères agronomiques. C'est par l'analyse de la sensibilité du modèle à ses paramètres que l'on peut identifier ces coefficients. Ce type d'analyse croise souvent la variation des coefficients génétiques, de l'environnement et des pratiques culturales, et en analyse l'effet sur les performances de la culture. Ainsi Boote *et al.* (2003) montrent-ils, en utilisant le modèle Cropgro, que l'augmentation du rendement du soja est possible en situation de stress hydrique en augmentant le coefficient génétique correspondant au taux de progression des racines en profondeur. L'analyse de sensibilité peut permettre de réduire de façon importante le nombre de coefficients génétiques à étudier (par exemple une diminution de 25 à 10, voir Quilot *et al.*, 2002).

Les coefficients génétiques étant définis, il convient de les mesurer. L'analyse de la sensibilité du modèle aux coefficients génétiques et aux facteurs environnementaux et culturaux permet de déterminer, pour un coefficient donné, les meilleures conditions de culture de la plante pour effectuer sa mesure. La mesure des coefficients génétiques est souvent lourde à mener car elle doit se faire sur de nombreux génotypes. Mavromatis *et al.* (2001), Welch *et al.* (2002) et Boote *et al.* (2003) ont utilisé les expérimentations multilocales effectuées par les agronomes et les améliorateurs pour estimer statistiquement certains des coefficients génétiques, en utilisant le modèle comme un outil d'optimisation. Ces expérimentations de routine sont intéressantes à exploiter car elles concernent de nombreuses variétés cultivées sous des conditions environnementales et culturales variées. Un certain nombre de variables d'entrée comme le climat, le type de sol et les pratiques culturales sont notées. Seuls quelques caractères d'intérêt sont mesurés (rendement, date de maturité, poids du grain, taille du fruit, parfois la composition). Malgré cette limitation, cette approche a donné des résultats intéressants. Le modèle permet de représenter les effets de l'environnement et des pratiques, et on recherche par des méthodes d'optimisation les coefficients génétiques qui permettent de rendre le mieux compte de la variabilité génétique des caractères mesurés. Des mesures plus précises des coefficients génétiques sur un échantillon de génotypes sont un complément utile pour tester la démarche.

Quelle que soit la démarche suivie, l'étude de nombreux génotypes impose souvent de se satisfaire d'estimations des coefficients génétiques entachées d'erreurs. Lorsque celles-ci sont, pour un coefficient donné, de l'ordre de grandeur de la variabilité observée dans la population, ce coefficient n'est pas utilisable pour des études génétiques. En résumé, un paramètre de modèle sera un bon coefficient génétique si sa variation influe fortement sur les performances simulées (rendement, qualité, etc.), s'il est très variable dans la population et s'il est estimé avec une faible erreur.

Couplage entre modèles écophysiologiques et génétiques

Le marquage moléculaire permet de connaître, au moins partiellement, le génotype aux différents locus marqueurs importants pour un caractère. En revanche, on ne peut connaître le phénotype pour ce caractère car il dépend de l'environnement. Les coefficients génétiques sont des caractères qui font exception à cette règle, car ils sont peu dépendants de l'environnement dans la gamme de validité du modèle. On peut en théorie prédire leur valeur si l'on connaît le génotype. C'est sur la base de cette propriété qu'est intégrée l'information génétique dans les modèles de simulation. Le phénotype peut ensuite être simulé dans différentes conditions de culture de la plante. White et Hoogenboom (1996) et Hoogenboom *et al.* (1997) ont remplacé certains coefficients génétiques du modèle Beangro par des équations permettant de recalculer la valeur de ces coefficients en fonction du génotype pour certains gènes majeurs. Les génotypes de trente variétés de haricots ont été décrits pour sept gènes majeurs avec chacun deux allèles, l'un dominant, l'autre récessif. Les effets de ces gènes qui affectent la phénologie, la croissance et la taille des graines, ont été estimés par régression linéaire entre la valeur du coefficient génétique mesuré et le génotype des trente variétés. Cette démarche, bien que séduisante, présente l'inconvénient de ne pouvoir s'appliquer qu'à des caractères contrôlés par des gènes majeurs bien identifiés.

Lorsque les coefficients génétiques ont un déterminisme génétique complexe impliquant de nombreux gènes à effet individuel faible, on peut rechercher des QTL (*quantitative trait locus*) qui permettent de positionner les gènes sur le génome, de définir leur origine parentale, d'estimer leur effet et leur mode d'action (dominance, épistasie, etc.). La démarche permet de calculer les valeurs des coefficients génétiques à partir du génotype caractérisé par le marquage moléculaire. Concrètement, pour chaque coefficient génétique, une équation prédit sa valeur en fonction de l'expression des allèles présents aux locus marqueurs des gènes impliqués dans son contrôle. Ces équations sont ensuite incluses dans le modèle de simulation. Yin *et al.* (2000) ont montré que l'information issue de l'analyse des QTL pouvait remplacer avec succès les valeurs des coefficients génétiques utilisées dans un modèle prédisant le rendement de l'orge. Buck-Sorlin et Bachmann (2000) ont appliqué cette démarche à un modèle d'architecture qui prédit la morphologie d'épis d'orge de génotypes créés à partir de listes d'allèles présents sur des QTL. Les interactions entre allèles (dominance, additivité) ou entre gènes (effets épistatiques) sont prises en compte. L'approche a été testée avec succès par Reymond *et al.* (2003) en utilisant un modèle qui décrit les réponses de l'élongation foliaire du maïs à la température et au déficit hydrique. Plusieurs essais, en différents lieux et en différentes années, ont été analysés afin que les courbes de réponse à l'environnement soient établies et les coefficients génétiques correspondant estimés pour chacun des cent génotypes de la descendance étudiée. Un travail similaire mais utilisant un modèle écophysiologique beaucoup plus complexe a été réalisé sur la qualité de la pêche (Quilot, 2003). Douze coefficients génétiques qui interviennent dans la croissance du fruit et du noyau, dans les flux d'eau et dans l'accumulation des sucres, ont été sélectionnés parmi les quarante paramètres du modèle. Des QTL de ces coefficients ont été colocalisés avec des QTL des variables de qualité (masse du fruit, teneur en sucres,

etc.), ce qui permet d'interpréter le rôle des gènes sous-jacents dans l'élaboration de la qualité (figure 2.12).

Méthodologie de la sélection variétale assistée par modèle écophysiologique

L'intégration de l'information génétique dans les modèles, la capacité de ceux-ci à rendre compte des interactions entre les processus physiologiques, la prise en compte de l'environnement et des pratiques de gestion des plantes font des modèles écophysiologiques des outils pertinents pour l'élaboration des programmes de sélection variétale. Le principe d'une sélection variétale assistée par les modèles écophysiologiques peut se décliner en quatre étapes successives. Ces étapes peuvent toutes être effectuées dans un premier temps de façon théorique par le biais de simulations. On peut ensuite envisager de les mettre en pratique, avec l'aide de généticiens et d'améliorateurs, pour créer de nouvelles variétés.

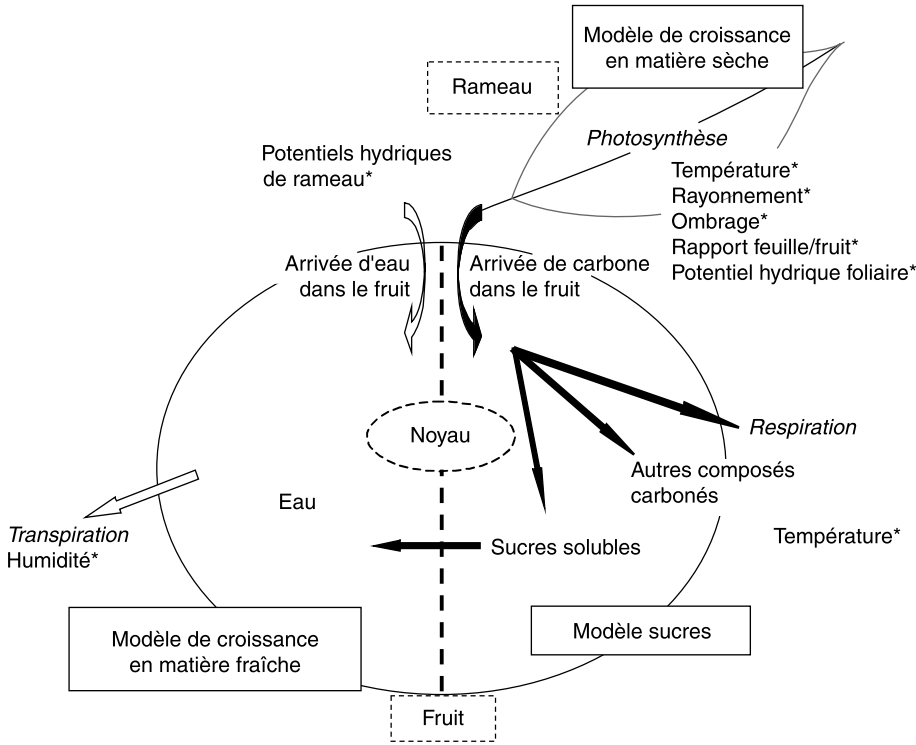
La première étape consiste en la définition d'un objectif de sélection multicritère. L'utilisation des modèles écophysiologiques peut aider à la définition d'objectifs réalistes. On peut par exemple chercher à augmenter l'accumulation des sucres dans la pèche, mais l'utilisation du modèle écophysiologique nous enseigne que, ce faisant, on sélectionnera uniquement des génotypes à production tardive (Quilot *et al.*, 2004b). On peut désirer augmenter la teneur en protéines du blé ou du soja, cependant les modèles de simulation indiquent qu'une diminution d'environ 1 % du rendement accompagnera toute augmentation d'1 % de la teneur en protéines (Boote *et al.* 1996).

La seconde étape doit déterminer les valeurs des coefficients génétiques qui permettent d'obtenir les caractères recherchés dans un ou plusieurs environnements pédoclimatiques et techniques, de façon à définir des idéotypes. La démarche doit prendre en compte l'existence d'interactions entre génotype et milieu modifié par les pratiques. Chapman *et al.* (2002) étudient ces interactions sur le sorgho par simulation, en considérant de nombreuses années climatiques (plus de cent) et différents sites. La recherche des idéotypes est basée sur des procédures d'optimisation qui permettent de sélectionner les coefficients génétiques et les pratiques culturales qui maximisent les caractères recherchés (rendement, qualité, etc.) dans un ou plusieurs contextes environnementaux. Hammer *et al.* (1996) ont développé cette approche pour optimiser la date de maturité (coefficient génétique) et la densité de semis, qui maximisent le rendement chez le tournesol. De même, Yin *et al.* (1997) optimisent la durée de préfloraison pour maximiser le rendement du riz. Afin de prendre en compte les corrélations génétiques observées entre coefficients génétiques qui limitent le domaine des situations possibles (Yin *et al.*, 2003), il faut prévoir d'introduire des contraintes sur les valeurs de ces coefficients.

La troisième étape est celle de la caractérisation des génotypes, qui permet d'obtenir des valeurs de coefficients génétiques proches de celles des idéotypes recherchés. Il s'agit d'identifier les combinaisons d'allèles nécessaires aux locus associés à chaque coefficient génétique. Il est possible de déterminer de telles combinaisons dans la mesure où :

- les coefficients génétiques sont souvent représentés par des combinaisons linéaires des gènes ou de leur interactions (White et Hoogenboom, 2003) ;
- le nombre de QTL détectés pour un paramètre n'est jamais très élevé ;
- le nombre d'allèles possibles à chacun de ces locus est faible.

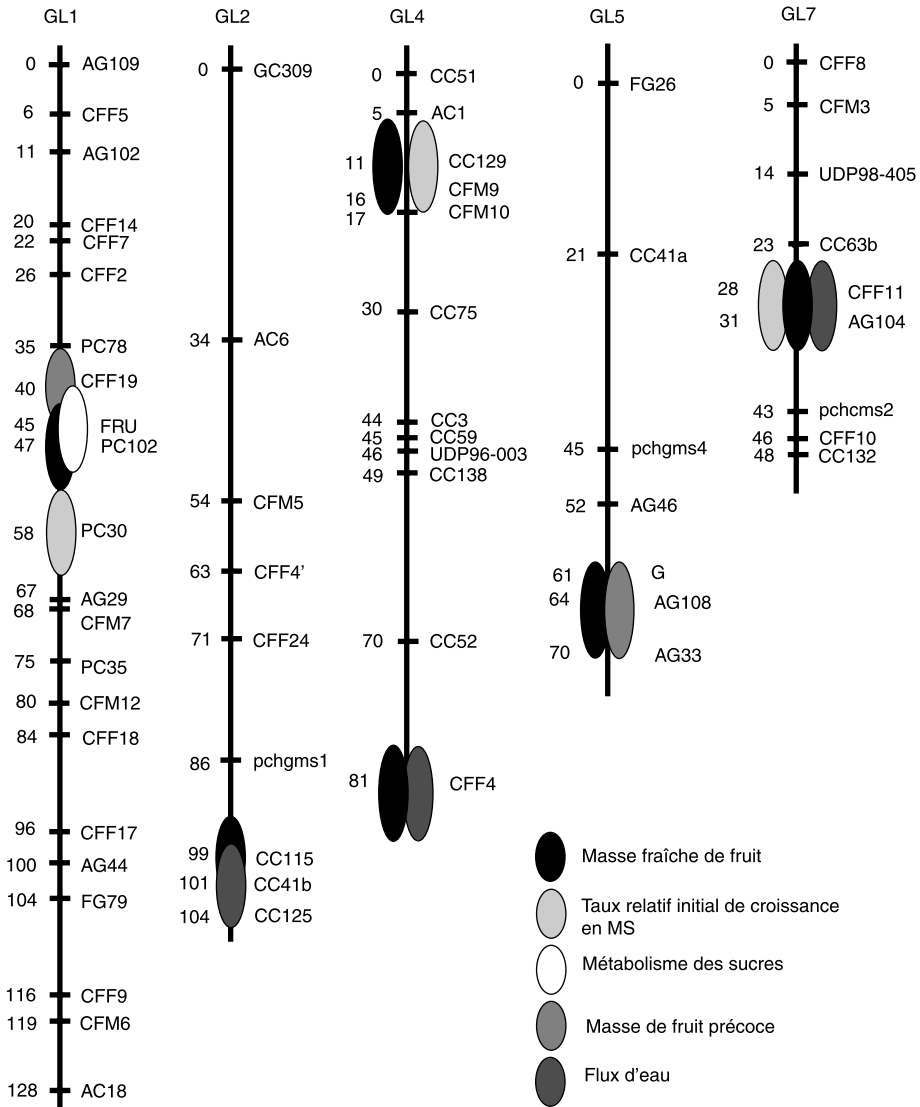
La quatrième étape consiste à proposer des stratégies de croisements permettant d'obtenir les génotypes recherchés. À cette fin, les modèles écophysiologiques, dans lesquels l'action des gènes sur les coefficients génétiques a été intégrée, peuvent être couplés à des modèles simulant le changement génotypique au fil des différentes étapes d'un programme de sélection. Ainsi le modèle Apsim, qui simule l'effet de l'environnement et de l'action de quinze QTL sur le rendement du sorgho, a-t-il été couplé au simulateur de programme de sélection Qu-Gene (Chapman *et al.*, 2003). Ces auteurs montrent que bien que l'action des gènes sur les caractères physiologiques soit définie comme de simples effets additifs, de l'épistasie et de



* Variables d'entrée

Dans un premier temps, le modèle de croissance en MS calcule le flux de carbone entrant dans le fruit. Dans un second temps, ce carbone est utilisé par le modèle « sucres » pour calculer la quantité de sucres solubles totaux dans la pulpe du fruit. Dans un troisième temps, on calcule le potentiel osmotique dû aux sucres solubles puis l'entrée d'eau qui en résulte. Ceci permet d'établir la masse fraîche des fruits et de calculer les concentrations en sucres dans la pulpe fraîche.

Figure 2.12a. Schéma d'un modèle écophysiologique prédisant la croissance de la pêche en matière sèche et les teneurs en sucres totaux de la pulpe.



Représentation de cinq des huit groupes de liaison (GL) pour une population BC₂ issue d'un croisement interspécifique entre *Prunus davidiana* et une variété commerciale de pêcher (*Prunus persica*). Les marqueurs sont listés à droite de chaque groupe de liaison, les distances à gauche (cM).

Sur les groupes de liaison 1, 4 et 7, les QTL de la masse fraîche sont colocalisés avec des QTL du taux relatif initial de croissance en MS de la pulpe (même marqueur détecté ou même région). Dans ce cas, c'est la demande de croissance en MS du fruit qui influence la masse fraîche. Sur le groupe de liaison 1, ces QTL sont également colocalisés avec des QTL de deux paramètres intervenant dans le métabolisme des sucres et la croissance précoce du fruit. Enfin, sur les groupes de liaison 2, 4 et 7, les QTL de la masse fraîche du fruit sont colocalisés avec des QTL d'un paramètre intervenant dans les flux d'eau dans le fruit.

Figure 2.12b. Colocalisation des QTL de la masse fraîche de fruit avec des QTL de différents coefficients génétiques du modèle écophysiologique.

l'interaction gène $\times$ environnement ont été produites pour le rendement de cette culture. Les génotypes sélectionnés comme optimaux étaient différents selon l'environnement cible considéré.

Ces quelques pages montrent que les modèles écophysiologiques sont de nouveaux outils de la génétique quantitative et de la sélection variétale. Il reste cependant beaucoup à faire dans le développement des modèles écophysiologiques, notamment dans la prise en compte des interactions entre les différents aspects du fonctionnement physiologique des plantes et de l'influence des facteurs environnementaux et culturels. Il y a un urgent besoin de modèles capables de représenter des systèmes complexes et de produire des propriétés émergentes.

Conclusion

Bertrand NEY

Ce chapitre avait pour but de présenter les connaissances les plus récentes sur le fonctionnement du peuplement végétal, un des objets d'étude de l'écophysiologie, et leur utilisation en agronomie. Il n'avait pas pour objectif de décrire de façon exhaustive les mécanismes ni les méthodes propres à cette discipline que l'on trouvera dans des ouvrages dédiés mentionnés ci-après.

Nous avons mis l'accent sur les modes de représentation du peuplement végétal en tant que surface d'échange avec le milieu ou comme collectivité d'individus interagissant, et sur la modélisation de ce fonctionnement. Sans oublier les bénéfices liés à la production de connaissances plus analytiques dans les sciences du végétal, ce sont bien les efforts faits sur l'intégration de niveaux d'organisation emboîtés qui ont permis de mieux expliciter le fonctionnement d'un objet complexe comme le peuplement végétal et de cerner les propriétés émergentes de ce système, comme on l'a vu tout au long de ce chapitre.

L'un des intérêts de la modélisation est son caractère heuristique. Prise dans son acception conceptuelle, elle nous permet de proposer un cadre théorique de fonctionnement du système complexe que nous étudions. Quantificatrice, elle nous laisse entrevoir un renouvellement des connaissances sur les régulations et les rétrocontrôles que nous avons évoqués précédemment. Un autre intérêt de la modélisation est d'ordre opérationnel. De nombreux modèles de culture sont basés sur des connaissances du fonctionnement du peuplement végétal et permettent la gestion de ce peuplement en vue d'un objectif. Ces modèles font souvent appel à des lois robustes issues des propriétés émergentes du système. Le modèle de production de biomasse élaboré par Monteith, par exemple, et repris dans les principaux modèles existant, fait appel à une efficacité de transformation du rayonnement absorbé en biomasse. D'une équation curviligne de la photosynthèse à l'échelle du centimètre carré de feuille et par seconde, les intégrations à l'échelle du couvert et à pas de temps long rendent linéaire la correspondance entre biomasse produite et rayonnement absorbé, avec une valeur constante selon les métabolismes carbonés C3 ou C4. Les deux démarches, pour comprendre ou pour agir, ne font cependant pas forcément appel aux mêmes types de modélisation. « Prédire n'est pas expliquer »,

comme l'écrit René Thom dans le titre d'un de ses ouvrages (Thom, 1997). Les modèles pour comprendre permettent de formuler des hypothèses ou des visions nouvelles et montrent les défauts de connaissances, alors que les modèles pour agir doivent fournir des prédictions précises et fiables. Le nombre de paramètres est souvent élevé dans les premiers. Ils sont contingents des conditions qui les ont vu naître, et les erreurs cumulées sur les paramètres en font souvent de mauvais prédicteurs. La recherche de l'équilibre entre le degré d'explicitation des mécanismes dans les modèles pour l'action et les coûts et erreurs afférents à leur complexification reste un enjeu majeur.

Les nouvelles manières de produire — avec réduction des intrants en particulier — et les objectifs plus diversifiés assignés à l'agriculture en termes de qualité, de respect de l'environnement, etc. rendent également nécessaire un approfondissement des connaissances actuelles sur le fonctionnement du peuplement végétal, voire leur renouvellement. Au moment où les facteurs limitants deviennent multiples au champ, leurs effets en interaction sur le peuplement doivent être investigués. Nos modèles de culture n'y répondent pas encore, ou mal. Peu de connaissances sont encore produites sur les relations entre les éléments nutritifs, sur leur interaction avec la nutrition hydrique, ou sur leurs liens avec les bioagresseurs par exemple. Ces éléments sont pourtant essentiels pour raisonner fertilisation et irrigation, et pour construire une protection des plantes véritablement intégrée. Les nouveaux formalismes mathématiques de représentation de la plante en population, que nous avons vus dans ce chapitre, permettront sans doute de répondre partiellement à ces questions. Par une vision plus explicite de la plante, ils nous laissent espérer avoir une meilleure connaissance de l'élaboration de la qualité des produits (dans sa complexité), et donc de meilleurs outils de pilotage des cultures. La représentation plus explicite de la plante en peuplement et de ses relations avec l'environnement permettra de mieux quantifier les relations de compétition dans un peuplement végétal, mono- ou plurispécifique, mais aussi avec d'autres populations présentes dans la parcelle cultivée.

Pour en savoir plus

Jones, 1992 ; Maillard et Bonhomme, 1998 ; Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1990 ; Winner *et al.*, 1991 ; Lea et Morot-Gaudry, 2001 ; Lemaire, 1997 ; Fosket, 1994 ; Thom, 1997.

Partie 3

Effets des systèmes de culture sur l'évolution des états du milieu cultivé

Jean ROGER-ESTRADE, coordinateur

Introduction

Jean ROGER-ESTRADE, Guy RICHARD, Jacques CANEILL

La notion d'« agrosystème »¹ découle directement de celle d'« écosystème », objet d'étude de l'écologie, constitué d'un biotope — milieu d'accueil d'une communauté d'espèces (la biocénose) à laquelle il fournit support, abri, énergie et nutriments. L'agronome définit, dans un agrosystème, quatre composantes fondamentales : le sol et l'atmosphère (qui correspondent au biotope), le peuplement végétal cultivé (pouvant être plurispécifique : agroforesterie, semis sous couvert...) et l'ensemble des autres organismes vivant avec ce peuplement, dans le sol ou l'atmosphère, qui correspond à la biocénose. Pour l'agronome, le peuplement végétal cultivé est un élément prépondérant de ce système ; il est placé au cœur d'un ensemble dont les autres composantes constituent le « milieu cultivé ». En agronomie, la notion de milieu cultivé recouvre donc non seulement le biotope, mais également une partie de la biocénose, communément désignée sous l'expression « composante biologique du milieu ».

Au niveau d'organisation correspondant à la parcelle, la définition des limites du milieu cultivé revêt une part d'arbitraire : la couche atmosphérique prise en compte est celle interagissant avec le peuplement cultivé et les bioagresseurs, elle dépend donc de la nature de ces derniers. De même, concernant le sol, le volume que l'on considère est celui qui correspond à la zone d'interaction avec le fonctionnement des racines, le profil cultural : « ensemble des couches de terre individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines des végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces actions » (Hénin *et al.*, 1969). L'épaisseur de sol considérée dépend donc de la profondeur d'action des outils ou d'enracinement des cultures.

Ces limites ne sont pas étanches : l'agrosystème est un système ouvert, et l'on peut distinguer trois types d'échanges avec l'extérieur :

– les échanges qui découlent tout simplement de l'exploitation par l'agriculture, qui entraîne l'exportation hors du champ d'une partie de la biomasse produite et des

1. On parle d'« agrosystème », d'« écosystème cultivé » ou d'« agroécosystème » (très proche du terme utilisé généralement en anglais « *agroecosystem* »). Déjà, en 1969, S. Hénin définissait l'agronomie comme une « écologie appliquée au champ cultivé ».

éléments minéraux qu'elle contient, et l'importation de matières minérales et organiques lors des opérations de fertilisation et d'amendement ;

– les échanges verticaux, avec l'atmosphère vers le haut et la lithosphère et l'hydrosphère vers le bas. De par sa position d'interface, l'agrosystème joue un rôle majeur dans la plupart des cycles biogéochimiques (eau, azote, carbone...). En effet, les caractéristiques du milieu cultivé (modifiées par l'usage qu'en fait l'agriculteur) conditionnent fortement l'intensité et la vitesse des échanges entre ces grands compartiments : ainsi par exemple, la structure du sol joue un rôle déterminant dans le cycle de l'eau, et les micro-organismes qui l'habitent dans ceux du carbone et de l'azote ;

– les échanges latéraux enfin, dans la mesure où certaines composantes du système peuvent être modifiées par des transferts entre parcelles cultivées ou entre celles-ci et le milieu non cultivé (bordures, bois...). C'est le cas des disséminations par le vent d'agents pathogènes à partir d'une source infectieuse ou, dans un bassin versant, de l'entraînement par ruissellement de particules de terre éventuellement porteuses de résidus de produits pesticides ou de phosphore. Ces modifications dépendent alors de la position des systèmes de culture les uns par rapport aux autres dans l'espace agricole.

Historiquement, l'étude de l'effet des systèmes de culture sur les états du milieu cultivé a d'abord répondu au souci de se donner les moyens de préserver la capacité du milieu à produire. À cette préoccupation s'est ensuite ajoutée celle de protéger l'environnement, initialement à travers le contrôle des fuites d'éléments polluants vers l'eau et l'atmosphère, plus récemment avec la maîtrise des flux entre parcelles cultivées ou entre celles-ci et l'espace non cultivé, ou en cherchant à préserver ou à accroître la biodiversité dans les agrosystèmes. L'un des traits marquants de cette évolution est l'importance croissante de l'intérêt porté à la composante biologique de l'état du milieu.

Maintenir (ou améliorer) la fertilité en compensant les exportations (d'eau, d'éléments minéraux, de carbone) par les cultures a été, dès que l'on a voulu élever le niveau de production, l'un des objectifs majeurs de l'agronomie. Cette conception du maintien de la fertilité du milieu, essentiellement à travers la maîtrise de la quantité d'éléments nutritifs, a peu à peu évolué vers une vision plus complexe. Ceci a conduit Boiffin et Sebillotte (1982) à proposer la notion d'« aptitudes culturelles » pour caractériser le milieu cultivé dans sa fonction productive. Cette approche permet une appréciation plus objective et plus pertinente que la seule notion de fertilité : elle tient également compte du climat et introduit dans l'évaluation la souplesse d'utilisation du milieu, le coût d'extériorisation des potentialités ou de l'optimisation de l'efficacité de l'utilisation des intrants.

À partir de la fin des années 1980, l'émergence des préoccupations concernant l'impact de l'agriculture sur la qualité des sols, de l'eau et de l'atmosphère a amené les agronomes à s'intéresser aux rôles multiples joués par le sol dans les cycles biogéochimiques, en élargissant le champ d'investigation de l'effet des systèmes de culture aux fonctions environnementales du sol (Boiffin et Stengel, 1999). Il ne s'agissait plus seulement de comprendre comment le milieu cultivé et sa transformation par les techniques agissaient sur la production végétale (en quantité et qualité), mais également d'appréhender l'impact des techniques culturales sur les

fonctions qu'il remplit dans les processus qui gouvernent la qualité de l'eau, de l'air et des sols. La caractérisation de l'aptitude culturale ne suffisait alors plus : il fallait une évaluation plus globale de la qualité du milieu cultivé². Ce concept multicritère a fait, en ce qui concerne le sol, l'objet de nombreux débats dans la communauté des agronomes et des chercheurs en sciences du sol, mettant en cause la pertinence même d'une définition de la qualité. L'un des points d'achoppement est en effet la question de savoir si les systèmes de culture doivent systématiquement viser au maintien (ou à l'amélioration) d'une qualité particulièrement difficile à caractériser et à évaluer³, ou si l'objectif à atteindre n'est pas plutôt la définition de systèmes de culture visant une liste de buts à atteindre (relatifs à la productivité et à la protection de l'environnement), liste définie en tenant compte des spécificités du milieu (y compris le climat), de la nature des productions et des moyens disponibles pour cultiver (Sojka *et al.*, 2003).

Enfin, toujours dans le cadre d'une meilleure maîtrise de l'impact de l'activité agricole sur l'environnement, la question des relations spatiales entre systèmes de culture au sein d'un territoire agricole a peu à peu émergé en tant que question de recherche à part entière. Cet aspect sera développé dans la quatrième partie de cet ouvrage.

En reprenant un point de vue propre à l'écologie qui envisage l'écosystème comme un système complexe de relations fonctionnelles (Gliessman, 1990), on peut considérer que la mise en œuvre d'un système de culture entraîne une altération des relations entre les organismes vivants sur la parcelle cultivée et leur milieu physico-chimique, entre les composantes physique et chimique du milieu cultivé et, au sein même de la composante biologique, entre les différentes populations qui vivent avec le peuplement végétal cultivé. Ces relations fonctionnelles se classent en trois grandes catégories.

Celle mettant en jeu des flux d'énergie. L'un des éléments du raisonnement des systèmes de culture concerne en effet l'efficacité avec laquelle le rayonnement global incident est utilisé pour produire de la biomasse utile, compte tenu des contraintes thermiques et hydriques (voir le chapitre 4). À travers le choix de la date et de la densité de semis ou celui de la précocité de la variété, il s'agit de concentrer sur la plante d'intérêt l'énergie reçue, afin de favoriser la production utile au détriment de celle des autres organismes. La photosynthèse potentielle, qui correspond à l'utilisation maximale de l'énergie lumineuse reçue, fixe ainsi, en tout lieu et pour un système donné, le niveau potentiel théorique de productivité du milieu (Boiffin et Sebillotte, 1982), auquel on peut associer, en tenant compte des facteurs qui limitent l'efficacité d'interception de la lumière (période nécessaire à l'atteinte de l'indice foliaire maximal, périodes d'inoccupation du sol...) une potentialité

2. Concernant le sol, une commission de la Société américaine de sciences du sol définissait, en 1995, la qualité d'un sol comme « sa capacité à fonctionner dans un écosystème naturel ou cultivé, à soutenir un niveau de production animale et végétale, à maintenir ou améliorer la qualité des eaux et de l'air et à supporter la santé et les habitations de l'Homme » (Karlen *et al.*, 1997).

3. Ce d'autant plus que l'on allonge la liste des critères au fur et à mesure que l'on accroît le nombre des fonctions environnementales à satisfaire, fonctions qui sont parfois contradictoires avec le rôle du sol dans la production.

culturale pour toute succession de culture. Un tout autre aspect de cette question énergétique concerne la quantité d'énergie fossile nécessaire à la mise en œuvre du système de culture. Ainsi, partant d'un écosystème ne dépendant que de l'énergie solaire interceptée, on dissipe dans l'agrosystème de l'énergie fossile soit directement (le retournement d'une épaisseur de 25 cm de terre avec une charrue représente une dépense énergétique considérable), soit plus indirectement (en considérant par exemple le coût énergétique des intrants utilisés). L'évaluation de la quantité de carbone fossile mis en jeu pour cultiver devient une composante essentielle du bilan environnemental d'un système de culture.

Celle qui intéresse les grands cycles biogéochimiques. L'agriculteur agit d'abord sur ces cycles en accroissant l'intensité des flux et en diminuant les constantes de temps des réactions qui les sous-tendent. Il modifie en effet les quantités d'eau, d'éléments minéraux stockés dans le sol, agit sur les conditions de circulation de l'eau et les facteurs qui régissent le fonctionnement des racines et des micro-organismes (porosité, température, humidité). Il fixe enfin, à travers le choix de la succession de culture et/ou l'installation éventuelle de plantes d'interculture, le calendrier de prélèvement par les plantes. Les apports de fertilisants ont permis (et permettent encore) de lever des carences et de compléter l'offre du sol lorsque celle-ci s'avère limitante par rapport au niveau de rendement espéré. L'action du travail du sol sur la structure, les aménagements (drainage) ou les amendements (chaulage) permettent, lorsque c'est économiquement possible, de lever la plupart des obstacles à l'utilisation efficace des engrais et de l'eau, rapprochant ainsi les niveaux de rendement du potentiel permis par les variétés et la photosynthèse. Mais la conduite du système de culture se traduit aussi par une exportation d'éléments minéraux par les récoltes, qu'il faut compenser, et par un risque accru de fuite d'éléments polluants vers l'atmosphère ou vers l'hydrosphère, qu'il faut prévenir. Dans le cas de l'azote, ces fuites, qui sont très faibles dans un écosystème non cultivé du fait de la permanence de l'organisation microbienne de cet élément et de l'occupation constante du sol, peuvent devenir très importantes dans un agrosystème. Lorsque l'on utilise des engrais minéraux très solubles, le dosage n'est pas facile quand on ne peut connaître à l'avance les conditions de croissance (et donc de prélèvement) des cultures, si la parcelle est nue en période de minéralisation de l'azote puis de drainage, ou si les conditions de sol et de climat favorisent l'activité des bactéries dénitrifiantes. L'évaluation de ces risques est devenue, depuis le début des années 1990, un enjeu majeur pour la recherche en agronomie : elle met en jeu l'analyse des effets des pratiques culturales, la connaissance des propriétés et des comportements des sols cultivés, celles du climat et du fonctionnement du peuplement végétal.

Celle qui affecte la composition spécifique et les interrelations entre organismes vivants composant la biocénose. L'ensemble des techniques culturales joue sur la composante biologique du milieu cultivé : la protection phytosanitaire et le désherbage agissent directement sur celle-ci, ayant pour objet de contenir la pression des bioagresseurs sur le peuplement cultivé ; mais le travail du sol, le tassement lié à la circulation des engins ou la fertilisation, en modifiant les conditions physico-chimiques du milieu, influencent aussi le fonctionnement de la biocénose. Même si l'impact des techniques culturales sur la composante biologique est très variable, la

mise en culture est pratiquement indissociable d'une perte de biodiversité, tant dans le sol que dans l'atmosphère. Dans un écosystème non cultivé, au travers d'une combinaison complexe d'interactions biologiques et du fait de la limitation des ressources trophiques, les tailles des populations qui composent la biocénose sont autorégulées et fluctuent le plus souvent autour d'une valeur d'équilibre, ne s'en écartant qu'à l'occasion d'événements exceptionnels et y revenant d'autant plus rapidement que la résilience du système est élevée. La théorie de l'évolution considère de plus que tout écosystème tend vers le degré maximal de diversité biologique permis par son environnement (Gliessman, 1990). C'est en partant du constat que cette diversité biologique jouait un rôle majeur dans la résilience de nombreux écosystèmes (Altieri *et al.*, 1990), que l'on considère que la diminution de la biodiversité dans les agrosystèmes accroît leur fragilité à l'égard d'événements tels que l'explosion de populations de bioagresseurs. Inversement, ce constat amène à considérer que la mise au point de méthodes de protection intégrée doit valoriser les régulations biologiques internes à l'agrosystème.

Si les fonctions assurées par les différentes communautés vivant au sein de la parcelle cultivée sont très diverses (recyclage des nutriments et du carbone, effets sur les conditions locales de transfert d'eau et de solutés, régulation du niveau des populations indésirables...), leur valorisation dans le cadre de la mise au point de systèmes de culture reste bien en deçà des possibilités annoncées par les écologues. Il faut également reconnaître que les relations causales entre ces fonctions et les performances (économiques ou environnementales) des systèmes de culture restent, pour une large part, à établir (Boiffin et Stengel, 1999).

Le premier chapitre de cette partie sera consacré à l'étude de la maîtrise de la composante chimique du milieu cultivé. Nous centrerons le propos sur les éléments majeurs de la nutrition des plantes — l'azote, le phosphore et le potassium — en n'oubliant pas le stock organique, dont la gestion constitue la base de l'entretien de la productivité et de la qualité des sols dans bien des systèmes, et dont le stockage devient une préoccupation majeure dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre additionnel. Pour des approfondissements sur les autres éléments d'importance agronomique qui interviennent dans la composante chimique de la qualité des sols (le calcium, le pH, les oligo-éléments), nous renvoyons le lecteur à des synthèses (Thévenet et Joubert, 2001 ; Calvet, 2003a). Dans un second chapitre, nous traiterons de l'effet des systèmes de culture sur la composante biologique du milieu cultivé, en distinguant la maîtrise des bioagresseurs de l'effet sur les autres organismes vivant au sein de l'agrosystème. Renvoyant le lecteur désireux d'approfondir l'étude du désherbage ou des techniques de protection phytosanitaire à une bibliographie spécialisée, l'accent sera mis sur les perspectives de mise au point de modes de conduite intégrée des cultures. Le troisième chapitre portera sur l'effet des systèmes de culture sur la composante physique du milieu. Nous inclurons dans cette partie le raisonnement du travail du sol, même si l'impact de la préparation du sol sur le milieu cultivé dépasse largement le cadre de la seule composante physique de l'agrosystème. Nous n'évoquerons pas dans cette partie les aménagements, au premier rang desquels le drainage, dont les modifications qu'il entraîne sur les sols hydromorphes sont, dans leur globalité, similaires (quoique moins intenses) à celles induites par le travail du sol.

Chapitre 7

La composante chimique

Sylvain PELLERIN, Sylvie RECOUS, Jean ROGER-ESTRADE

La gestion des matières organiques du sol et celle de l'azote sont au cœur des défis auxquels l'agriculture doit désormais faire face. En matière de sécurité alimentaire, et donc de productivité tout d'abord, la fourniture d'éléments minéraux par la décomposition de la matière organique est, pour une immense partie de l'agriculture mondiale qui n'a pas accès aux engrais de synthèse (ou qui se l'interdit, comme c'est le cas en agriculture biologique), un élément déterminant de la production végétale. Ainsi, lorsque le développement agricole dépend de la possibilité de fixer l'agriculture tout en en accroissant les niveaux de production, il est fondamental de maîtriser la gestion à long terme du stock de matière organique des sols. Ce d'autant plus qu'à ce rôle sur la fourniture d'éléments minéraux s'ajoute celui de la fraction stable de la matière organique du sol sur les qualités de ce dernier : cette fraction participe en effet au pouvoir tampon du sol, à sa capacité d'échange cationique, au maintien de sa stabilité structurale, caractéristiques majeures de la capacité du milieu à soutenir une production durable. Enfin, la ressource en carbone détermine l'intensité de l'activité biologique du sol. En dehors de situations extrêmes (excès de salinité, sols hydromorphes, pH très bas), la disponibilité en azote est, avec celle de l'eau, déterminante de la quantité produite. Mais cet élément intervient également dans un nombre considérable de processus essentiels à la maîtrise de la qualité de la production, en raison de l'importance du rôle qu'il joue dans la physiologie de la plante (cf. chapitre 4) : teneur en nitrate des feuilles de laitue, teneur en protéines des grains de blé ou d'orge, concentration en acides α -aminés du jus de betterave, sont quelques exemples parmi d'autres qui font de la gestion raisonnée de l'alimentation azotée des cultures un élément clé de la maîtrise de la qualité des produits, celle-ci étant, de plus en plus souvent, une condition nécessaire au maintien de la compétitivité des filières de production végétales.

Enfin, la prise en compte des préoccupations environnementales a renforcé l'intérêt porté aux cycles du carbone et de l'azote. Le souci de préserver la qualité des eaux et de l'atmosphère impose de limiter la lixiviation des nitrates vers les nappes et les eaux superficielles, et les émissions de composés azotés gazeux vers l'atmosphère. De même, le rôle très important joué par les matières organiques (fractions vivante

et morte) sur le devenir et le caractère polluant des pesticides, le souci de valoriser en agriculture des quantités croissantes de déchets organiques produits par les villes ou la lutte contre l'effet de serre additionnel, ont accru de manière significative la nécessité de mieux appréhender l'effet des systèmes de culture sur les cycles du carbone et de l'azote.

Dans les écosystèmes ou dans les agrosystèmes peu anthropisés, le phosphore et le potassium prélevés par les végétaux retournent au sol *via* les litières ou, après consommation par les animaux, *via* les fèces et les carcasses. Les pertes sont donc faibles, et ces systèmes peuvent être considérés comme quasi conservatifs vis-à-vis de ces éléments. En revanche, les quantités de phosphore et de potassium exportées par les grains d'un blé produisant 8 t de grain à l'hectare à 15 % de teneur en eau sont de l'ordre de 20 kg de phosphore et 25 kg de potassium⁴. En Europe, avant l'introduction de la fertilisation phosphatée à la fin du XIX^e siècle, la disponibilité en phosphore était devenue un facteur limitant majeur de la production agricole du fait de bilans déficitaires séculaires. En revanche, d'importants apports d'engrais minéraux — parfois même au-delà de ce qui était nécessaire — ont enrichi les sols au cours de la seconde moitié du XX^e siècle (Pellerin *et al.*, 2000). En France, les apports de phosphore et de potassium sous forme d'engrais minéraux sont en réduction depuis les années 1970⁵ du fait des progrès de la fertilisation raisonnée et de l'augmentation du coût des engrais. Dans beaucoup d'autres régions du monde, la disponibilité des sols en phosphore ou en potassium reste un facteur limitant majeur de la production agricole. Le raisonnement de la fertilisation phosphopotassique préoccupe les agronomes depuis plusieurs décennies, et leurs travaux dans ce domaine ont abouti à la mise en place d'outils automatisés de diagnostic et de prescription utilisés à grande échelle. Des progrès restent cependant possibles (et nécessaires).

Concernant la pollution des eaux, le phosphore est le seul élément concerné : il n'existe pas d'effet négatif connu du potassium sur la qualité de l'environnement. L'enjeu actuel concernant le phosphore est donc de concilier la maîtrise de la nutrition phosphatée des cultures et la limitation des transferts de ce minéral vers les écosystèmes aquatiques. Le phosphore, élément peu soluble, est en effet le facteur limitant de la croissance des végétaux aquatiques. Son apport dans les eaux continentales provoque une augmentation de la production primaire, aboutissant au phénomène d'eutrophisation. En France, on estime qu'environ 30 % du phosphore rejeté dans le réseau hydrographique est d'origine urbaine (métabolisme humain et activités ménagères), 20 % d'origine industrielle et 50 % d'origine agricole. Les progrès faits en matière d'épuration et de déphosphatation des eaux usées ont pour effet de réduire les rejets d'origine urbaine et industrielle, ce qui fait que la responsabilité relative de l'agriculture tend à s'accroître. Le transfert de phosphore se fait essentiellement en période de crue, par ruissellement, et vers les eaux de surface. Les risques de transfert sont donc potentiellement élevés là où existe un risque érosif important (et donc un entraînement particulier) et/ou dans les zones

4. Soit 48 kg de P_2O_5 et 30 kg de K_2O .

5. Voir les statistiques sur les quantités d'engrais minéraux épandues en France sur le site de l'Union des industries de la fertilisation (<http://www.unifa.fr/>).

avec de forts épandages d'effluents d'élevage. La limitation des transferts de phosphore des sols vers les eaux suppose un ajustement strict des apports de cet élément aux besoins des cultures et, s'il y a lieu, la mise en œuvre de stratégies complémentaires de limitation du ruissellement, comme la limitation des périodes de sol nu, l'utilisation de zones tampons ou encore le choix du mode de travail du sol. L'accumulation de cet élément en surface lorsque l'on supprime durablement le labour peut entraîner des risques accrus de pertes par ruissellement. De fait, la réduction de l'érosion hydrique liée à la présence de résidus à la surface diminue globalement la quantité d'eau entraînée, mais celle-ci est plus chargée en phosphore. En Amérique du Nord, Gaynor et Findlay (1995) ont montré qu'en vingt ans, l'accroissement des surfaces en non-labour (passées de 5 à 50 % de la surface arable dans la région des grands lacs) s'était traduit par un net accroissement de la quantité de phosphore entraîné par ruissellement.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les cycles du carbone et de l'azote en insistant sur leur couplage, élément clef de la compréhension de l'évolution du stock d'azote minéral dans les sols cultivés, avant d'examiner l'effet du peuplement végétal sur ces cycles, puis les facteurs déterminant la disponibilité de l'azote dans le système sol-plante. Nous aborderons ensuite la maîtrise de l'azote pendant l'interculture, qui repose sur la gestion des résidus de récolte et sur la mise en place de cultures intermédiaires. Nous terminerons par un retour sur ces deux autres éléments majeurs de la nutrition minérale des plantes que sont le phosphore et le potassium.

► Le carbone et l'azote

Couplage des cycles de l'azote et du carbone

La disponibilité de l'ammonium et du nitrate dans les sols résulte de la compétition entre plusieurs processus physiques, microbiens et physico-chimiques opposés qui alimentent ou consomment ces différentes formes d'azote (*figure 3.1*) :

- l'organisation correspond à l'assimilation d'azote ammoniacal ou nitrique par les micro-organismes hétérotrophes du sol, dont la croissance et l'activité dépendent de la disponibilité du carbone organique assimilable ;
- la minéralisation des matières organiques du sol (matière organique humifiée, résidus, déchets, corps microbiens) conduit à la formation d'azote ammoniacal ;
- la transformation de l'azote ammoniacal en nitrite puis du nitrite en nitrate est le résultat de l'activité des populations nitrifiantes (Jarvis *et al.*, 1996).

La minéralisation et l'organisation, encore appelées « processus bruts », interviennent simultanément, ce qui conduit au transfert continu de formes minérales de l'azote à des formes organiques et *vice versa*, formant le « cycle interne de l'azote » dans les sols (en anglais, MIT pour *mineralization-immobilization turnover*). Les techniques de dilution/enrichissement isotopique avec le ^{15}N sont les seuls outils qui permettent de quantifier distinctement les deux processus opposés (organisation et minéralisation) et de quantifier précisément la nitrification (Murphy *et al.*, 2003).

La minéralisation brute, qui correspond à l'oxydation des matières organiques du sol (MOS) par des enzymes endo- et exocellulaires d'une gamme large de micro-organismes non spécifiques, est principalement déterminée par les propriétés des sols — pH, teneurs en argile, en calcaire et en matière organique. L'organisation brute relève principalement de la disponibilité en carbone facilement décomposable. La nitrification dépend du pH et du niveau de population microbienne initiale du sol. Par conséquent, les trois processus ne répondent pas aux mêmes facteurs ; ils ont par ailleurs des sensibilités différentes aux facteurs température et teneur en eau.

Les principales sources de carbone dans les sols cultivés sont :

- les racines, la rhizodéposition et l'exsudation ;
- les résidus de cultures, lorsqu'ils sont restitués naturellement au sol à la sénescence des plantes ou après la récolte par les opérations culturales ;
- les apports éventuels au sol sous forme de déchets, effluents d'élevage, agro-industriels ou urbains.

Au cours de la décomposition des matières organiques des sols, l'assimilation simultanée de carbone et d'azote par la microflore hétérotrophe conduit à ce que le cycle

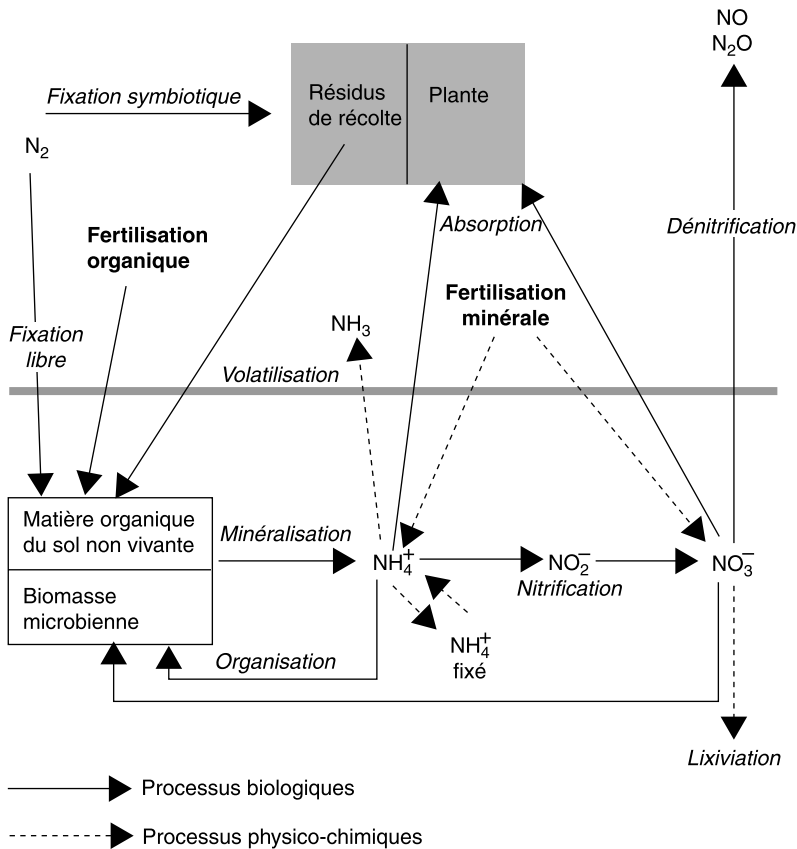


Figure 3.1. Cycle de l'azote dans l'agrosystème.

de minéralisation-organisation de l'azote soit étroitement lié au cycle du carbone. L'assimilation du carbone dépend de la vitesse de décomposition du matériel végétal, elle-même dépendante de la qualité intrinsèque du matériel organique et de nombreux facteurs environnementaux, du rendement d'assimilation de la microflore, dépendant des paramètres physiologiques en relation avec la nature des populations microbiennes. Le flux de carbone et le rapport C/N des décomposeurs déterminent alors les besoins en azote des micro-organismes, qui vont trouver cet azote soit dans le matériau organique lui-même, soit dans le sol. Ces besoins en azote sont élevés puisque, pour une paille de blé par exemple, il a été montré que 32 mg d'azote étaient organisés pour décomposer 1 g de carbone, ce qui représenterait environ 15 kg d'azote pour décomposer une tonne de paille (Kumar et Goh, 2000 ; Nicolardot et Recous, 2001).

La décomposition de la matière organique peut conduire à la production nette d'azote minéral dans les sols : c'est le cas de la décomposition de l'humus du sol ou de matières organiques exogènes déjà humifiées, au cours de laquelle l'activité des micro-organismes conduit à la minéralisation de carbone sous forme de CO_2 et à une minéralisation d'azote dont le surplus s'accumule dans le sol (Smith *et al.*, 1997). Mais la décomposition de matières organiques exogènes peut aussi conduire à une organisation intense d'azote se traduisant par une diminution nette de la quantité d'azote minéral dans le sol, tout au moins temporairement. La dynamique et l'amplitude des processus varient fortement en fonction de la nature des résidus végétaux et de la quantité et de la nature de l'azote présent dans les différents compartiments organiques (figure 3.2). En fait, il y a presque un consensus sur le seuil de disponibilité en azote au-dessus duquel l'incorporation de résidus végétaux provoque immédiatement une minéralisation nette d'azote, et en deçà duquel on observe une organisation nette. Étant donnés les besoins en azote de la microflore hétérotrophe, ce seuil de richesse des résidus en azote correspond à un rapport C/N des résidus d'environ 25.

En contrepartie, la disponibilité de l'azote minéral dans le sol peut aussi déterminer la décomposition et la dynamique du carbone à court et à long terme. C'est ce qu'on nomme le « rétro-contrôle de la décomposition du carbone par l'azote » (Mary *et al.*, 1996 ; Mc Gechan et Wu, 2001). À court terme, une limitation de la disponibilité en azote minéral restreint la croissance des micro-organismes hétérotrophes, ce qui a pour effet de ralentir la vitesse de décomposition. Ce résultat n'est pas surprenant puisque le rapport C/N des micro-organismes est plus faible que celui de la plupart des résidus végétaux, et donc les sources « internes » (le résidu) et « externes » (le sol) peuvent être rapidement épuisées. À plus long terme, une forte disponibilité de l'azote minéral peut exercer un effet négatif sur la décomposition parce que la disponibilité élevée en azote inhibe la synthèse d'enzymes lignolitiques (Fog, 1988).

En raison des forts besoins de la microflore hétérotrophe en azote, la décomposition des résidus et des litières végétales est souvent limitée par la disponibilité en azote, même dans des situations où les apports d'azote minéral sont fréquents. Cette situation est typique des prairies, où l'on observe de fortes accumulations de débris, notamment de racines. D'autre part, la quantité d'azote nécessaire pour décomposer le carbone décroît quand l'azote minéral est limitant. Ceci est attribué

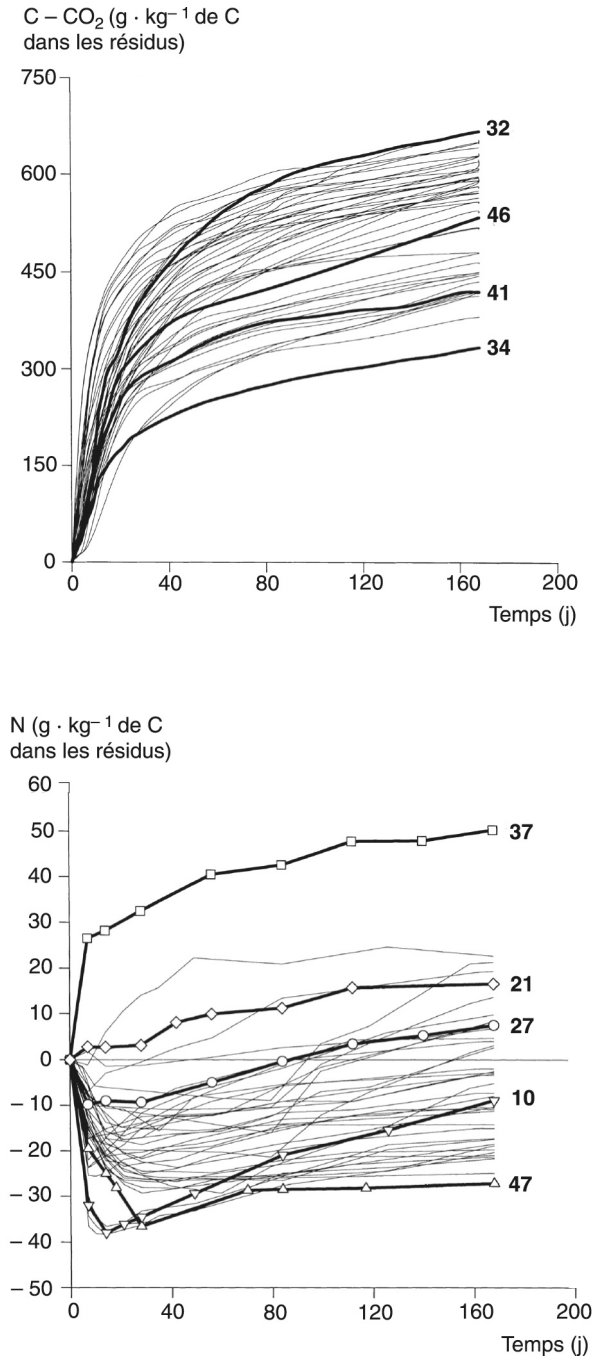


Figure 3.2. Cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote dans le sol, associées à la décomposition de résidus végétaux de compositions biochimiques diverses. Source : Trinsoutrot *et al.*, 2000.

à la modification des populations microbiennes et à un renouvellement plus intense des micro-organismes. La quantité d'azote (du sol et/ou de l'engrais minéral) organisé est donc dépendante de la disponibilité à la fois du carbone et de l'azote. C'est ainsi que les cycles du carbone et de l'azote sont étroitement couplés dans les sols, et cette interaction est l'une des clefs majeures de compréhension de l'évolution à court et à long termes de l'azote dans les sols et de sa dépendance vis-à-vis de la dynamique des matières organiques endogènes et exogènes des sols (Sisworo *et al.*, 1990).

Effets de la culture sur les cycles du carbone et de l'azote

La culture exerce tout d'abord son influence sur le cycle de minéralisation-organisation d'azote dans le sol *via* ses racines, soit par une action directe (exsudation de composés carbonés et azotés, substrats pour la microflore du sol) soit par une action indirecte (absorption de l'azote minéral par les racines et donc modification de propriétés physiques et chimiques du sol). Même si ces processus ont été souvent mis en évidence qualitativement et quantifiés séparément (Tlustos *et al.*, 1998), la difficulté à utiliser les méthodes ^{15}N à l'échelle millimétrique et sans perturber les plantes dans leurs fonctions d'exsudation et d'absorption *in vivo* a rendu leur quantification et leur extrapolation dans le temps quasi impossibles jusqu'à présent.

Le deuxième type d'interaction entre le cycle interne de l'azote dans les sols et le peuplement végétal cultivé concerne les résidus végétaux qui retournent au sol soit par sénescence (exemple de la chute de feuilles), soit après la récolte, à maturité, soit, enfin, par destruction mécanique ou chimique (exemple des prairies et des cultures intermédiaires). La vitesse de décomposition des résidus végétaux et l'effet de ce processus sur le cycle de l'azote sont fortement liés à la quantité, à la qualité chimique et à la teneur en azote de ces résidus (Heal *et al.*, 1997). La quantité de carbone soluble détermine la vitesse initiale de minéralisation, tandis que la teneur en lignine contrôle le devenir à moyen et long termes. Les litières sont aussi une source d'azote organique qui est sujette à minéralisation, à assimilation microbienne, et à humification. Comme évoqué précédemment, l'addition de résidus végétaux au sol provoque le plus souvent une phase d'organisation nette suivie plus ou moins rapidement d'une phase de minéralisation nette (Yadvinder-Singh *et al.*, 2005).

Les gradients — très prononcés — de croissance des populations microbiennes, des activités enzymatiques et des concentrations en éléments nutritifs, observés dans la rhizosphère (au contact des racines) et dans la détritusphère (au contact des résidus) suggèrent que la plupart des interactions entre la microflore et la microfaune du sol et entre les flux de carbone et d'azote concernent une très faible fraction du volume total de sol. L'équilibre entre les deux processus du cycle interne de l'azote dépend de la nature de la culture, qui modifie la minéralisation nette de l'azote du sol : une plus forte affinité d'une espèce pour le nitrate peut lui conférer la capacité de réduire le temps de résidence de l'azote dans le sol et faire tourner en sa faveur la compétition avec la microflore hétérotrophe ; une exsudation de certains composés spécifiques peut stimuler la minéralisation ou au contraire l'organisation. Dans ce contexte, le concept de « fourniture en azote du sol » à une culture

ne peut plus être considéré seulement comme une fonction des caractéristiques du sol et des conditions climatiques, mais doit aussi être regardé comme dépendant des interactions entre le sol et la plante.

Les facteurs déterminant la disponibilité de l'azote dans le système sol-plante

Un processus essentiel de l'entrée d'azote dans le cycle est la fixation biologique de l'azote atmosphérique (Munns, 1977). La fixation biologique représente un des principaux apports d'azote au sol. Un hectare de trèfle fixe en une année de 100 à 160 kg d'azote, un hectare de luzerne de 130 à 600 kg. Cette fixation est principalement due à des bactéries des genres *Rhizobium* et *Bradyrhizobium*, qui vivent en symbiose avec des plantes, essentiellement des légumineuses ; elle peut être aussi due, mais de façon moins importante, à des algues bleues, à des associations algales et à des micro-organismes libres (genres *Azotobacter* et *Clostridium*). Les *Rhizobium* sont présents dans des nodosités des racines et absorbent l'azote atmosphérique pour synthétiser divers produits plus ou moins complexes qui seront utilisés par la plante hôte. En retour, les bactéries utilisent les produits carbonés fabriqués par la légumineuse. Les *Azotobacter* sont des bactéries aérobies dont la contribution à l'enrichissement en azote du sol est plus faible. En effet, ces bactéries ont tendance, pour économiser leur énergie, à utiliser l'azote nitrique ou ammoniacal déjà présent dans le sol. Les *Clostridium* sont des bactéries anaérobies, dont l'activité fixatrice est relativement faible, sauf dans certains sol riches en carbone et pauvre en azote minéral.

Une autre entrée possible est constituée par les dépôts atmosphériques (Calvet, 2003b). L'atmosphère contient des composés organiques et inorganiques de l'azote qui peuvent être déposés sur le sol par voie sèche (dépôts de particules) et par voie humide (précipitations). La quantité d'azote inorganique apportée est assez faible (1 à 22 kg/ha/an) et ne constitue une source utile que pour certains écosystèmes (forêts, déserts, prairies naturelles).

Pour les cultures non légumineuses, les principales sources d'azote sont l'azote minéral fourni par la minéralisation des matières organiques (endogènes et exogènes) et l'azote minéral apporté par les engrais azotés. Les contributions respectives de l'azote du sol et de l'engrais à la nutrition azotée d'une culture dépendent de la synchronisation entre l'offre du sol en azote des différentes sources et les besoins en azote du peuplement végétal. En fonction de leur cycle de développement, les cultures sont en effet plus ou moins aptes à intercepter l'azote minéral présent dans le sol. Par exemple, les cultures de printemps couvrent dans nos régions tempérées une plus grande période de minéralisation que celles d'hiver, récoltées plus précocément. De nombreux travaux de recherche ont été menés pendant les vingt dernières années pour comprendre le devenir de l'azote des engrais dans le système sol-plante, non seulement pour améliorer le recouvrement de l'azote de l'engrais par les cultures, mais aussi pour identifier et quantifier l'azote non utilisé, qui est potentiellement polluant. Il a été montré, pour une large gamme de systèmes de culture et de conditions climatiques, que le devenir de l'azote est déterminé très rapidement après son apport — dans les quelques jours à quelques

semaines —, ce qui se traduit par une diminution rapide de la quantité d'azote minéral présent dans le sol sous culture. Cette réalité traduit une compétition intense après les applications, entre la demande en azote du peuplement et les autres processus que sont l'organisation microbienne et les pertes gazeuses qui affectent l'azote ammoniacal et nitrique (Strong, 1995 ; Recous *et al.*, 1997 ; Bolan *et al.*, 2004).

Comme l'azote minéral du sol, l'azote minéral de l'engrais est impliqué dans le cycle interne d'organisation-minéralisation, et une fraction de l'azote apporté est immobilisée sous forme organique. Ceci est inhérent au fonctionnement du sol.

Dans certains contextes agropédoclimatiques, comme celui correspondant au nord de l'Europe (sols limoneux profonds, climat océanique), la lixiviation du nitrate liée à la fertilisation azotée de printemps est généralement faible voire inexistante lorsque la fertilisation est raisonnée. Ceci tient à l'absence de drainage, mais aussi à l'intensité des processus « consommateurs » d'azote (absorption, organisation) qui interviennent plus rapidement que les transferts et limitent fortement la migration en profondeur de l'azote apporté. Les dynamiques des différentes sources d'azote sont alors relativement distinctes dans l'espace et dans le temps : l'azote minéral du sol, présent initialement sous forme de reliquat azoté ou produit au cours du cycle de développement, peut être distribué sur l'épaisseur de sol explorée par les racines⁶ ; l'azote minéral apporté par les engrais migre très peu dans le sol et est rapidement consommé. Ces considérations sont évidemment remises en cause dans des situations où l'excédent pluviométrique est fort, les sols superficiels et filtrants, ou la fertilisation azotée excessive.

En ce qui concerne les émissions gazeuses, il a été montré que les pertes d'azote se chiffrent en kg ou en dizaines de kg d'azote pour l'ammoniac (produit de la volatilisation de l'ammonium) alors qu'elles sont de l'ordre de quelques centaines de grammes à 1 kg pour le protoxyde d'azote, produit de la dénitrification à partir du nitrate (Bolan *et al.*, 2004). La volatilisation de l'azote est un phénomène physico-chimique qui varie en fonction de nombreux paramètres à la fois agronomiques (travail du sol, présence d'un couvert), pédologiques (pH du sol, activité microbienne) et climatiques (vent, température). Ces nombreux paramètres agissent sur les transferts dans le sol et dans l'atmosphère, ainsi que sur les équilibres physico-chimiques conduisant à la production d'ammoniac à partir de l'azote ammoniacal. La prise en compte, dans les outils de gestion, des pertes ammoniacales après un apport de fertilisant de synthèse a été jusqu'aujourd'hui limitée par les difficultés à les prévoir. D'une manière plus générale, l'agriculture serait responsable de 97 % des émissions d'ammoniac d'origine anthropique. La fertilisation azotée représente 40 % de ces émissions, les fertilisants organiques 35 % et les fertilisants minéraux 5 %. La dénitrification est un phénomène biologique résultant de l'activité de bactéries dénitrifiantes, pour l'essentiel anaérobies. Elle est possible lorsque les ressources en carbone et en nitrate sont suffisantes pour soutenir l'activité bactérienne et se produit lorsque les conditions deviennent anaérobies (sol tassé ou gorgé d'eau, voir Germon *et al.*, 1999 ; Grosso *et al.*, 2000).

6. Ceci dépend pour chaque situation de l'historique récent de minéralisation et de transfert d'eau.

La compétition entre les différents processus participant au cycle de l'azote et du carbone, mise en évidence notamment par le traçage ^{15}N de l'azote de l'engrais, a permis de comprendre les différences observées dans le recouvrement de l'azote en fonction de différentes pratiques culturales : forme d'azote et date d'apport notamment. Le recouvrement de l'azote par une culture est généralement plus élevé avec le nitrate qu'avec l'ammonium ou l'urée ; ceci résulte d'une aptitude plus grande de l'ammonium à être assimilé par la microflore du sol, laissant en contrepartie moins d'azote disponible pour la culture. L'azote ammoniacal est aussi potentiellement sujet à la volatilisation, ce qui est confirmé par des bilans du recouvrement de l'azote de l'engrais avec ^{15}N , en moyenne plus faibles pour l'azote apporté sous forme ammoniacale que pour celui apporté sous forme nitrique (Recous *et al.*, 1997). En ce qui concerne les dates d'apport, il a été constaté, lors de la fertilisation azotée de printemps des cultures annuelles des régions tempérées, que le recouvrement de l'azote est généralement faible pour les apports précoces, et qu'il s'accroît avec des dates d'application plus tardives. Il a été montré que la demande instantanée du peuplement en azote était le facteur déterminant de la valorisation précoce de l'azote de l'engrais, notamment dans les conditions où l'eau n'est pas un facteur limitant de l'absorption par la culture (Limaux *et al.*, 1999). Cette demande en azote est elle-même liée à la vitesse de croissance du peuplement. Ceci signifie que l'azote, apporté à un stade auquel le peuplement n'a pas (ou a peu) de besoins en azote, est utilisé dans les autres voies (organisation, émissions gazeuses, lessivage) et qu'il n'est plus disponible pour la culture, ce qui est démontré par une relation inverse trouvée entre taux de recouvrement par la plante et pertes. Dans d'autres contextes pédoclimatiques, la compétition pour l'azote entre la plante et les autres processus peut avoir d'autres déterminants : Powlson *et al.* (1992) ont trouvé une relation entre le cumul des pluies après apport d'azote et les pertes d'engrais montrant que, en conditions très humides, le transport du nitrate et/ou la dénitrification ont réduit substantiellement la disponibilité de l'azote pour la culture. Par contraste, en milieu sec méditerranéen, les faibles recouvrements de l'azote observés avec des apports tardifs sont imputables au début de la sécheresse qui limite l'absorption. L'humidité du sol au moment des apports a alors une influence prépondérante sur la valorisation des apports d'azote.

Étant donnés ces processus, il est apparu évident que la fertilisation azotée devait être conçue de façon à répondre en temps réel à la part de la demande en azote des peuplements végétaux qui ne peut être assurée par le sol.

Maîtrise du cycle de l'azote en cours de culture : le bilan prévisionnel

Outre la forme de l'engrais, le raisonnement de la fertilisation azotée comporte le calcul de la dose globale d'azote à apporter, ainsi que le choix d'un fractionnement de l'apport de manière à éviter les pertes par lixiviation (Meynard *et al.*, 1997). Le calcul de la dose globale repose sur l'établissement d'un bilan prévisionnel entre les besoins du peuplement et les fournitures du sol (Rémy et Hébert, 1977). En raison de l'impossibilité pratique de prévoir les pertes par lixiviation durant la période de lessivage hivernal et de minéralisation automnale, le bilan est établi pour une période comprise entre la sortie de l'hiver et la récolte de la culture.

Sur cette période, le bilan s'écrit, de manière simplifiée (Schvartz *et al.*, 2005) :

$$R_f - R_e = (M_o + X) - (N_f - N_e + L).$$

R_f et R_e désignent respectivement les quantités d'azote nitrique présentes à l'ouverture et à la fermeture du bilan ; M_o est la quantité d'azote minéralisé à partir des différentes sources de matière organique dans le sol entre l'ouverture et la fermeture du bilan ; X est la dose d'azote fournie par les engrais minéraux et les engrais organiques (effet direct) ; N_f et N_e sont les quantités d'azote minéral absorbé par le peuplement respectivement à la fermeture et à l'ouverture du bilan ; enfin, L est la quantité d'azote lixivié au-delà de la profondeur de prospection des racines entre l'ouverture et la fermeture du bilan. Une telle écriture du bilan prévisionnel repose sur trois hypothèses :

- il n'y a pas d'interaction entre les termes du bilan ;
- l'azote est facteur limitant du rendement ;
- on considère que l'azote provenant du sol et celui provenant de l'engrais sont également disponibles pour la plante.

Les besoins du peuplement sont évalués à partir d'un objectif de rendement qui dépend des potentialités du milieu et qui est donc déterminé par le type de sol et par la probabilité d'occurrence d'événements climatiques défavorables. Les fournitures du sol comprennent l'évaluation du stock de départ (le reliquat à la sortie de l'hiver, estimé sur la profondeur d'enracinement de la culture), augmenté des fournitures par minéralisation nette de la matière organique du sol au cours du cycle de la culture à fertiliser.

Depuis ses débuts à la fin des années 1970, cette méthode et ses dérivés ont considérablement évolué (voir pp. 48-49). À l'heure actuelle, la tendance est à une gestion « en temps réel » de l'alimentation azotée, reposant sur une adéquation précise entre les dynamiques des besoins et de l'offre, grâce à l'utilisation d'indicateurs de l'état azoté qui permettent de diagnostiquer une entrée en carence de la culture et, partant, de mieux positionner les dates d'apport par rapport aux besoins (Smith *et al.*, 1990b). Un tel indicateur est par exemple la teneur en nitrates du jus de base de tige. On apporte en début de culture une quantité d'azote inférieure à celle calculée par la méthode du bilan prévisionnel. On ne complète cet apport que si la valeur de l'indicateur indique que le peuplement est en carence.

Maîtrise du cycle de l'azote en période d'interculture

L'utilisation des engrais azotés de synthèse a longtemps été suspectée d'être la cause directe de la pollution nitrique. En fait, il faut d'abord distinguer les situations de fertilisation raisonnée des situations de surfertilisation. Dans ces dernières, par définition, les risques de lixiviation sont importants. Cependant, même en conditions de fertilisation raisonnée, on peut observer d'importants reliquats après récolte. Cela se produit lorsque les objectifs de production (ou les besoins du peuplement) ont été surestimés, ou lorsque les fournitures du sol ont été sous-estimées dans le raisonnement. En effet, lors du calcul de la dose d'azote à apporter, l'agriculteur se base sur un objectif de rendement et fait une hypothèse sur le climat à venir. Or, le climat réel détermine non seulement le niveau de rendement effectivement atteint (et donc les quantités d'azote réellement prélevées), mais également

l'intensité des processus décrits ci-dessus (et donc le niveau réel de la fourniture d'azote par le sol). La nature du précédent cultural intervient également sur la quantité et la répartition en profondeur des quantités d'azote minéral à la récolte.

À ce reliquat après récolte s'ajoute l'azote nitrique produit pendant l'interculture, en été et en automne. Ces périodes sont caractérisées (en climat tempéré) par une forte minéralisation nette car le sol, encore chaud, se réhumecte. Les quantités d'azote minéral à l'entrée de l'hiver sont donc, dans les systèmes de grande culture où la plupart des sols sont nus à cette période, fréquemment supérieures à celles mesurées à la récolte de la culture précédente. L'observation de la dynamique de l'azote minéral au cours des successions culturales montre que les fuites d'azote se situent essentiellement durant la période hivernale, et qu'elles peuvent résulter effectivement soit d'un bilan azoté excédentaire des cultures, soit d'une forte minéralisation automnale pendant la période d'interculture pour les cultures annuelles. Ces fuites seront d'autant plus importantes que le stock de nitrates présent dans le sol au début de l'hiver sera important, la pluviométrie hivernale forte et la capacité de rétention en eau du sol faible (Addiscott *et al.*, 1991).

Effets du travail du sol sur les cycles du carbone et de l'azote

En intervenant sur les dates, sur les modes d'incorporation des résidus dans le sol ainsi que sur les techniques de travail du sol, l'agriculteur peut agir sur les conditions qui influencent la dynamique de décomposition de la matière organique. Le travail (ou le non-travail) du sol détermine les modalités d'incorporation et de décomposition des matières organiques fraîches retournant au sol (par sénescence ou à la récolte) qui modifient les propriétés physiques du sol, et en particulier sa structure. On ne peut donc dissocier aisément les effets du travail du sol sur la décomposition des matières organiques fraîches, des effets qui affectent la structure du sol et les propriétés qui en découlent (Balesdent, 1997). Le travail du sol détermine la localisation initiale des résidus de récolte et influence par conséquent la quantité de résidus laissés à la surface du sol (et la proportion restant dressée ou couchée), la quantité de matière organique fraîche incorporée, la profondeur d'incorporation et la distribution spatiale des résidus. L'incorporation par le labour favorise la décomposition rapide des résidus végétaux et l'organisation de l'azote minéral en raison d'un contact optimal sol-résidu et d'une disponibilité accrue de l'azote minéral. L'action mécanique du labour favorise aussi la minéralisation de l'azote de la matière organique native. L'effet net dépend du potentiel d'organisation des résidus : on observe une organisation nette dans le cas de la paille de céréale, et une minéralisation nette pour les résidus plus riches en azote (relativement à la quantité de carbone). Le travail du sol a également un effet indirect : par exemple, la présence d'un mulch à la surface du sol en non-labour influence la dynamique de l'eau (soit en modifiant l'infiltration après les pluies, soit en modifiant l'évaporation, selon la saison). Il en découle des effets significatifs sur l'évolution du profil hydrique et de la température, ce qui agit fortement en retour sur l'activité microbienne.

Les stocks de matière organique des sols augmentent globalement en non-labour. Des essais (Guérif, 1991) ont permis d'étudier comparativement les effets du passage d'un système de travail du sol (labour) à un système simplifié (travail

superficiel ou semis direct) sur la répartition des matières organiques et leur évolution. Lors du passage au non-labour, le rapport C/N de la couche de surface s'accroît en raison de l'augmentation de la proportion de matière organique particulaire. L'utilisation du traçage isotopique montre que ce changement de rapport C/N résulte principalement de l'accumulation accrue de carbone récent en non-travail du sol. Les résultats d'essais en France ont montré également que le taux d'humification s'accroissait lorsque l'on passait du labour au non-labour. Le travail du sol favorise en effet la désagrégation des fragments terreux (soit directement par fragmentation, soit en exposant ces fragments à l'action destructrice des pluies) ; la matière organique, qui n'est alors plus protégée au sein de ces fragments, se minéralise. La plupart des études portant sur la mise en culture d'écosystèmes naturels (forêts, prairies naturelles) ont ainsi montré une décroissance très rapide de la teneur en carbone organique des sols dans les premières années suivant la déforestation ou la mise en culture de prairies. Les études cinétiques basées sur l'utilisation de l'abondance naturelle de ^{13}C ont permis de mieux définir les fractions de la matière organique des sols les plus sensibles à ces processus. Le passage aux techniques simplifiées de travail du sol s'accompagne donc d'une diminution de la vitesse de minéralisation et d'un accroissement du taux d'humification. Ces deux modifications de la dynamique du carbone confirment l'intérêt de la suppression du labour pour la séquestration du carbone dans les sols cultivés.

En revanche, les résultats concernant l'effet sur la lixiviation des nitrates sont contradictoires. Certains auteurs constatent un flux plus important en non-labour (dû à la présence d'une porosité de grande taille favorisant les transferts rapides) (Eck et Jones, 1992). D'autres n'observent pas de différence (Sharpley *et al.*, 1991). De même, les effets sur la dénitrification ne font pas l'unanimité.

Gestion des résidus de culture et cultures intermédiaires pièges à nitrates

Si le travail du sol a un effet important, la gestion des résidus de culture a des répercussions non seulement à court terme sur la culture suivante (opérations de semis et implantation de la culture, nutrition minérale liée à la dynamique d'organisation-minéralisation) et sur l'environnement (diminution du lessivage du nitrate), mais également à plus long terme sur le statut organique du sol, en favorisant ou non le stockage du carbone dans le sol et sa distribution dans le profil. Le plus souvent, les résidus de culture restitués au sol ont un rapport C/N élevé, en général supérieur à 30 (à l'exception notable des jeunes cultures utilisées comme cultures intermédiaires pièges à nitrate — Cipan). Leur incorporation va donc favoriser, à court terme, une organisation nette de l'azote, ce qui va réduire le risque de lessivage du nitrate.

Au champ, l'organisation induite par la décomposition de la paille est en réalité bien plus faible que le potentiel d'organisation déterminé en laboratoire que nous avons évoqué plus haut : elle se situe généralement entre 20 et 40 kg d'azote par hectare. Par ailleurs, ce phénomène ne se produit que dans la couche de sol où sont incorporés les résidus. La décomposition de ces derniers ne réduit le lessivage des nitrates que de 10 à 25 kg d'azote par hectare et par an (Nicholson *et al.*, 1997). En revanche, des additions répétées de résidus de récolte ont des effets opposés sur le

long terme : elles accroissent la teneur des sols en matière organique tout en augmentant le potentiel de minéralisation de l'azote. Cependant, le bilan des deux processus semble être en faveur de la minéralisation. Addiscott *et al.* (1991) suggèrent que l'intensification de l'agriculture durant les cinquante dernières années en Europe de l'Ouest a ainsi accru le potentiel de minéralisation des sols. Cela pourrait être dû à l'augmentation des restitutions organiques (liée à l'accroissement des rendements) et à la modification de leur qualité (diminution du rapport C/N des pailles en raison d'une fertilisation azotée plus élevée), même si la concentration en matière organique des terres arables a été stable en moyenne, ayant même fortement diminué dans certaines parties du continent européen lorsque la spécialisation des systèmes de production a conduit à l'abandon de l'élevage.

L'utilisation de cultures intermédiaires pièges à nitrates (Cipan) en périodes d'interculture automnale et hivernale est une pratique agricole essentielle dans les systèmes de grande culture des régions tempérées pour contrôler les pertes de nitrate vers les eaux souterraines (Meisinger *et al.*, 1991). En plus de leurs effets bénéfiques sur le lessivage des nitrates, les cultures intermédiaires ont un effet positif sur la prévention de l'érosion des sols et sur l'activité biologique. La gestion des cultures intermédiaires porte sur le choix des espèces, les dates de semis et de destruction, le mode de destruction, en relation avec les cultures précédentes et suivantes dans la rotation. Pour optimiser ces techniques, on cherche à maximiser l'absorption de l'azote, particulièrement dans les horizons profonds, tout en minimisant la consommation d'eau, particulièrement sous climat sec. On cherche enfin à favoriser la minéralisation de l'azote piégé par la Cipan, et son utilisation par la culture suivante. Il n'y a pas de recette standard : tout dépend des conditions de sol et de climat et de la nature du système de culture pratiqué. Des expérimentations de longue durée ont montré que l'introduction systématique de cultures intermédiaires augmente légèrement le taux d'azote organique total, la minéralisation et le rendement de la culture principale, tout en réduisant significativement la concentration en nitrates de l'eau drainée. La réduction du lessivage est de 63 % par rapport aux mêmes rotations sans cultures intermédiaires alors que, sur la même période, une réduction de 35 % de la fertilisation minérale permet une diminution de 16 % seulement des nitrates lessivés (Mary *et al.*, 2002).

►► Le phosphore et le potassium

Le phosphore et le potassium sont deux éléments indispensables à la croissance des plantes. Ils sont prélevés par les racines dans la solution du sol à l'état ionique dissous (H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-} pour le phosphore, K^+ pour le potassium). Une partie du phosphore prélevé reste sous forme ionique, l'autre partie entrant dans la constitution de molécules organiques importantes pour la physiologie de la plante (phospholipides, sucres phosphorylés, ATP, ADP, ADN, ARN). Dans la plante, le potassium qui reste à l'état ionique est le principal cation compensateur des anions et joue, entre autres, un rôle important dans la régulation de la pression osmotique. Une déficience en l'un ou l'autre de ces éléments entraîne une réduction de la biomasse produite, *via* notamment une réduction de la croissance foliaire et de l'interception du rayonnement (Plénet *et al.*, 2000a et b).

Spéciation, compartimentation dans les sols et modalités de prélèvement par les racines

Une des particularités des éléments phosphore et potassium par rapport à l'azote est que leur biodisponibilité est fortement dépendante de leurs interactions avec la phase solide du sol. La connaissance des mécanismes qui régissent leur biodisponibilité et la modélisation de leur prélèvement par les racines ont fait des progrès considérables depuis quarante ans (Rengel, 1993 ; Barber, 1995 ; Jungk et Claassen, 1997 ; Jaillard *et al.*, 2000 ; Hinsinger, 2001 ; Morel, 2002 ; Pellerin et Mollier, 2002). Dans un sol, la quantité totale de phosphore varie entre moins de 100 et plus de 2 500 mg P · kg⁻¹ de sol sec, ce qui représente entre 350 et 8 750 kg P · ha⁻¹ dans l'horizon 0-0,25 m. La plus grande partie de ce phosphore est liée à la phase solide du sol, sous forme minérale (ions orthophosphate adsorbés à la surface des constituants du sol et phosphore entrant dans la constitution de minéraux phosphatés) et sous forme organique (inositols hexaphosphates notamment). D'un point de vue fonctionnel, le compartiment central du système est la solution du sol, car c'est par son intermédiaire qu'ont lieu les échanges entre le sol et le couvert végétal. La quantité de phosphore contenu dans la solution du sol est cependant faible du fait de la très faible solubilité de cet élément : entre 0,05 et 2 mg · l⁻¹, ce qui représente entre 0,04 et 1,6 kg P · ha⁻¹, pour une teneur volumique en eau de 0,33 m³ · m⁻³, soit quelques pour-cent seulement de la quantité prélevée par une culture au cours d'un cycle. La concentration en ions phosphates de la solution dépend de nombreuses réactions comme la dissolution-précipitation de minéraux phosphatés du sol, la complexation de surface avec notamment les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium, l'échange d'ions avec les anions retenus par la capacité d'échange anionique du sol, la minéralisation de molécules organiques contenant du phosphore, ou à l'inverse l'organisation microbienne du phosphore.

Dans les régions tropicales, l'altération ferrallitique des minéraux primaires de la roche mère conduit à la formation d'oxydes et d'hydroxydes avec élimination des cations alcalino-terreux (K, Ca, Mg) (Robert, 1996). Ces constituants à charge variable, plus ou moins bien cristallisés, ont généralement une surface spécifique élevée en milieu acide (pH < 4,5), et un grand nombre de sites de réaction. Aussi, bien que la teneur totale en phosphore de ces sols soit souvent importante, la distribution des ions phosphates entre les phases liquide et solide du sol est beaucoup plus à l'avantage de la phase solide dans les sols tropicaux par rapport à des sols de régions tempérées (Rabeharisoa, 2004). La conséquence sur le fonctionnement de l'interface solide-solution est double : une concentration des ions phosphates dans la solution souvent très faible, de l'ordre de 0,001 mg P · l⁻¹ (Masson *et al.*, 2001), et une capacité particulièrement élevée de la phase solide du sol à fixer des ions phosphates et à tamponner la concentration de la solution. La concentration dans la solution du sol sera donc souvent un facteur limitant pour la production agricole, puisque se situant au-dessous du seuil minimal d'absorption par la racine. En milieu tempéré, compte tenu de la faible solubilité de cet élément, le prélèvement par la plante suppose un réapprovisionnement de la solution du sol en phosphore par la phase solide. Un mécanisme essentiel de cette mobilisation du phosphore est la baisse de la concentration en phosphore de la solution de sol due à l'absorption par les racines (*figure 3.3*). Cette diminution de concentration

provoque une désorption d'ions phosphates initialement adsorbés sur la phase solide, et un transport vers la racine par diffusion dans la solution du sol⁷. Du fait du très faible coefficient de diffusion de l'ion orthophosphate, le transport par diffusion du sol vers la racine n'intervient que sur une distance très courte (de l'ordre du millimètre). Le rayon d'approvisionnement d'une racine est donc très faible. À ce mécanisme essentiel de mobilisation du phosphore par réduction de la concentration en solution dans l'environnement de la racine s'en ajoutent d'autres, également déterminés par l'activité de la racine et des micro-organismes associés (dissolution acide de minéraux phosphatés liée à l'excrétion de protons par la racine, minéralisation du phosphore organique, etc.) (Hinsinger, 2001). Les mycorhizes, champignons symbiotes des racines, contribuent également à la mobilisation et au transfert sol-plante de phosphore en accroissant la surface d'échange avec le sol, voire en mettant en œuvre des mécanismes spécifiques de mobilisation de cet élément. L'analyse qui précède est également valable pour le potassium, avec cependant des spécificités qui sont essentiellement l'absence de compartiment organique et une mobilité supérieure à celle du phosphore (de l'ordre du centimètre).

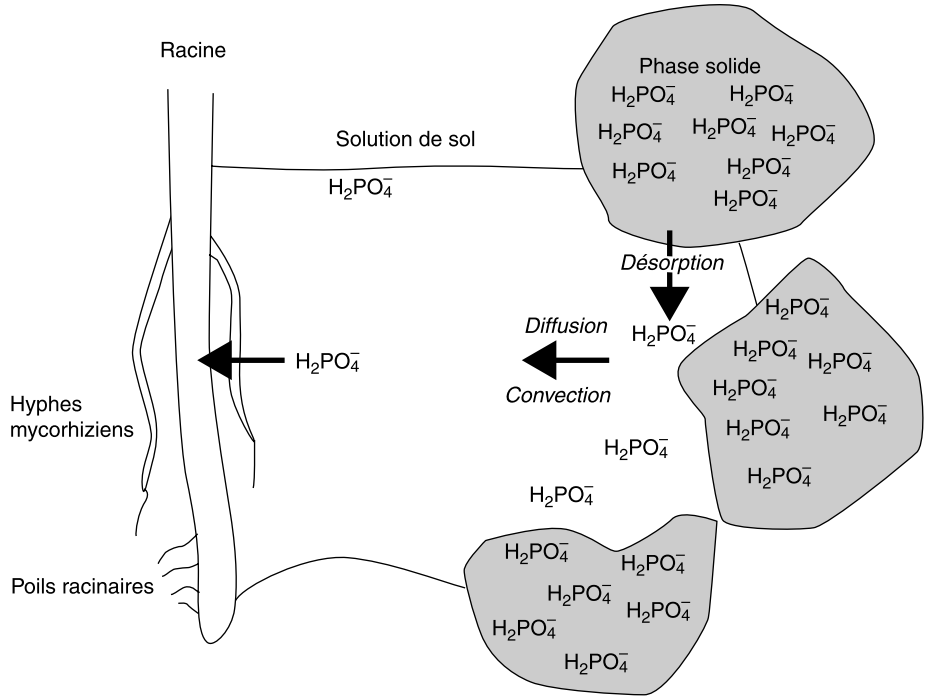


Figure 3.3. Représentation simplifiée des mécanismes de mobilisation et de transport du phosphore inorganique dans la rhizosphère.

7. Le transport des ions vers la racine se fait par diffusion sous l'effet du gradient de concentration créé et par convection (ou *mass flow*), du fait du déplacement d'eau lié à l'absorption hydrique. Pour les éléments comme le phosphore dont la concentration en solution est faible, le transport par convection est négligeable.

Il résulte de ce qui précède que la biodisponibilité d'un sol en phosphore ou en potassium dépend étroitement de la concentration en phosphore ou en potassium dans la solution de sol et de la capacité de la phase solide à réapprovisionner cette solution lors du prélèvement par la racine. Les modèles de prélèvement du phosphore ou du potassium par une culture construits depuis quelques dizaines d'années caractérisent l'offre du sol à partir de la concentration initiale en solution et du pouvoir tampon⁸ (Barber, 1995 ; Pellerin et Mollier, 2002 ; Schneider, 2003 ; Schneider *et al.*, 2003). La faible diffusivité de ces éléments dans la solution fait que la capacité de prélèvement d'une plante dépend très étroitement de la taille de son système racinaire et de tout ce qui contribue à augmenter la surface d'échange entre le sol et la plante (poils racinaires, hyphes mycorhiziens, etc.). Enfin, le transport des ions orthophosphate et potassium dans la solution de sol par diffusion étant le mécanisme essentiel de réapprovisionnement de la surface racinaire, il existe une interaction forte entre l'approvisionnement des racines en phosphore et en potassium et l'état hydrique du sol.

Cycle du phosphore et du potassium dans l'agrosystème en relation avec le système de culture

La *figure 3.4* représente le cycle du phosphore dans une parcelle cultivée. Le cycle du potassium est sensiblement identique, se distinguant de celui du phosphore par l'absence de compartiment organique et par des fuites par migration en profondeur qui peuvent être supérieures. Dans l'agrosystème, les principales entrées/sorties de phosphore et de potassium sont les apports d'engrais minéraux ou organiques et les exportations par les récoltes⁹.

À l'échelle d'une année, la biodisponibilité en phosphore ou en potassium évolue surtout en fonction des apports pratiqués et du prélèvement par la culture. Le potassium apporté sous forme d'engrais minéraux (le plus souvent sous forme KCl) et celui contenu dans les produits organiques (résidus de culture, effluents d'élevage, etc.) est quasi immédiatement disponible pour la culture puisqu'il est sous forme ionique. Pour cette raison, on considère qu'il y a équivalence entre toutes les formes d'apport. La disponibilité à court terme du phosphore apporté dépend davantage de la forme d'apport, car la mise à disposition des racines d'ions orthophosphate suppose dans certains cas une dissolution ou une minéralisation préalable. La solubilité du phosphore des engrais phosphatés dits « solubles »¹⁰ (de type superphosphates par exemple) est nettement supérieure à celle du phosphore d'engrais peu solubles tels que les phosphates naturels ou les scories de déphosphoration dont l'utilisation doit être limitée à certaines situations favorisant la solubilisation de cet élément (sols acides notamment). La disponibilité à court terme du phosphore des produits

8. Le pouvoir tampon caractérise l'aptitude d'un sol à s'opposer à une variation de la concentration en solution de l'élément considéré.

9. Les fuites de potassium par lessivage peuvent être importantes, comme dans le cas des sols sableux fortement fertilisés.

10. La quasi-totalité des engrais minéraux phosphatés sont issus de roches sédimentaires phosphatées utilisées directement après broyage (phosphates naturels) ou après dissolution acide et fabrication d'engrais de synthèse (superphosphates notamment). À cela s'ajoutent (mais il n'y en a presque plus) les scories de déphosphoration qui sont un sous-produit de l'industrie sidérurgique.

organiques peut être équivalente ou dans certains cas inférieure à celle du phosphore d'un engrais minéral soluble de référence (Fardeau, 2000 ; Morel *et al.*, 2003). Quelle que soit la forme d'apport, le devenir du phosphore dépend considérablement des propriétés du sol récepteur. Le coefficient réel d'utilisation par la culture du phosphore apporté est toujours faible, car celui-ci réagit fortement avec la phase solide du sol. Des modalités d'apport particulières peuvent favoriser le prélèvement du phosphore récemment apporté (comme la date d'apport proche de la période de prélèvement intense ou la localisation près des racines). D'autres techniques culturales interfèrent également avec la mobilité et les conditions de prélèvement du phosphore et du potassium au champ. Le travail du sol influence les possibilités de prélèvement *via* ses effets sur l'état structural et l'enracinement, dont on a souligné l'importance vis-à-vis du prélèvement d'éléments peu mobiles comme le phosphore et le potassium. C'est aussi le cas de l'irrigation, à travers ses conséquences sur l'état hydrique du sol et la diffusion des ions dans l'environnement des racines.

À l'échelle pluriannuelle, l'évolution de la biodisponibilité du phosphore ou du potassium dépend principalement du bilan entrées/sorties du système et de la forme dominante des apports. Le système de culture joue donc sur cette évolution *via* le bilan entrées/sorties qui en résulte (cultures pratiquées et rendements obtenus, devenir des résidus de culture, importance et nature des apports d'engrais minéraux et organiques). Pour les éléments phosphore et potassium, le bilan de fertilité est un

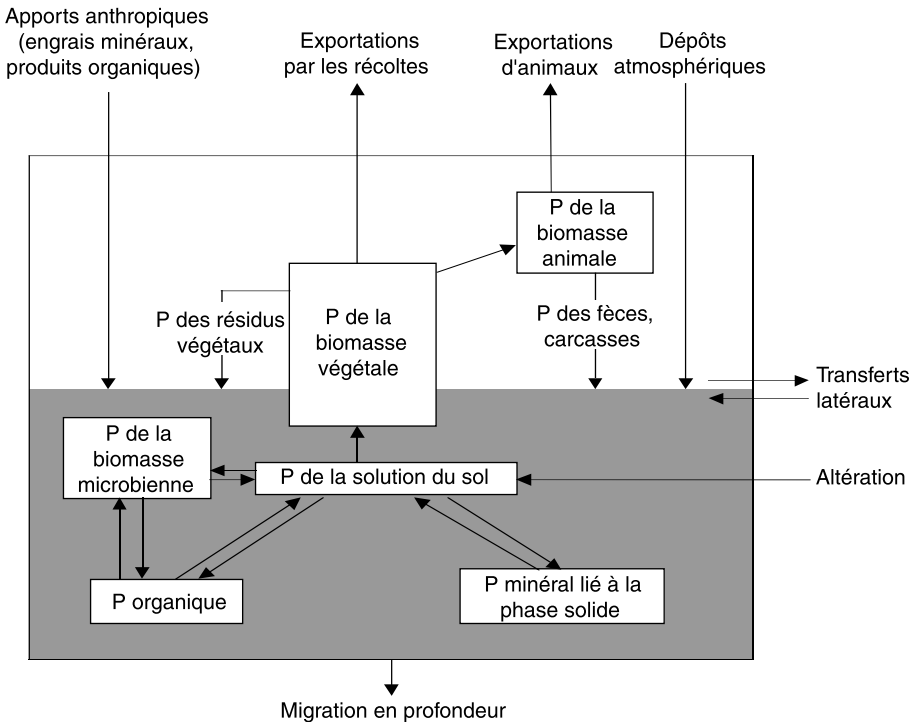


Figure 3.4. Cycle du phosphore dans un écosystème cultivé à l'échelle parcellaire. Mis à part le cas particulier des dépôts atmosphériques, les entrées dans le cycle par altération de minéraux et les pertes par migration en profondeur sont faibles (Pellerin *et al.*, 2005).

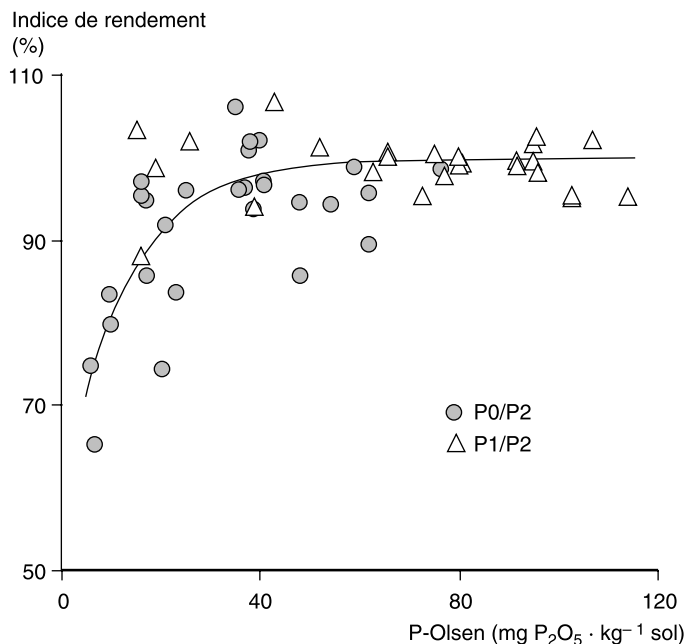
outil de diagnostic approprié et facile à mettre en œuvre compte tenu de l'absence de flux gazeux. Dans beaucoup de régions agricoles d'Europe occidentale, les bilans ont été excédentaires pendant plusieurs décennies du fait de pratiques de fertilisation sécuritaires par excès (Pellerin *et al.*, 2000). En France, les apports moyens à l'hectare de phosphore et de potassium sous forme d'engrais minéraux sont en baisse depuis le milieu des années 1970. Il subsiste cependant des zones d'excédent structurel dû à l'élevage intensif où les teneurs des sols continuent à s'accroître, ce qui constitue un risque pour l'environnement (Coppenet *et al.*, 1993). Dans beaucoup d'autres régions du monde, les bilans sont déficitaires et l'entretien à long terme de la fertilité n'est donc pas assuré. Au-delà des aspects de bilan, le système de culture peut influencer sur la biodisponibilité du phosphore et du potassium *via* ses effets sur leur répartition spatiale. L'absence continue de travail du sol, par exemple, aboutit à une concentration progressive de ces éléments en surface, ce qui modifie les conditions de leur prélèvement. Enfin, dans un contexte de réduction d'intrants, des possibilités supplémentaires de gestion du phosphore et du potassium *via* le système de culture devront être explorées. Certaines expériences montrent par exemple que l'utilisation en interculture d'espèces ayant la capacité de mobiliser des formes peu solubles de phosphore ou de potassium du fait de leur fonctionnement rhizosphérique permet d'augmenter la biodisponibilité de ces éléments pour la culture suivante (Horst *et al.*, 2001).

Diagnostic sur la biodisponibilité et raisonnement de la fertilisation en phosphore et en potassium

Jusqu'à un passé récent, le raisonnement de la fertilisation phosphatée et potassique en milieu tempéré a été basé sur l'analyse de terre (étape de diagnostic), et sur les notions de fumure d'entretien et de correction (étape de prescription). L'analyse de terre est une extraction par voie chimique suivie du dosage d'une fraction du phosphore et du potassium lié à la phase solide du sol. En France, les réactifs les plus couramment utilisés pour extraire le phosphore sont l'acide citrique à 2 % (méthode Dyer), l'oxalate d'ammonium de concentration $0,2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ (méthode Joret-Hébert) et le bicarbonate de sodium de concentration $0,5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ à un pH de 8,5 (méthode Olsen). Pour le potassium, le réactif d'extraction est l'acétate d'ammonium neutre et normal. Les méthodes utilisées diffèrent selon les pays, en particulier pour le phosphore. Les teneurs jugées souhaitables dans les sols ont été déterminées sur la base de courbes de réponse mettant en relation l'indice de rendement avec la teneur à l'analyse de terre (*figure 3.5*). Compte tenu des différences de réponse entre espèces, on a généralement établi les teneurs souhaitables dans les sols en prenant comme références les espèces les plus sensibles à une déficience en phosphore ou en potassium. Si la teneur analytique d'un échantillon était supérieure ou égale à la teneur jugée souhaitable, une fumure d'entretien était conseillée¹¹. Si la teneur était

11. La fumure d'entretien était calculée en multipliant le rendement prévu par la teneur en phosphore ou en potassium des organes récoltés, en ajoutant les exportations liées aux résidus de cultures si ceux-ci étaient exportés. La valeur obtenue était généralement multipliée par un coefficient dit « de fixation », supérieur ou égal à 1, pour tenir compte du fait qu'une stricte compensation des exportations ne suffit pas toujours à maintenir constante la teneur analytique du sol.

inférieure à cette teneur, on ajoutait à la fumure d'entretien une fumure dite « de correction », calculée de telle sorte que la teneur du sol atteigne la teneur jugée souhaitable¹². Cette fumure de correction était généralement répartie sur plusieurs années. L'objectif était donc d'amener puis de maintenir le sol au niveau de fertilité phosphatée ou potassique jugé nécessaire pour obtenir le rendement maximal permis par le milieu pour toutes les cultures pratiquées. La justification de ce mode de raisonnement était que si la teneur à l'analyse d'un sol était insuffisante, le rendement maximal pouvait ne pas être atteint, même en présence d'apports récents et importants d'engrais¹³ (Cooke, 1968 ; Trocmé et Boniface, 1972). Il en résultait



P0 : traitement non fertilisé en P

P1 : traitement contenant une dose annuelle égale à une fois les exportations en P

P2 : traitement contenant une dose annuelle égale à deux fois les exportations en P

Figure 3.5. Exemple de relation entre l'indice de rendement d'une culture de blé et la teneur en phosphore Olsen du sol. L'indice de rendement est le rapport entre le rendement du traitement considéré (P0 ou P1) et le rendement d'un témoin supposé non limitant en phosphore (P2). Résultats issus de 22 essais de fertilisation de longue durée conduits en France de 1975 à 1990 (Morel *et al.*, 1992 ; Pellerin *et al.*, 2000).

12. La fumure de correction était calculée en fonction de la différence entre la teneur mesurée et la teneur à atteindre, de la masse de terre à l'hectare et, comme pour la fumure d'entretien, d'un coefficient de fixation supérieur ou égal à 1.

13. Cette observation, basée sur quelques essais, avait amené les agronomes à introduire l'expression imagée de « vieille graisse » pour expliquer qu'en un sol dont la teneur analytique était faible, des apports récents d'engrais, même importants, ne permettaient pas d'atteindre le rendement maximal.

la nécessité d'amener le sol à la teneur analytique jugée souhaitable, puis de l'y maintenir. Ce mode de raisonnement était à la base des outils automatisés d'interprétation d'analyses de terre et de préconisation de fumure mis en place dans les laboratoires jusque dans les années 1980 (Rémy et Marin-Laflèche, 1974a et b).

Les progrès des connaissances — et l'évolution du contexte de l'agriculture — ont amené les agronomes à faire évoluer ce mode de raisonnement (Comifer, 1993 ; Pellerin *et al.*, 2000 ; Llorens, 2001 ; Denoroy *et al.*, 2004). Par rapport au système précédent, les outils actuels de raisonnement de la fertilisation phosphopotassique se caractérisent par un abandon de l'objectif de « correction » des sols¹⁴, des compléments à l'analyse de terre pour porter un diagnostic sur la biodisponibilité et une place accrue donnée à la culture immédiatement à venir dans le raisonnement. Des essais au champ plus nombreux et mieux analysés ont en effet montré que l'existence d'un effet « vieille graisse » (supériorité d'une fertilité acquise par rapport à des apports d'engrais récents) était l'exception plutôt que la règle. L'intérêt des fumures de correction et le mode de calcul des fumures qui s'y rattachait ont donc été remis en question. L'objectif de la fertilisation devient davantage de fertiliser la culture immédiatement à venir, plutôt que d'amener puis de maintenir le sol à un niveau de fertilité donné. Les progrès des connaissances sur les mécanismes de mobilisation du phosphore et du potassium dans l'environnement des racines ont permis de révéler les limites de l'analyse de terre par extraction chimique pour évaluer la biodisponibilité de ces éléments¹⁵. L'insuffisance de l'analyse de terre et la très grande « distance » qui existe entre cet indicateur et le rendement final des cultures rendent généralement très lâches les relations obtenues entre ces deux variables, et il est difficile d'en déduire des seuils (Julien, 1989 ; Morel *et al.*, 1992 ; Hochmuth *et al.*, 1993). Dans le contexte de l'agriculture de ces dernières décennies (faible coût des engrais par rapport au prix des produits agricoles, faibles préoccupations de la société vis-à-vis des problèmes d'environnement), cette difficulté avait été contournée en choisissant des seuils hauts « sécuritaires par excès », minimisant le risque de perte de rendement. Cette position est apparue de moins en moins acceptable, pour des raisons à la fois économiques et environnementales. Les outils actuels de raisonnement de la fertilisation phosphopotassique s'appuient toujours sur l'analyse de terre et sur la détermination de seuils sur la base de courbes de réponse « indice de rendement $\times$ teneur à l'analyse de terre », mais plusieurs correctifs ont été introduits pour en corriger les principales limites. Les espèces cultivées ont été classées en fonction de leur exigence¹⁶ vis-à-vis du phosphore et du potassium. Des seuils différents sont appliqués selon les classes d'exigence. Le diagnostic sur l'offre du sol, basé sur l'analyse de terre, est modulé en fonction d'autres critères (pouvoir fixateur du sol vis-à-vis

14. Cela ne veut pas dire que des apports supérieurs aux exportations ne sont jamais préconisés. En revanche, lorsque la biodisponibilité en l'élément considéré est faible, la dose à apporter n'est plus calculée en fonction d'une teneur analytique à atteindre dans les sols, mais en fonction des besoins de la culture à venir.

15. L'analyse de terre par extraction chimique s'appuie sur une vision bicompartimentale de l'offre du sol qui oppose un compartiment qualifié à tort d'« assimilable » à un compartiment dit « non assimilable ».

16. L'exigence d'une espèce est une notion empirique issue des essais de fertilisation au champ. L'indice de rendement d'une espèce dite « exigeante » décroche pour une teneur sol plus élevée et plus fortement que l'indice de rendement d'une espèce non exigeante.

de l'élément considéré, passé récent de fertilisation, gestion récente des résidus de culture). Quand la teneur du sol est supérieure au seuil au-dessus duquel une absence de fertilisation n'entraîne pas de perte de rendement, une « impasse » (c'est-à-dire une absence de fertilisation) peut être proposée si les autres critères pris en compte sont favorables. Quand la teneur du sol est inférieure à ce seuil, une fertilisation est conseillée. Le calcul de la dose à apporter combine un objectif de satisfaction des besoins de la culture immédiatement à venir et de maintien de la fertilité à moyen terme. Le logiciel Regifert (Denoroy *et al.*, 2004), par exemple, calcule deux fumures, l'une dite « de complément de l'offre du sol » (fc) destinée à couvrir les besoins de la culture immédiatement à venir, l'autre dite « de compensation des pertes par exportation » (fe) destinée à compenser les exportations et donc à maintenir la fertilité à moyen terme. Pour le phosphore, le calcul de fc comprend le prélèvement maximal de cet élément par la culture à venir, l'offre du sol et le coefficient réel d'utilisation de l'engrais. Le calcul de fe (en $\text{kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$) fait intervenir les exportations de la culture à venir (E_p , en $\text{kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$) et un coefficient de perte d'extractibilité du phosphore dans le sol au cours du temps (λ_p , sans dimension) :

$$fe = \lambda_p \times E_p$$

Lorsqu'un apport de fertilisant est jugé nécessaire, la dose conseillée est la valeur maximale de fe et de fc.

Malgré des imperfections qui demeurent, ces nouveaux outils de raisonnement de la fertilisation phosphopotassique ont permis une réduction significative des apports préconisés (Pellerin *et al.*, 2000). Les concepts développés pour raisonner la fertilisation et gérer la fertilité phosphatée des sols des régions tempérées ne sont cependant que partiellement transposables en contexte tropical. En effet, compte tenu de la réactivité de la phase solide de certains sols tropicaux vis-à-vis du phosphore, l'apport d'engrais, même en quantité importante, ne permet pas d'augmenter significativement la concentration du phosphore dans la solution de sol. Plus encore qu'en sol tempéré, l'apport d'engrais, quand il est économiquement possible, doit viser à satisfaire avant tout les besoins de la culture immédiatement à venir. À cela peuvent s'ajouter des stratégies complémentaires de réduction de la réactivité de la phase solide vis-à-vis des ions phosphates, utilisables dans certains contextes, tels que le chaulage ou l'apport de matières organiques (Rabeharisoa, 2004).

Chapitre 8

La composante biologique

Jean-Noël AUBERTOT, Nathalie COLBACH, Irène FÉLIX,
Nicolas MUNIER-JOLAIN, Jean ROGER-ESTRADE

Il est d'usage de diviser la composante biologique du milieu cultivé (hors culture elle-même bien entendu) en deux catégories. Les bioagresseurs (ennemis des cultures), qui sont les organismes susceptibles de produire des pertes de récolte directes ou indirectes : diminution de la quantité du rendement, altération de la qualité, mais aussi coûts supplémentaires de récolte ou de tri (Zadoks, 1993). Nous distinguerons dans ce premier groupe les adventices, dont le rapport avec les plantes cultivées est le plus souvent de compétition pour les ressources¹⁷ (lumière, eau, éléments minéraux), des autres agresseurs (insectes, champignons, limaces...) dont la relation avec le peuplement s'apparente plutôt à du parasitisme ou à de la prédation. L'autre catégorie comprend les organismes qui sont neutres ou favorables à la culture. Il s'agit des auxiliaires (organismes qui limitent ou détruisent des populations de bioagresseurs) et de l'ensemble des êtres vivants qui n'appartiennent à aucun des groupes précédents : bactéries symbiotiques, champignons mycorhiziens, lombriciens...

La maîtrise des ennemis des cultures demeure l'un des objectifs majeurs de l'agriculture depuis ses origines. À la fin du xx^e siècle, on a estimé que les pertes mondiales de toutes les cultures dues à leurs différents bioagresseurs atteignaient en moyenne un peu plus de 40 % des récoltes, et ce malgré les mesures prises pour protéger les cultures (Oerke *et al.*, 1994). Ces pertes de rendement correspondent à un dommage économique de l'ordre de 400 milliards d'euros (d'après Dhaliwal *et al.*, 2004), réparti de manière à peu près équivalente entre les trois grandes familles de bioagresseurs (mauvaises herbes, agents pathogènes, ravageurs).

L'étude des impacts des systèmes de culture sur les organismes dont l'effet sur les plantes cultivées était considéré comme faible ou nul et celle des impacts sur les

17. Même s'il existe des cas d'adventices parasites (*Striga*, cuscutes, orobanches...) ainsi que des phénomènes d'allélopathie (libération par les adventices de composés chimiques ayant un effet sur les plantes cultivées).

populations d'auxiliaires ont longtemps été négligées, peut-être parce que ces effets n'étaient pas, à de rares exceptions près, recherchés. Les connaissances ayant trait aux effets des systèmes de culture sur cette biomasse neutre ou alliée du cultivateur concernent essentiellement la fraction localisée dans le sol, même si, dans l'atmosphère, au contact du feuillage, circulent un certain nombre d'organismes dont l'activité peut être affectée par la conduite des cultures (abeilles pollinisatrices, coccinelles prédatrices de pucerons...). Les effets des systèmes de culture sur les insectes pollinisateurs ou autres auxiliaires ne peuvent être abordés au seul niveau de la parcelle cultivée et doivent être étudiés à l'échelle du territoire (voir la partie 4). C'est pourquoi, après avoir présenté le contrôle des bioagresseurs (adventices d'une part, maladies et ravageurs d'autre part), nous évoquerons l'effet des systèmes de culture sur les autres organismes vivant au sein de l'agrosystème en nous limitant à ceux qui constituent la biomasse vivante du sol.

L'ensemble des êtres constituant cette biomasse remplit par rapport au fonctionnement de l'agrosystème de nombreux rôles que l'on peut, en s'inspirant de Chaussod (1996), classer en quatre catégories, qui déterminent les différentes composantes de la qualité biologique de l'agrosystème.

La contribution aux aptitudes culturelles du sol

La biomasse du sol participe à la production d'éléments nutritifs pour les plantes (contribution aux cycles de l'azote et du carbone, voir p. 179), mais également à leur transfert et à l'entretien de conditions favorables au fonctionnement des racines. C'est le cas par exemple des champignons mycorhiziens mentionnés au chapitre précédent, qui forment, avec la plupart des plantes, des associations appelées — suivant le cas — « endomycorhize » ou « ectomycorhizes » (Plenchette, 1991), et qui interviennent dans le transfert des éléments peu mobiles du sol vers les racines (phosphore, oligoéléments). De même, les lombriciens contribuent à l'entretien de la porosité du sol et au mélange des matières organiques et minérales (voir la section suivante sur la structure du sol).

L'état sanitaire

La qualité biologique de l'agrosystème est non seulement liée à l'importance de la présence de bioagresseurs, mais également à celle des auxiliaires, qui peuvent contribuer à diminuer le coût de la protection des cultures à travers les régulations biologiques. Certains sols sont ainsi, de par leurs propriétés biologiques, plus résistants aux maladies que d'autres (Sarniguet et Lucas, 1992b ; Lavelle et Spain, 2001).

Les effets sur l'environnement

Les micro-organismes du sol contribuent largement au cycle de l'azote et donc aux problèmes de pollution de l'atmosphère ou des eaux souterraines (voir p. 186). Mais les micro-organismes jouent également un rôle important dans les mécanismes de détoxification des sols, base de leur pouvoir épurateur (Barriuso *et al.*, 1996).

La stabilité de l'agrosystème et sa résilience

Cet aspect très important du fonctionnement de l'agrosystème est conditionné pour partie par la composante biologique. En particulier, la biodiversité joue un rôle important dans l'aptitude à conserver un état donné ou à le retrouver après une perturbation accidentelle (Altieri *et al.*, 1990). L'une des hypothèse avancées est celle de la redondance fonctionnelle : une même fonction (par exemple la dégradation d'un pesticide) peut être assurée par un grand nombre d'espèces de micro-organismes ; que l'une vienne à être détruite accidentellement, d'autres, mieux adaptées aux nouvelles conditions environnementales, peuvent alors prendre le relais (Beare *et al.*, 1995).

► Le contrôle des bioagresseurs

Pour contrôler les bioagresseurs, l'agriculture fait appel à cinq types de méthode de protection, avec des degrés d'utilisation très variables en fonction des systèmes de culture considérés : la lutte chimique, la lutte biologique, la lutte physique, le contrôle génétique et le contrôle cultural. Les termes « lutte » et « contrôle » renvoient ici respectivement aux notions de thérapie et de prophylaxie pour la maîtrise des ennemis des cultures.

La lutte chimique

La lutte chimique a connu un essor très important durant le ^{xx}e siècle avec les progrès de la chimie de synthèse. Basée sur l'utilisation de molécules détruisant ou limitant les populations de bioagresseurs, elle pose plusieurs problèmes qui ont progressivement conduit à une remise en cause de l'utilisation inconsidérée, et surtout systématique, des pesticides de synthèse (herbicides, fongicides, insecticides, molluscicides, acaricides, rodenticides...) : risques sanitaires pour les consommateurs et les utilisateurs, pollution des eaux et de l'atmosphère liée à la diffusion de certaines molécules rémanentes et/ou de certains des produits résultant de leur dégradation, effets secondaires sur les populations d'auxiliaires, apparition de phénomènes de résistance aux matières actives utilisées au sein des populations visées. L'ensemble de ces problèmes a conduit à un accroissement des exigences réglementaires concernant l'homologation des produits phytosanitaires, entraînant une forte diminution du nombre des matières actives homologuées en protection des cultures. La mise sur le marché d'une molécule étant donc de plus en plus coûteuse, les couples culture-bioagresseur pour lesquels aucun traitement phytosanitaire n'est homologué sont de plus en plus nombreux.

La lutte biologique

La notion de « lutte biologique » est plus difficile à cerner que les précédentes. Elle recouvre en effet différents concepts selon les disciplines impliquées en phytoprotection (Nordlund, 1996). Nous suivrons Ferron (2000) et retiendrons la définition officielle donnée par l'Organisation internationale de lutte biologique et intégrée contre les animaux et les plantes nuisibles. La lutte biologique est « l'utilisation d'organismes vivants pour prévenir ou réduire les dégâts causés par des ravageurs »

(OILB-SROP, 1973). Nous adopterons cette acception en substituant toutefois le terme « bioagresseurs » au terme « ravageurs » de manière à élargir la portée de la définition à l'ensemble des ennemis des cultures. L'agent de lutte peut être un parasitoïde, un prédateur, un agent pathogène (champignon, bactérie, virus, ou protozoaire), ou un concurrent du bioagresseur visé.

Le contrôle génétique

Classiquement, le contrôle génétique consiste à utiliser des variétés sélectionnées pour contenir des caractères de résistance ou de tolérance face à différents bioagresseurs. Ces variétés peuvent être utilisées pures ou en mélange (pratique autrefois courante). Depuis une vingtaine d'années maintenant, les progrès réalisés en ingénierie génétique ont permis de développer des plantes transgéniques produisant leurs propres insecticides, résistantes à des maladies ou à des herbicides. Il faut souligner que ces innovations ne comportent pas toutes le même niveau de risque vis-à-vis de l'environnement. Ainsi, les transgènes conférant une résistance à un herbicide sont-ils réputés dangereux car susceptibles d'être transmis à des plantes adventices dont il serait alors difficile de maîtriser les populations. De plus, ces transgènes entraînent généralement des modifications importantes des systèmes de culture : le travail du sol est souvent réduit et la maîtrise des mauvaises herbes repose uniquement sur la lutte chimique. Les transgènes conférant une résistance à des pathogènes ou à des insectes constituent *a priori* des innovations favorables pour l'environnement, en réduisant la nécessité de recours à des traitements phytosanitaires pour protéger les cultures. À l'échelle mondiale, la culture d'organismes génétiquement modifiés (OGM) représentait près de 44 millions d'hectares en 2003 (Babu *et al.*, 2003). À un horizon de 5 à 10 ans, des OGM actuellement en cours de développement devraient permettre de réduire, voire de supprimer l'usage des pesticides pour certaines productions : résistances à des pathogènes fongiques (blé, colza, tournesol, arbres fruitiers), résistances à des virus (betterave à sucre, pomme de terre, tomate, melon, arbres fruitiers) (Lheureux *et al.*, 2003).

La lutte physique

Par opposition aux précédentes, la lutte physique regroupe toutes les techniques de lutte dont le mode d'action primaire ne fait intervenir aucun processus biologique ou biochimique (Panneton *et al.*, 2000a). On y inclut la lutte mécanique (binage des mauvaises herbes par exemple) les luttes électromagnétique, pneumatique et thermique (comme la solarisation, qui est la forme « primitive » de techniques comme l'utilisation de flamme, d'eau chaude, de vapeur...). Dans ce chapitre, nous évoquons quelques exemples de ce type de lutte, contre les adventices ou d'autres bioagresseurs.

Le contrôle cultural

Enfin, le contrôle cultural est l'ensemble des adaptations du système de culture mises en place en vue de limiter le développement de populations de bioagresseurs, et qui ne concernent pas les moyens de lutte évoqués ci-dessus (Bajwa et Cogan, 2004). Cela couvre une gamme très large de choix techniques allant de la succession des cultures à l'implantation de cultures intermédiaires ou à l'association d'espèces

différentes dans le même espace (utilisation de « plantes de services »). Le contrôle cultural comprend également des modifications de dates et de densités de semis, des changements de dates de récolte, l'ajustement des doses et des dates d'apport de fertilisants ou d'amendements, l'adaptation des techniques d'irrigation ou de drainage (Zadoks, 1993 ; Flint et Gouveia, 2001 ; Delos *et al.*, 2002). Des recherches sont en cours pour mettre au point des traitements stimulant et renforçant les mécanismes naturels de défense des plantes (éliciteurs). Des premières applications sont actuellement proposées tant en maraîchage (Orlikowski *et al.*, 1997) qu'en grande culture (Amborabé *et al.*, 2004).

Ces différentes méthodes de lutte ne sont bien sûr pas exclusives les unes des autres, et le principe de leur combinaison a conduit au concept de lutte intégrée à la fin des années 1950 (Ferron, 1999), quand des entomologistes californiens ont proposé de combiner lutte chimique et lutte biologique pour contrôler des arthropodes ravageurs des grandes cultures (Stern *et al.*, 1959). Depuis, ce concept a beaucoup évolué et des dizaines de définitions de la protection intégrée ont été proposées. Nous retiendrons celle de l'Organisation internationale de lutte biologique : « Système de lutte contre les organismes nuisibles qui utilise un ensemble de méthodes satisfaisant les exigences à la fois économiques, écologiques et toxicologiques, en réservant la priorité à la mise en œuvre délibérée des éléments naturels de limitation et en respectant les seuils de tolérance » (OILB/SROP, 1973 ; cité par Milaire, 1995). Jusqu'à présent, les programmes de protection intégrée ont surtout remporté des succès en culture sous abris et en production fruitière (Van Lenteren, 1993). En grande culture, l'adoption de la protection intégrée est assez limitée (Ehler et Bottrel, 2000). Deux raisons peuvent être avancées pour expliquer ce fait : économique (crainte d'un risque financier lié à l'adoption d'une méthode de protection moins systématique que la lutte chimique aveugle) ou technique (les systèmes de contrôle proposés combinant prophylaxie et méthodes de lutte à effets partiels étant trop complexes pour être aisément adoptés). La protection intégrée est la composante majeure des systèmes de production intégrée, définis par Boller *et al.* (1999) comme étant des « systèmes agricoles de production (d'aliments et/ou d'autres produits) utilisant les ressources et les mécanismes de régulation naturels pour remplacer des apports dommageables à l'environnement tout en assurant une agriculture viable à long terme ».

En complément des autres disciplines scientifiques concernées (zoologie, bioclimatologie, pathologie végétale, amélioration des plantes, etc.), la contribution de l'agronomie à la mise au point de systèmes de protection intégrée est essentielle à trois niveaux : en produisant des connaissances sur le fonctionnement de la plante malade ou en présence de bioagresseurs (cf. chapitre 5), en améliorant les connaissances relatives aux effets des systèmes de culture sur les populations de bioagresseurs, mais aussi en explicitant les interactions entre les méthodes de lutte et les autres éléments du système de culture de manière à réellement les intégrer dans le mode de production. Pour ce faire, il est capital que certains concepts d'écologie soient introduits (McRoberts *et al.*, 2003), et que la protection des cultures soit abordée de manière vraiment intégrée (Hatcher et Melander, 2003).

Maîtrise des adventices

Les mauvaises herbes sont des plantes indésirables présentes dans le champ cultivé. Il s'agit aussi bien d'espèces « sauvages » (par exemple le vulpin, la folle-avoine, la renouée) que de descendants de plantes cultivées (comme des repousses de colza ou de blé, ou la betterave adventice). Les mauvaises herbes sont considérées comme nuisibles principalement en raison de la compétition qu'elles exercent sur les cultures pour la lumière, l'eau et les éléments minéraux (cf. chapitre 5), à l'origine de pertes de rendement qui peuvent être très importantes. Mais elles peuvent aussi rendre la récolte difficile ou en diminuer la qualité (exemple de la présence de repousses riches en certains acides gras dans des variétés de colza qui ne doivent pas en contenir). Même à faible densité, les mauvaises herbes peuvent être nuisibles, en produisant des semences qui seront à l'origine d'infestations dans les cultures suivantes.

Les adventices annuelles peuvent être décrites par leur cycle de vie, composé d'une succession de stades et de variables clefs tels que le stock de semences, les graines germées, les plantules levées, montées, fleuries et la production de semences (figure 3.6). Les espèces pérennes se reproduisent essentiellement par multiplication végétative tandis que, parmi les espèces annuelles, certaines n'ont qu'un cycle de reproduction par an, d'autres plusieurs. Le cycle de ces dernières comporte deux dimensions temporelles : la répétition du cycle de base à chaque année climatique ou culturale, et la succession des stades au cours d'une année. À cette variabilité

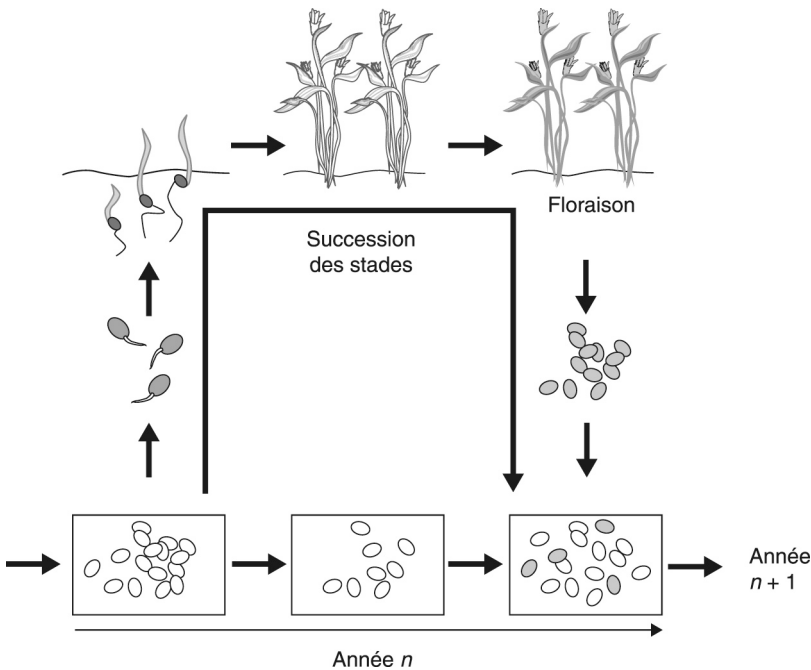


Figure 3.6. Cycle de vie type des adventices annuelles dans un champ, avec superposition de différentes échelles temporelles (année, cycle). Une partie des graines du stock de semences germe, fleurit et produit des nouvelles semences qui retournent au stock de semences.

temporelle s'ajoutent maintes autres sources de variabilité. En effet, en fonction des systèmes de culture et des conditions du milieu, la flore adventice d'un champ est composée de nombreuses espèces différentes ayant des exigences, des comportements et des conséquences agronomiques extrêmement variables (Lonchamp et Barralis, 1988). S'ajoute à cela la variabilité intraspécifique : même en conditions hydrothermiques et lumineuses optimales à la germination, seule une partie des graines du stock de semences germe, à cause de dormances. La proportion de graines dormantes varie fortement en fonction des conditions passées du milieu (Benech-Arnold *et al.* [2000] ont ainsi montré que les variations de température contribuaient à lever les dormances chez de nombreuses espèces). Les conditions dans lesquelles les graines ont été produites interviennent également : chez le vulpin, les graines seront d'autant moins dormantes que le déficit hydrique pendant le remplissage des graines aura été important (Colbach et Dürr, 2003). À cette variabilité liée au milieu s'ajoute une variabilité génétique dont l'expression la plus remarquable est la tolérance d'une part grandissante des populations aux herbicides (Powles *et al.*, 1997). Enfin, les mauvaises herbes ne sont pas réparties uniformément dans les champs (Thornton *et al.*, 1990b), mais agrégées en taches, à cause des variations des conditions environnementales et des distances de dispersion limitées des graines nouvellement produites.

La mise au point de systèmes de culture permettant un contrôle efficace des adventices tout en limitant le recours aux herbicides implique la prise en compte de nombreux facteurs et de leurs interactions :

- le choix de la succession : celles comportant une fréquence élevée de retour des cultures de printemps sélectionnent des espèces levant préférentiellement au printemps ;
- les conditions climatiques annuelles : la technique du « faux semis » qui consiste à passer des outils de travail du sol sur une parcelle nue afin de faire lever les adventices pour ensuite les éliminer n'est efficace que si le sol est suffisamment humide pour permettre la germination des semences ;
- les dates des traitements : l'efficacité des herbicides dépend fortement du stade des espèces visées ;
- le génotype des populations d'adventices : l'efficacité des herbicides diminue en cas de présence de gènes de résistance ;
- la répartition spatiale du stock de graines : des graines enfouies profondément dans le sol ne peuvent pas lever, contrairement aux graines situées en surface.

Dans les paragraphes suivants, nous établirons un bilan des effets qu'ont les techniques culturales sur le cycle de vie des adventices, en privilégiant les connaissances issues de travaux dont l'objectif était de contribuer à la mise au point de méthodes de lutte non chimiques, et qui ont pris en compte à la fois les états du milieu et celui des populations d'adventices. Pour ce qui concerne les recherches portant sur le raisonnement de l'emploi des herbicides, dont la gamme de matières actives et d'effets sur les plantes nécessite une étude à part entière, nous renvoyons le lecteur à la lecture de synthèses (Tissut et Séverin, 1984 ; Gauvrit, 1996).

Le travail du sol et l'évolution des populations d'adventices

L'effet du travail du sol (que nous distinguons ici du désherbage mécanique en cours de culture, évoqué ci-après) sur les populations d'adventices est double : il modifie les conditions de développement et de croissance des plantes et il agit sur la répartition verticale du stock de graines.

En modifiant le milieu (structure, localisation de la matière organique et des éléments minéraux, régime hydrique et thermique), la préparation du sol des parcelles cultivées avant l'implantation de la culture agit sur la levée, le développement et la croissance des mauvaises herbes. Ainsi, la structure des horizons de surface détermine, en interaction avec les conditions climatiques, le taux de levée des adventices. En effet, les mottes compactes de grande taille (> 3 cm) sont des obstacles mécaniques à la levée et, de plus, diminuent le contact terre-graine et favorisent l'évaporation, ce qui réduit la levée (Terpstra, 1986 ; Dürr *et al.*, 2001). De plus, le travail du sol mélange les graines à la terre fine (outils fragmentant le sol) ou les incorpore dans des mottes dont elles peuvent difficilement émerger (Pareja *et al.*, 1985).

À cet effet sur les conditions de développement et de croissance des mauvaises herbes il faut ajouter celui sur le mouvement des semences qui sont, simultanément, enfouies et remontées vers la surface, en proportions variables suivant le mode de travail du sol¹⁸. Les réserves des graines étant limitées, la capacité d'allongement du premier organe aérien (première feuille, hypocotyle, etc.) pendant la croissance précédant la levée est limitée (Vleeshouwers, 1997 ; Colbach et Dürr, 2003). Par conséquent, la probabilité de levée d'une graine germée diminue en même temps que sa profondeur d'enfouissement augmente (Vleeshouwers, 1997 ; Grundy et Mead, 1998). Ce phénomène est amplifié par une diminution du taux de réussite de la germination avec la profondeur (Colbach *et al.*, 2005 ; Sester *et al.*, 2005). Les raisons invoquées comprennent le manque d'oxygène et/ou l'excès de dioxyde de carbone et de métabolites (Benech-Arnold *et al.*, 2000), ainsi que la pression mécanique exercée par le sol. Il faut, enfin, citer un dernier effet du travail du sol qui est l'exposition des semences à la lumière (Benech-Arnold *et al.*, 2000). En effet, de nombreuses espèces sont sensibles à la lumière et voient leur taux de germination augmenter après un stimulus lumineux, même lorsque celui-ci est très bref. Cependant, cette stimulation n'est efficace que si les graines sont imbibées (Gallager et Cardina, 1997) ; un travail du sol réalisé en conditions sèches ne provoque donc pas cet effet.

Ces deux effets du travail du sol — positionnement des semences par rapport à la surface et stimulation de la germination — sont à prendre en compte, quel que soit l'outil du travail du sol. Il est cependant vrai que l'inversion des horizons liée au labour a lieu surtout en agriculture mécanisée. En culture manuelle ou attelée, les mouvements de semences sont le plus souvent limités aux horizons les plus superficiels, et l'effet stimulateur de la germination devient alors prépondérant.

18. Le semoir agit également sur ce mouvement.

Cette multitude d'effets liés au travail du sol entraîne une très forte variabilité du résultat final, en fonction des dates et des outils employés. Ainsi, un déchaumage¹⁹ réalisé immédiatement après la récolte enfouit les graines, augmente leur entrée en dormance²⁰ et accroît ainsi la levée de mauvaises herbes dans la culture suivante (Pekrun et Lutman, 1998). Si ce même déchaumage est réalisé plus tard, après une première pluie et assez superficiellement, il entraîne la stimulation lumineuse des semences et augmente le contact graine-terre : la germination des graines à faible dormance primaire est alors stimulée, ce qui diminue efficacement le stock de semences et les levées dans la culture suivante. De même, un labour peut avoir des effets opposés suivant l'histoire culturale : si le précédent était fortement infesté, un labour enfouit les graines trop profondément pour qu'il y ait levée dans la culture suivante (Chauvel *et al.*, 2001). En revanche, les graines de nombreuses espèces survivent bien en profondeur. Le labour profond effectué l'année suivante pourra ainsi les remonter vers des horizons favorables à la germination et à la levée (Colbach *et al.*, 2000a ; Roger-Estrade *et al.*, 2001).

Dans les systèmes sans labour, qu'il s'agisse des systèmes traditionnels, manuels ou attelés, ou des techniques culturales mécanisées qui se développent en Europe et en Amérique du Sud, la flore adventice évolue différemment : elle comprend beaucoup plus d'espèces pérennes et de graminées (Colbach et Debaeke, 1998). Pour les annuelles, la concentration des semences à proximité de la surface et la moindre efficacité des herbicides agissant sur les racines seraient responsables de cet état de fait. Les pérennes sont, quant à elles, favorisées par l'absence d'inversion du sol. Le choix de l'outil superficiel joue alors un rôle déterminant dans la multiplication de certaines espèces vivaces. En effet, les outils à disques fragmentent les rhizomes et les stolons et favorisent ainsi la multiplication des pérennes dans des systèmes de culture aussi divers que la culture pluviale africaine, le riz irrigué ou les grandes cultures européennes. Dans ces situations sans labour, le recours aux herbicides de synthèse est fréquent, ce qui pose le double problème du devenir des matières actives (et de leurs résidus) et celui de leur efficacité : la suppression du labour joue en premier lieu sur la présence à la surface du sol de quantités importantes de matières organiques, ce qui affecte les conditions d'action et de dissipation des matières actives. Elle joue également sur la nature et la quantité des mauvaises herbes présentes, et donc sur la quantité et la nature des herbicides utilisés pour les maîtriser (Holland, 2004). L'effet du type de travail du sol sur la dissipation des résidus de pesticides dans l'environnement est donc très dépendant du type de matière active, des caractéristiques du sol et des résidus présents en surface. La revue des résultats disponibles sur ce sujet réalisée par Rose et Carter (2003) les amène à conclure à un effet hautement variable du mode de travail du sol sur le devenir des herbicides dans l'environnement.

19. Opération de travail du sol superficiel réalisée après la récolte à l'aide d'un outil à dents ou à disques.

20. Mécanisme physiologique qui bloque la germination.

Mulch et plantes de couverture

Dans une culture, le développement des mauvaises herbes est gêné parce que la culture réduit la lumière disponible pour les mauvaises herbes. Cet effet peut être obtenu artificiellement à l'aide d'un mulch (Teasdale et Mohler, 2000). Le mulch naturel, fréquent dans les cultures tropicales et en agriculture biologique, est constitué des résidus de culture restant en surface, tant que celui-ci n'est pas travaillé par un outil qui incorpore ces résidus au sol ; le mulch artificiel, fréquemment utilisé en maraîchage, peut-être fait de paille ou d'une bâche plastique qui combine des effets d'ombrage et de solarisation. L'effet d'ombrage peut aussi être obtenu par des plantes de couverture semées sous la culture principale, pratique fréquente en agriculture tropicale ou biologique. Ce couvert secondaire est soit récolté (cas des cultures associées), soit laissé en place de manière permanente (enherbement de la vigne par exemple). Il répond alors à d'autres objectifs que la seule maîtrise des mauvaises herbes, notamment la lutte contre l'érosion. Les effets directs des mulchs naturels et des plantes de couverture sur les mauvaises herbes sont encore peu étudiés, mais on admet qu'ils sont plus complexes que la simple compétition pour l'espace et la lumière : ils comprennent en effet l'allélopathie, la compétition pour l'eau et les nutriments, la transmission de maladies et autres ravageurs (Bàrberi, 2002).

Désherbage mécanique ou manuel en cours de culture

Le développement de l'agriculture biologique s'est accompagné d'un développement de l'offre en outils de désherbage mécanique en cours de culture : bineuses, herbes étrilles, houes rotatives, brosses... Pour certains de ces outils, l'efficacité et la sélectivité sont fondées sur les différences de résistance à l'arrachage entre le rang de la culture et les plantules d'adventices. L'efficacité n'est généralement bonne que sur des plantules très jeunes et sur sol sec pendant et après l'intervention (Kurstjens et Kropff, 2001). La réalisation des interventions est donc soumise à des contraintes d'organisation du travail dans des périodes météorologiques favorables — qui sont le plus souvent courtes, parfois absentes. Les outils qui ne travaillent le sol qu'entre les rangs ont généralement plus de souplesse d'utilisation, mais ne dés herbent qu'une partie de la surface et nécessitent un écartement entre les rangs important, écartement qui favorise la croissance ultérieure des adventices ayant survécu au dés herbage (Puricelli *et al.*, 2002). L'efficacité du dés herbage mécanique en culture est maximale sur des parcelles faiblement infestées. Plus encore que les herbicides, celui-ci doit être couplé à des mesures agronomiques prophylactiques (par exemple travail du sol et dates de semis optimisés pour réduire les levées de mauvaises herbes) pour maintenir le stock de semences à un niveau satisfaisant sur le long terme. Les contraintes liées au dés herbage mécanique s'appliquent aussi au sarclage manuel en agriculture tropicale, avec un problème majeur supplémentaire : il s'agit d'un travail lent et pénible (Koulibaly *et al.*, 1998). Ceci est également vrai pour le dés herbage manuel (arrachage manuel des adventices) qui, contrairement à ce qu'on pourrait penser, n'est pas restreint à l'agriculture faiblement mécanisée, mais existe aussi dans les grandes cultures européennes. L'exemple le plus fréquent en est le dés herbage manuel des betteraves adventices dans les champs de betteraves sucrières où aucune solution chimique n'existe pour éliminer ces mauvaises herbes trop apparentées à la culture.

Effet de la succession des cultures

Outre l'effet sur la compétition, la date de semis de la culture joue sur la dynamique des populations d'adventices en positionnant la période de végétation de la culture par rapport à celle de la mauvaise herbe. Il en est de même du choix du type de culture (hiver ou printemps). L'effet le plus visible concerne les mauvaises herbes levant en été et en automne, telles que le vulpin (Chauvel *et al.*, 2001 ; Colbach *et al.*, 2005). Plus la culture est semée tard, plus le stock de semences a pu se « vider » par des germinations avant le semis de la culture, et moins il reste de graines pouvant lever dans la culture. Les plantules issues de ces germinations sont détruites par un travail du sol ou un herbicide associé au semis. L'effet d'un retard de la date semis n'est efficace que si :

- le travail du sol précédent a été optimisé pour favoriser les germinations en inter-culture afin de « vider » le stock de semences et éviter des levées tardives ;
- l'efficacité de la méthode retenue pour la destruction des plantules est excellente ;
- en cas de destruction mécanique des plantules, cette intervention mécanique est suffisamment superficielle pour ne pas remonter des couches profondes de nouvelles semences aptes à germer.

La compétition entre la culture et les mauvaises herbes est cruciale puisqu'elle détermine la croissance et le développement des plantules de mauvaises herbes levées, et donc leur nuisibilité directe (perte de rendement de la culture) et indirecte (ré-alimentation du stock de semences). Ceci est encore plus vrai dans les conditions tropicales où le développement des mauvaises herbes est très rapide à cause des températures et de la pluviométrie élevées, et où les problèmes d'implantation des cultures sont fréquents. Or, tous les facteurs qui rendent la culture plus dense réduisent la croissance des mauvaises herbes : densité de semis élevée, cultures d'hiver, variété haute et/ou à fort tallage. Cependant, les choses se compliquent pour l'azote, puisque celui-ci favorise aussi bien la culture que les mauvaises herbes (Bàrberi, 2002). Le résultat global est très variable, en fonction de la manière dont la culture et les espèces adventices présentes répondent à l'azote.

Divers autres processus plus mineurs interviennent aussi dans le cycle de vie d'une adventice. Par exemple, des plantes-mères poussant dans des conditions azotées favorables produisent des semences plus dormantes, celles subissant un déficit hydrique pendant le remplissage des graines ou une compétition élevée produisent des semences moins dormantes (Colbach et Dürr, 2003). Le brûlis de paille après récolte ne diminue pas seulement le stock de semences en surface : il stimule aussi la germination des graines restantes de certaines espèces (Moss, 1980), ce qui peut favoriser leur élimination ultérieure par un travail du sol.

L'analyse qui précède montre que les effets de la succession culturale sont multiples, résultant d'une combinaison des effets compétitifs des cultures en place chaque année ainsi que des effets des techniques culturales associées à chacune de ces cultures. Il ne s'agit cependant pas uniquement d'une addition d'effets individuels. En effet, une monoculture, par exemple de céréales d'hiver, combinée à un travail du sol simplifié constitue un milieu stable avec l'utilisation répétée de techniques identiques. Une telle succession sélectionne des espèces et des populations ayant un cycle de vie proche de la culture en place (période de levée synchronisée,

croissance simultanée ou plus rapide, maturité avant la récolte de la culture...) (Lonchamp et Barralis, 1988 ; Chauvel *et al.*, 2001). La simplification de la succession culturale peut être en outre associée à l'utilisation répétée d'une même famille de matières actives pour les traitements herbicides, favorisant ainsi l'adaptation de la flore adventice, par la sélection des espèces les moins sensibles à ces matières actives, et par la sélection des individus résistants au sein de chaque espèce (Powles *et al.*, 1997). Les cultures pérennes constituent un cas extrême de « stabilité » de milieu et de sélection d'espèces. À l'opposé, une succession culturale combinant des cultures et techniques variées constitue un milieu « imprévisible » pour la flore adventice, stratégie indispensable en agriculture biologique (Bàrberi, 2002).

La complexité des effets du système de culture et l'existence de nombreuses interactions avec le climat et les conditions du milieu, mais aussi avec la succession culturale et la distribution des semences dans le sol, illustrées précédemment, rend indispensable le recours à la modélisation pour mettre au point des méthodes de lutte intégrée contre les mauvaises herbes. Deux phases cruciales ont été identifiées :

- l'évolution du stock semencier et les levées en culture, sous l'effet du travail du sol en interaction avec la date de semis ;
- la croissance et la production de semences des plantes, influencées par la compétition avec le peuplement cultivé, elle-même résultant de nombreux choix techniques (espèce cultivée, densité de semis, azote disponible, etc.).

Nous ne présenterons ici que quelques applications possibles de ces modèles.

Modèles de levée

De nombreux modèles existent dans la littérature pour prédire les levées mais, à ce jour, seul le modèle Alomysys (Colbach *et al.*, 2005) quantifie l'effet des systèmes de culture (travail du sol, date de semis), en interaction avec les états du milieu (climat du sol, structure du sol, texture du sol), en distinguant les différents processus sous-jacents : survie, dormance, germination, croissance pré-levée (*figure 3.6*). Ce modèle permet d'identifier la meilleure stratégie de travail du sol pour un stock de semences initial donné dans le cas d'une mauvaise herbe graminée fréquemment observée en céréales, le vulpin. Des simulations ont montré par exemple que lorsque les semences se trouvaient essentiellement en surface, (comme dans une monoculture de blé avec travail du sol superficiel), le labour, et mieux encore un labour avec rasette éloignant une bonne partie du stock de la surface du sol, diminuait la levée de vulpin dans le blé d'hiver suivant. Cette simulation montrait également qu'une modification de la rotation avec l'introduction d'une culture de printemps est bien plus efficace encore, puisque le vulpin y lève peu et y produit peu de semences (Colbach *et al.*, 2005).

Modèles de compétition

La première génération de modèles de compétition entre cultures et adventices reposait sur des fonctions statistiques liant d'une part des niveaux d'infestation, exprimés par des densités d'adventices (éventuellement pondérées par des indices de nuisibilité spécifiques dans le cas d'infestations plurispécifiques), et d'autre part des pertes de rendement ou des niveaux de production de semences. Ces modèles

peuvent être raffinés en introduisant des covariables (dates de levées relatives, disponibilité en facteurs de croissance...) pour augmenter leur robustesse. Au début des années 1990, les modèles de culture monospécifiques dynamiques, simulant l'évolution du couvert cultivé à un pas de temps quotidien, ont été adaptés par introduction d'une ou de plusieurs espèces de mauvaises herbes (Kropff *et al.*, 1992). Ces modèles sont fondés sur une répartition des facteurs de croissance (lumière, azote) entre les différentes composantes du couvert complexe, à l'échelle du couvert. Les développements les plus récents intègrent la plasticité morphologique des plantes dominées sous l'effet de l'ombrage (étiolement des tiges, modification de la masse surfacique des feuilles...), ce qui améliore la performance prédictive de ces modèles (Cavero *et al.*, 2000). Enfin, la dernière génération de modèles simule la croissance et la production de semences des individus en fonction de leur environnement immédiat, de façon à rendre compte des effets des hétérogénéités au sein du couvert complexe : hétérogénéité de vigueur initiale des plantules, de répartition spatiale, qui affectent de façon très importante le niveau de production de semences de chaque espèce, en raison de la très grande sensibilité du comportement des individus aux conditions de compétition.

Méthodes et outils de conception et d'évaluation de systèmes de culture innovants

Cependant, afin de raisonner les systèmes de culture en entier — sur plusieurs années —, ces phases doivent être combinées dans un modèle pluriannuel décrivant l'ensemble du cycle des mauvaises herbes. La gamme des modèles développés ces dernières années (Colbach et Debaeke, 1998) varie de modèles simples, sans prise en compte des états du milieu, à des modèles à la limite du surparamétrage (intégrant des paramètres nombreux et difficiles à estimer, trop détaillés par rapport à l'objectif du modèle), décomposant chaque partie du cycle des mauvaises herbes en processus élémentaires, en interaction avec les états du milieu et certains effets des systèmes de culture. Les variables de sortie comprennent la démographie pluriannuelle, la prédiction de vagues de levée, l'évolution de la composition génotypique, combinée ou non à la démographie... Les simulations permettent non seulement d'analyser les interactions complexes entre les différents processus et les techniques culturales, mais aussi d'évaluer l'évolution de la flore pour des combinaisons de techniques culturales constituant des systèmes de culture innovants.

Les expérimentations associées au développement des modèles servent à paramétrer et à évaluer ces derniers, ainsi qu'à évaluer les systèmes de culture développés sur la base des principes théoriques dérivés des simulations (Chauvel *et al.*, 2001). En raison de la très grande complexité du système « champ cultivé-communauté de mauvaises herbes », les modèles démographiques ont encore une performance prédictive limitée. L'évaluation expérimentale, sur le long terme, des stratégies proposées sur la base des simulations est donc indispensable. Ces expérimentations permettent non seulement de vérifier la performance malherbologique des systèmes proposés (maîtrise des infestations), mais aussi leur faisabilité, leurs performances agro-environnementales...

Outils de pilotage de la décision tactique pour le désherbage des cultures

Une fois le cadre stratégique du système de culture défini, la lutte contre les infestations nécessite de prendre des décisions à l'échelle de la campagne : l'intervention de désherbage est-elle nécessaire ? Si oui, avec quel outil, quel produit herbicide, à quelle dose ? Les premiers systèmes informatisés d'aide à la décision proposent une optimisation de la décision, résultant d'un bilan économique à l'échelle annuelle entre le coût des traitements et les pertes de rendement attendues avec les différentes solutions envisageables (Lybecker *et al.*, 1991). Or, l'analyse théorique de stratégies de désherbage démontre la nécessité de prendre en compte les conséquences à long terme des décisions pour l'optimisation de systèmes durables (Munier-Jolain *et al.*, 2002). La prise de décision pilotée sur la base d'un seuil d'intervention (densité limite « acceptable » dans la parcelle considérée) permet d'optimiser les résultats financiers du système sur le court terme, mais ne permet aucune économie sur le long terme, ni en termes financiers ni en termes de quantité d'intrants herbicides. Les nouveaux outils d'aide à la décision doivent rendre compte du caractère multicritère de cette décision tactique, de plus en plus complexe. Les critères pris en compte sont, *a minima*, l'efficacité des solutions candidates en termes de répression des infestations, leurs coûts financiers et environnementaux, mais aussi les contraintes d'organisation du travail, d'approvisionnement, ainsi que le risque associé à l'infestation de la parcelle, qui dépend lui-même du système de culture prévu pour les années à venir.

Perspectives

Malgré les progrès importants réalisés ces dernières années, tant en ce qui concerne la production des connaissances qu'en matière de modélisation, il reste plusieurs aspects à traiter pour progresser encore sur la voie de la mise au point de systèmes de gestion des populations d'adventices qui soient plus acceptables sur le plan environnemental, tout en restant économiquement viables.

Il faut intégrer une caractéristique fondamentale des populations de mauvaises herbes : leur plurispécificité. La plupart des modèles ont en effet été développés pour une seule espèce alors que la flore adventice d'un champ est généralement composée de plusieurs espèces dominantes et de nombreuses espèces mineures. L'évaluation économique des décisions stratégiques et tactiques concernant les mauvaises herbes passe par l'évaluation de la nuisibilité et de l'impact des populations de mauvaises herbes sur le rendement (cf. chapitre 5). Or les modèles proposés actuels ne prennent pas suffisamment en compte cet aspect, qui doit de plus être raisonné sur plusieurs années. En effet, une faible augmentation d'infestation une année donnée peut être à l'origine d'une explosion de mauvaises herbes et donc de fortes pertes de rendement les années suivantes.

La plupart des études et des modèles se font sans caractériser le génotype des mauvaises herbes. Or, dans un contexte d'accroissement des résistances aux herbicides, la prise en compte du génotype et des conditions favorisant l'expansion de tel ou tel phénotype est indispensable. Cependant, à ce jour, les études et les modèles prenant en compte cet aspect négligent l'ensemble du système de culture, à

l'exception des traitements herbicides (Maxwell *et al.*, 1990). Seul le modèle Genesys (Colbach *et al.*, 2001) quantifie les effets de l'ensemble des systèmes de culture sur la démographie et la composition génotypique, mais ce modèle traite des repousses de colza et est orienté non pas vers la perte de rendement des cultures, mais vers leur qualité (présence de gènes ou d'acides gras indésirables).

Enfin, la répartition en taches des populations d'adventices n'est pas suffisamment considérée dans les modèles cités ci-dessus. Or, cette hétérogénéité de répartition spatiale est une caractéristique des populations de mauvaises herbes, dont la connaissance est nécessaire pour estimer correctement les pertes de rendement (Brain et Cousens, 1990) et la nécessité ou non de traiter (Thornton *et al.*, 1990b). Pourtant, peu d'essais de systèmes de culture et de modèles prennent en compte cet aspect, et aucun ne considère l'ensemble du système de culture en interaction avec les états du milieu (Gonzalez-Andujar *et al.*, 2000). Il y a pourtant déjà des études quantifiant les déplacements horizontaux de semences au cours de la récolte (Ballaré *et al.*, 1987) et du travail du sol (Grundy *et al.*, 1999), mais ceux-ci n'aboutissent pas encore à un raisonnement stratégique des systèmes de culture.

Une toute autre approche est envisagée dans le cadre de l'agriculture de précision par les applications d'herbicides limitées aux taches d'infestation, suite à une reconnaissance à l'aide de caméras au cours du traitement. Cette approche présente des avantages économiques et environnementaux non négligeables, puisqu'elle permet de diminuer considérablement les applications. Cependant, cette technique prometteuse ne pourra être valorisée que si une part suffisante de la surface du champ est exempte de mauvaises herbes, et donc si les densités d'infestations sont faibles. Le désherbage de précision, s'il se développe, devra donc être associé à des systèmes de culture combinant les mesures prophylactiques dans le cadre d'une protection intégrée contre les mauvaises herbes.

Contrôle des maladies et des ravageurs

Dans cette section, nous privilégierons l'étude des méthodes culturales permettant de diminuer la pression parasitaire en minimisant le recours aux produits phytosanitaires : nous présenterons donc les principaux effets des systèmes de culture sur les maladies et les ravageurs, qui sont — hors lutte chimique — les briques élémentaires sur lesquelles bâtir des stratégies de protection intégrée des cultures²¹.

L'effet des systèmes de culture sur la pression parasitaire dépend du cycle de vie des bioagresseurs considérés, de leurs formes de conservation et de dissémination et de leur persistance. Les agents pathogènes ou les ravageurs dont le cycle de vie se déroule dans la parcelle sont susceptibles d'être affectés par des modifications de systèmes de culture à cette échelle. À l'opposé, les agents pathogènes ou les

21. Voir, sur la protection intégrée, Palti, 1981 ; Norris *et al.*, 2003 ; Bajwa et Kogan, 2004. Sur le raisonnement de l'utilisation des pesticides, Flint et Gouveia, 2001 ; Guillebeau, 2004. Sur la lutte physique, Panneton *et al.*, 2000a. Sur la lutte biologique, Vincent et Coderre, 1992 ; Fraval et Silvy, 1999. Sur le contrôle génétique, Johnson et Jellis, 1992 ; Goldbach *et al.*, 1993 ; Lucas, 1998 ; Lepoivre, 2003 ; Smith, 2004.

ravageurs plus mobiles ne pourront être combattus qu'en prenant en compte des échelles supraparcellaires. Cette échelle étant surtout traitée dans la partie 4 de cet ouvrage, nous ne citerons ici que quelques exemples.

On peut classer les modes d'adaptation des systèmes de culture en quatre groupes, identifiés par l'objectif principal visé : diminuer la spécialisation des cultures, créer un environnement défavorable aux bioagresseurs, favoriser les antagonismes entre auxiliaires et bioagresseurs et diminuer la vulnérabilité des cultures.

La spécialisation des cultures

La fréquence de retour d'une culture sur une parcelle est le premier critère explicatif de la pression des bioagresseurs dont le cycle se déroule dans la parcelle. On peut ainsi citer le piétin-verse et le piétin-échaudage des céréales (Lemaire *et al.*, 1981 ; Le Hénaff *et al.*, 2000), l'*Aphanomyces* du pois (Oyarzun *et al.*, 1993), la hernie du chou sur colza (collectif, 2004a). Les populations de parasites qui ne peuvent se conserver longtemps sont réduites par l'absence prolongée de culture hôte (De Guiran, 1983). Dans le cas du piétin-verse, l'inoculum est conservé sous forme de stroma sur les chaumes pendant un à deux ans. Si aucun blé n'est cultivé dans ces délais, la pression d'inoculum baisse très sensiblement, et le risque de développement de la maladie est fortement diminué. Souvent, les bioagresseurs ne sont pas spécifiques d'une culture mais peuvent trouver refuge sur un groupe de cultures. La notion de fréquence de retour s'appliquera alors à des groupes de plantes-hôtes (Delos *et al.*, 2004) : oléagineux et protéagineux pour les sclérotinioses, maïs et céréales à paille pour les fusarioses des grandes cultures, crucifères pour les hernies... Pour estimer le risque, il ne faut pas omettre de comptabiliser les cultures intermédiaires, pour autant que leur présence sur la parcelle soit d'une durée suffisante pour permettre au parasite d'accomplir son cycle (De Guiran, 1983). Les plantes adventices jouent parfois aussi le rôle d'hôtes et peuvent, par leur présence, maintenir l'inoculum : les graminées adventices jouent ce rôle vis-à-vis de l'ergot des céréales (Rothacker *et al.*, 1988), le chiendent est un réservoir pour le piétin-échaudage (collectif, 2001). Certaines cultures-hôtes ne manifestent pas de symptômes liés à la présence du bioagresseur mais n'en sont pas moins des plantes relais, voire amplificatrices.

Vis-à-vis de bioagresseurs plus mobiles, la spécialisation des cultures se raisonne à une autre échelle spatiale. Le phoma du colza se développe sur les jeunes individus à partir des chaumes contaminés de la récolte précédente laissés en surface sur les parcelles voisines. Dans ce cas, la stratégie doit plus porter sur le positionnement relatif entre les parcelles à emblaver en colza et celles déjà récoltées (avec résidus de colza à la surface de sol) que sur la fréquence de retour du colza sur une même parcelle (Schneider *et al.*, 2004). De même, les rouilles sont disséminées par le vent d'une parcelle à l'autre : c'est alors la spécialisation des cultures à l'échelle régionale qui contribue à augmenter la pression d'inoculum. Pour certaines maladies telles que l'oïdium des céréales dont les spores sont très légères, la dissémination atteint de telles distances qu'il ne paraît guère possible de réduire la pression d'inoculum en évitant la spécialisation des cultures.

En pratique, pour certaines maladies, une pression d'inoculum élevée due à une forte spécialisation des parcelles ou de la région peut conduire à une impasse

technique et économique : la culture est alors « impossible » sur la parcelle. On observe de telles situations, par exemple, pour l'*Aphanomyces* du pois. Les associations d'espèces peuvent être comprises comme un moyen de contourner la spécialisation des cultures et leurs impacts sanitaires. La pression de maladies aériennes de l'orge et du pois protéagineux de printemps peut ainsi être réduite dans l'association de ces deux cultures, les plantes non-hôtes ayant un effet « barrière » vis-à-vis de la dissémination de la maladie. Les effets dépressifs de la spécialisation, observés en arboriculture ou viticulture en cas de replantation d'une même espèce après arrachage, sont aussi parfois dus à des développements parasitaires. Dans de nombreux cas toutefois, l'effet dépressif est dû à la toxicité des substances émises lors de la dégradation des tissus anciens (Davet, 1996).

Toutes les associations culture-bioagresseurs ne répondent cependant pas à ce schéma. Dans certains cas, après une prolifération du bioagresseur, on observe une stabilisation ou un déclin de la nuisance : les phénomènes en jeu, impliquant en général la compétition entre organismes, seront décrits ci-après.

Aménager un environnement défavorable au bioagresseur

Les techniques de travail du sol sont fréquemment mises à contribution pour éloigner ou perturber le parasite (Curé, 1991). Ainsi, le retournement du sol évite la présence d'inoculum de fusariose en surface et diminue les contaminations sur céréales à paille et maïs. Concernant le piétin-échaudage, le retournement éloigne des jeunes racines de blé les résidus porteurs d'inoculum et retarde la contamination. Dans le même temps, il place le parasite dans une situation où les échanges gazeux avec l'atmosphère sont moindres, ce qui réduit ses chances de survie. Inversement, les chaumes de blé laissés en surface ne permettent pas une sporulation abondante du piétin-verse, qui s'y développe moins que si les chaumes sont enfouis par un labour. Le travail du sol peut provoquer une mortalité importante chez le bioagresseur : les interventions estivales répétées, en asséchant la surface du sol, réduisent les populations de limaces (Hommay, 1995) ; la survie hivernale du carpo-capse est mise à mal par le travail du sol et par l'entretien de l'enherbement dans les vergers (Roudal *et al.*, 2004).

Les modifications sur l'environnement physico-chimique du bioagresseur peuvent contribuer à réduire sa présence. Le chaulage est recommandé, par exemple, pour limiter les dégâts de hernie du chou (collectif, 2004b). Selon les cultures et les parasites en jeu, on utilise la submersion ou à l'inverse le drainage des parcelles pour aménager un environnement défavorable au bioagresseur (Davet, 1996).

Pour les parasites aériens, il est possible de créer, à l'échelle du couvert, un micro-climat plus ou moins favorable au parasite : l'orientation des plantations et les techniques d'éclaircissage en vignoble comme la réduction de densité de semis et de fertilisation azotée précoce en céréaliculture ont pour objet de réduire la biomasse du couvert, favoriser l'aération et limiter le développement de certaines maladies du feuillage (Bugaret *et al.*, 2002 ; Félix *et al.*, 2002). Cette règle n'est toutefois pas généralisable : le phomopsis du tournesol par exemple serait favorisé par un couvert végétal réduit (Delos *et al.*, 2004).

Enfin, à l'extrême limite de cette catégorie, le piégeage reste une technique utilisée, notamment en agriculture biologique (Roudal *et al.*, 2004) ou en serre (Marchoux *et al.*, 1997), pour réduire les populations de bioagresseurs.

Favoriser les antagonismes

Les systèmes de culture peuvent être orientés afin de favoriser les auxiliaires, prédateurs ou parasites des bioagresseurs. Il est bien sûr indispensable de choisir des produits de traitement des cultures les plus respectueux possible de la faune et de la flore auxiliaires, dont on s'efforcera également de ne pas détruire les habitats. Kromp (1999) cite plusieurs études montrant l'efficacité des carabes dans la limitation des populations de pucerons, de limaces ou de certains lépidoptères. La limitation des populations de pucerons sur les betteraves, qui constitue un autre exemple, a fait l'objet de travaux sur la composition des bordures de parcelles (Ythier et Bernard, 2003). Des associations d'espèces peuvent être proposées sur la base de quatre critères de choix : ne pas être des hôtes des pucerons de la betterave, favoriser le développement des auxiliaires et notamment des prédateurs des pucerons, ne pas être des plantes relais pour les bioagresseurs des autres cultures de la rotation, ne pas être des adventices nuisibles de la betterave pour éviter une contamination ultérieure des parcelles.

L'utilisation des mécanismes biologiques de régulation des bioagresseurs peut faire appel à l'introduction de prédateurs ou d'antagonistes de ces bioagresseurs. On peut citer, sans prétendre à l'exhaustivité, l'introduction de trichogrammes parasites de la pyrale du maïs ou du foreur de canne à sucre (Soula *et al.*, 2003), l'introduction de coccinelles contre les cochenilles en maraîchage (Kreiter *et al.*, 2004), l'introduction de champignons parasites de *Sclerotinia* sur crucifères, ou la mise à profit de la compétition trophique entre micro-organismes pour lutter contre *Fusarium* en développant la biomasse microbienne (Rusanov et Parshin, 1997, Alabouvette *et al.*, 1985). Le succès de la lutte biologique est toutefois soumis à la bonne synchronisation entre le développement du bioagresseur et de son antagoniste (Le Corre, 2004).

Un sol est qualifié de réceptif à une maladie quand celle-ci, dont l'inoculum a été trouvé dans le sol, se développe effectivement sur la culture en place. La non-réceptivité du sol à une maladie a le plus souvent une cause microbiologique : compétition entre micro-organismes pour l'espace sur la racine de la plante, compétition trophique, parasitisme microbien, antibiose... (Sarniguet et Lucas, 1992a). Les références restent rares sur les modifications du milieu susceptibles de diminuer la réceptivité des sols (Sarniguet et Lucas, 1992b). Certains apports organiques exogènes, dans la mesure où ils fournissent à la microflore du sol une ressource alimentaire favorable à son développement, pourraient déplacer favorablement les équilibres microbiens en augmentant la compétition entre micro-organismes au détriment des pathogènes (de *Fusarium* notamment).

Diminuer la vulnérabilité des cultures

Le choix variétal est déterminant pour limiter les conséquences économiques des bioagresseurs. Cependant, le contrôle génétique doit faire face à un enjeu majeur, celui de la durabilité des résistances variétales. Si l'adaptation des populations

aux matières actives est bien documentée pour la lutte chimique contre les mauvaises herbes (Vaughn, 2003), les champignons, les bactéries et les insectes (Elzen et Hardee, 2003), il existe moins de travaux sur les causes de la perte d'efficacité des résistances obtenues par l'amélioration génétique, pouvant parfois se produire en quelques années seulement, dans le cas de champignons, de bactéries ou de virus (Parlevliet, 2002). Il apparaît donc indispensable de développer des outils pour préserver l'efficacité des résistances variétales contre les organismes phytopathogènes. Outre les stratégies de construction du matériel génétique comme par exemple le pyramidage (Mc Donald et Linde, 2002), trois stratégies ont été proposées pour préserver l'efficacité des résistances aux organismes phytopathogènes :

- adapter la proportion des variétés résistantes dans une région donnée, sans utiliser de modèle spatialement explicite ;
- utiliser des associations variétales (Mundt *et al.*, 2002) ;
- alterner des résistances dans le temps et l'espace (Holt et Chancellor, 1999).

Il existe peu d'exemples où l'on parvient véritablement à améliorer, de manière intégrée, la durabilité de l'efficacité des résistances variétales, certainement à cause de la complexité des pathosystèmes considérés (sous-populations se développant sur des hôtes alternatifs, production d'inoculum à partir de résidus de variétés cultivées une à plusieurs années auparavant, migration à longue distance de spores, apport d'inoculum exogènes à une région par les semences...).

L'adaptation du reste de l'itinéraire technique permet de modifier la sensibilité de la culture à différents bioagresseurs. Ainsi, le décalage des dates de semis peut être une stratégie pour éviter les maladies (Flint et Gouveia, 2001 ; Delos *et al.*, 2004). Le retard de semis évite à la culture d'avoir à supporter les premiers cycles de développement de maladies et diminue d'autant la pression de l'inoculum (blé et rouille brune ou piétin-verse). Dans d'autres cas, au contraire, on tirera parti d'un semis avancé pour diminuer la sensibilité à l'attaque parasitaire ou pour réduire la durée de la phase sensible à la contamination (Aubertot *et al.*, 2004).

Des mécanismes d'association symbiotique entre micro-organismes du sol et culture protègent plus ou moins efficacement les cultures contre des bioagresseurs. Des bactéries du groupe *Pseudomonas fluorescens* (Jacques *et al.*, 1993) et des champignons endomycorhiziens (Harrier *et al.*, 2003) sont parmi les plus cités. Si l'on maîtrise guère les conditions écologiques favorables à *Pseudomonas*, on observe que les systèmes de culture à rotation diversifiée et économes en traitements phytosanitaires préservent avec une certaine efficacité les champignons endomycorhiziens (Viaux *et al.*, 2002).

Les outils d'aide à la décision pour lutter contre les bioagresseurs intègrent de plus en plus souvent des informations sur les systèmes de culture. Ainsi, sur blé, les grilles d'aide à la décision de traitement du piétin-verse comme les modèles bioclimatiques prennent en compte la succession des cultures, le travail du sol, la résistance variétale, le type de sol et la date de semis (collectif, 2000 ; Rouzet *et al.*, 2003) ; les modèles bioclimatiques de développement de la septoriose, d'abord calés sur des situations dites « à risque », sont en cours d'ajustement pour prendre en compte les différences de sensibilité variétale, parfois de nutrition azotée (Bodson

et al., 2000). Outre le climat, le traitement de la fusariose dépend de la rotation, du travail du sol et de la variété (Gatel *et al.*, 2004).

La connaissance des effets des systèmes de culture sur les bioagresseurs peut être mise à profit pour orienter les observations ou l'utilisation d'analyses à la parcelle. Ainsi, on peut conseiller sur piétin-verse de ne proposer de tests de détection du parasite, qui exigent un passage sur la parcelle, que dans les situations incertaines, à risque moyen. Il est plus difficile d'intégrer les informations concernant les systèmes de culture quand l'impact se produit à une échelle supraparcellaire. Les indicateurs de durabilité des exploitations tels qu'Idea (Vilain *et al.*, 2003) permettent toutefois d'apprécier globalement la situation de risque dans laquelle se trouve l'exploitation pour les parasites à diffusion interparcellaire (rouilles des céréales, phoma du colza...).

L'impact des systèmes de culture sur les bioagresseurs ne doit pas occulter le poids prépondérant du climat sur les pullulations de certains bioagresseurs, notamment aériens. Ainsi par exemple, l'année 2003 a vu l'explosion des fusarioses des épis des céréales dans tout le centre de la France, y compris dans des situations réputées à faible risque (collectif, 2003). De même, les pullulations de pucerons des épis des céréales en 2004 ont été telles qu'elles ont affecté dans les mêmes proportions les parcelles de plaine et de bocage, y compris dans des exploitations en culture biologique dans lesquelles les prédateurs de ces insectes sont réputés préservés. Toutefois, pour un nombre croissant de situations, le progrès des connaissances sur les cycles des bioagresseurs et sur leurs antagonistes pourrait être mis à profit pour développer des méthodes de lutte intégrée prenant plus largement en compte les effets des systèmes de culture. Les réalités économiques, réglementaires et commerciales sont les principaux déterminants de ces évolutions.

► Effets des systèmes de culture sur la biomasse du sol

Nature et fonctions de la biomasse du sol

Cochran *et al.* (1994), en présentant les groupes d'organismes vivant dans le sol, distinguent les bactéries, champignons et algues vertes qui font partie de la microflore du sol du reste des espèces, et qui constituent la faune du sol²². Lavelle (1997) propose de les classer sur la base de leur taille et de leur type d'habitat. La microfaune est ainsi composée d'organismes de petite taille (< 0,2 mm en moyenne), vivant dans la partie de la porosité du sol remplie d'eau ; elle comprend essentiellement les nématodes et les protozoaires. Les micro-arthropodes (acariens, collemboles...) et les oligochètes de petite taille (Enchytréides) constituent la mésofaune. Leur taille moyenne est comprise entre 0,2 et 2 mm, et ils vivent dans la fraction de la porosité emplie d'air et dans la litière. La macrofaune, enfin, comprend les

22. Le statut des protozoaires, qui ne sont pas à proprement parler des animaux tout en n'appartenant pas à la flore, est un peu ambigu dans cette classification ; Cochran *et al.* (1994) en font une catégorie à part. Le cas des virus n'est pas évoqué par ces auteurs.

organismes dont la taille excède 2 mm : limaces, lombriciens et arthropodes en constituent l'essentiel.

Les rôles joués par les organismes composant la biomasse du sol sont très divers : entretien de la porosité (et donc de l'aération et du fonctionnement hydrique de la couverture pédologique), pouvoir épurateur du sol, fonctionnement des racines et régulation des populations d'ennemis des cultures. Les vers de terre par exemple agissent sur de nombreuses propriétés des sols (Lavelle et Spain, 2001) : outre leur effet sur la structure qui sera développé plus loin, ils contribuent à la dispersion des propagules de mycorhizes, favorisent le développement de nombreuses bactéries (dans les turricules et les galeries), agissent sur la biodisponibilité de certains éléments dans les sols pauvres ; enfin, en perçant une éventuelle croûte de battance, ils favorisent la levée des plantes.

Les populations et les communautés vivant dans la parcelle cultivée entretiennent entre elles un grand nombre de relations (mutualisme, compétition, antagonisme, parasitisme, prédation...), dont il apparaît possible de tirer profit pour mettre au point des méthodes de protection intégrée minimisant le recours aux produits de synthèse. Ainsi, plusieurs centaines d'espèces d'arthropodes prédateurs ont été recensées dans les champs cultivés. Ils appartiennent à la quasi-totalité des taxons même si dominent les araignées, les acariens ou les coléoptères (carabes, staphylins, coccinelles...). Si certains de ces arthropodes ont des régimes alimentaires spécialisés, la plupart sont polyphages, s'alimentant à partir d'un nombre plus ou moins important d'espèces d'invertébrés différentes. Ces prédateurs polyphages jouent un rôle important dans la régulation des populations des ennemis des cultures car, étant généralistes, ils restent présents dans le champ cultivé même quand les bioagresseurs sont absents.

Effets des systèmes de culture sur la biomasse des sols cultivés

Les systèmes de culture ont des effets sur l'ensemble des organismes du sol, dont l'ampleur est extrêmement dépendante des conditions pédoclimatiques et des techniques culturales pratiquées. Cependant, le déterminant principal est d'abord la nature, la quantité et la localisation de la ressource alimentaire. La croissance de tout organisme vivant demande en effet de disposer d'énergie et d'une source de carbone pour la constitution des tissus (Davet, 1996). L'énergie utilisée peut être l'énergie lumineuse (certaines bactéries, algues, végétaux), ou celle provenant de réactions chimiques d'oxydoréduction (certaines bactéries, tous les champignons, les protozoaires, la faune). Quant au carbone, il est assimilé à partir du CO_2 de l'atmosphère ou de l'eau (certaines bactéries et l'ensemble des végétaux autotrophes), ou provient de composés organiques déjà synthétisés (la majeure partie des bactéries, les champignons, les protozoaires, les animaux). Dans les sols cultivés, l'abondance de la flore microbienne est souvent intimement liée à l'abondance des ressources carbonées (Chaussod, 1996). Ainsi, les systèmes de culture qui restituent au sol une forte biomasse sont favorables au développement de cette flore microbienne : cette biomasse est ainsi plus abondante dans les systèmes de grande culture où la totalité de la surface du sol reçoit un couvert végétal que dans les plantations (vignes ou vergers) lorsque les interrangs sont nus ; plus abondante sous

prairie, où la croissance des végétaux est permanente ou quasi permanente, qu'en grande culture où la production est limitée à certaines saisons ; plus importante quand les pailles ou résidus de culture (fanés, sarments...) sont restitués dans la parcelle que quand ils sont exportés ou brûlés. De la même façon, on constate dans les essais de très longue durée que la biomasse microbienne est restreinte dans les systèmes ne faisant appel à aucune fertilisation : la quantité d'éléments minéraux y est très généralement limitante, et la ressource carbonée nécessaire à l'alimentation des micro-organismes s'en ressent (Chaussod et Houot, 1993). Enfin, les gradients verticaux de concentration de la biomasse microbienne dans le sol suivent ceux de teneur en matière organique dans des parcelles labourées comme dans celles qui sont conduites sans labour (Balabane, 2005).

Cette tendance à l'augmentation quantitative de la microflore et parfois de la microfaune sous l'effet de l'intensification de la production semble toutefois atteindre ses limites dans des systèmes très spécialisés, gros utilisateurs de fertilisants ou de produits de traitement des cultures dont les impacts sur la biologie du sol peuvent être très négatifs. On citera ainsi les effets toxiques de certains produits, notamment des fongicides sur les champignons du sol (Domsch, 1985), ou encore l'effet négatif d'un niveau élevé d'azote minéral dans le sol sur les capacités de développement des bactéries fixatrices d'azote des légumineuses, ou d'un fort niveau de teneur en phosphore sur le développement des endomycorhizes. La vulnérabilité de certaines espèces appartenant à la macrofaune des parcelles cultivées vis-à-vis de produits de traitement des plantes a été soulignée à de nombreuses reprises (Chabert, 1996).

L'intensification et la spécialisation des cultures ont des effets qualitatifs sur la microflore et la microfaune. De façon générale, on observe une spécialisation des micro- et macro-organismes du sol : spécialisation dans la décomposition des résidus de la culture en place, dans la dégradation des matières actives phytosanitaires les plus fréquemment apportées (Barriuso *et al.*, 1996), spécialisation des populations de bioagresseurs — traitée précédemment. Cette spécialisation conduit souvent à une baisse de la biodiversité, ou au moins à un déséquilibre dans les populations présentes. Ceci a par exemple été vérifié sur la microflore ou sur la macrofaune dans des parcelles de grande culture (Ronce, 1999 ; Wardle *et al.*, 1999 ; Hillel et Rosenzweig, 2005). Les conséquences de cette spécialisation peuvent être une perte plus ou moins durable de certaines fonctionnalités du sol : pouvoir épurateur vis-à-vis de certaines formes de polluants (Degens et Harris, 1997), régulation des populations de bioagresseurs... Cette évolution est toutefois contredite par certains résultats (Chaussod, 1996 ; Davet, 1996 ; Balabane, 2005) : d'une part, il est actuellement impossible d'avoir un recensement complet des espèces présentes dans le sol et donc de s'assurer de la disparition éventuelle de l'une d'entre elles, d'autre part, une même fonction (dégradation de polluants, structuration du sol...) pouvant être remplie par une grande diversité d'organismes, la perte de l'un peut n'avoir aucun effet sur la capacité du sol à remplir la fonction considérée.

Les modifications de l'état chimique et hydrique du milieu ont de forts impacts quantitatifs et probablement qualitatifs sur la biomasse du sol. Il faut noter en particulier la forte corrélation, dans un milieu donné, entre pH et biomasse microbienne (Chaussod, 1996 ; Félix, 2002). Enfin, on peut citer l'effet des cultures elles-

mêmes sur la flore qui accompagne leur rhizosphère. Neal *et al.* (1973) cités par Davet (1996), ont montré l'effet de différents cultivars de blé sur la composition de la microflore rhizosphérique.

Le mode de travail du sol a un effet majeur sur la composante biologique de l'agro-système. Il modifie les régimes hydrique et thermique, l'aération, la localisation de la matière organique. Ces changements, qui affectent les conditions de vie des organismes et leurs ressources alimentaires, ont des influences diverses sur les multiples communautés qui vivent dans le sol, dont la sensibilité à ces paramètres est très variable (voir par exemple la revue de Wardle, 1995). Par ailleurs, la macro-faune apparaît en général plus affectée par le labour que les organismes de petite taille, du fait du bouleversement de la structure, de l'enfouissement et de la dégradation plus rapide des résidus qu'entraîne cette technique (Kladivko, 2001). L'impact du travail du sol est toutefois très variable selon les dates, les conditions et la fréquence des interventions permettant ou non la recolonisation du sol par les organismes vivants.

Effets du mode de travail du sol sur la microflore, la microfaune et la mésofaune du sol

Les différences entre labour et non-labour sont globalement faibles, même si l'on observe en tendance une microflore plus abondante en non-labour, ce que l'on attribue au fait que les fluctuations de température et d'humidité y sont plus faibles. Si le non-labour augmente l'activité biologique en surface, il la réduit en profondeur. Le bilan global sur l'ensemble de la couche cultivée est donc sensiblement identique en situations labourée et non labourée. Les micro-organismes du sol se développent dans leur quasi-totalité aux dépens de la matière organique morte, des débris végétaux et des exsudats racinaires, dont la localisation influence directement celle des activités microbiennes. Le labour assure une distribution des résidus de récolte dans l'horizon labouré et homogénéise d'une certaine façon les activités biologiques. Avec un travail superficiel, la même quantité de résidus de récolte est enfouie dans un volume beaucoup plus restreint de terre : la concentration en substrat énergétique plus importante entraîne une plus forte concentration en micro-organismes dans les horizons de surface du sol et plus particulièrement en champignons, ce qui accroît l'efficacité du processus d'humification de cette matière organique (cf. p. 179). Un effet important du travail du sol sur la microflore concerne les mycorhizes. Plusieurs études ont montré que le travail du sol profond représente un facteur de stress important pour ces champignons symbiotiques, réduisant le potentiel « infectieux » du sol en fragmentant le réseau mycélien ou en remontant les propagules (hyphes, spores, résidus infectés) à la surface du sol où ils se trouvent soumis à des températures élevées ou sont la proie de prédateurs. En revanche, il y a peu d'informations disponibles sur l'effet du travail du sol sur l'activité des bactéries fixatrices d'azote (Andrade *et al.*, 2003).

Concernant la microfaune, les effets sont variés. L'impact sur les protozoaires est peu documenté. Cochran *et al.* (1994) suggèrent que les techniques qui favorisent les populations de bactéries ont un impact positif sur celles des protozoaires, qui s'en nourrissent. L'effet de la suppression du labour sur les populations de nématodes est faible et apparaît soit positif soit négatif en fonction du type de culture et,

surtout, du mode de gestion des résidus El Titi, 2003b. Cet état de fait résulte probablement de la très grande diversité des espèces de nématodes, qui présentent des régimes alimentaires eux-mêmes très variés, ces vers microscopiques se nourrissant de champignons, de bactéries, de racines, d'autres nématodes...

Les principaux représentants de la mésofaune du sol sont les collemboles, les acariens et les Enchytréides. Les collemboles, même si quelques études ont montré le contraire, sont en général inhibés par un travail du sol qui perturbe régulièrement leur habitat (Wardle, 1995). Les acariens en revanche présentent une gamme de réponse extrêmement variée, certaines études montrant un accroissement très important après adoption du non-labour, d'autres indiquant l'effet contraire. Une étude plus fine montre que la réponse dépend du groupe taxonomique considéré. Ainsi par exemple, le groupe des Oribates est fortement affecté par le travail du sol (Behan-Pelletier, 1999), tandis que les Astigmatides le sont peu et semblent récupérer rapidement leur niveau de population après un bouleversement du sol par le labour (Wardle, 1995). Les Enchytréides représentent l'autre groupe important de la mésofaune du sol. Ces vers de petite taille qui contribuent au maintien de la porosité du sol peuvent être inhibés ou au contraire stimulés par le travail du sol, en raison en particulier d'une grande aptitude à récupérer des perturbations induites par le travail du sol (Cochran *et al.*, 1994) et parce que l'enfouissement des résidus leur rend les ressources carbonée plus facilement accessibles.

Effets du mode de travail du sol sur la macrofaune du sol

Kendall (2003) distingue plusieurs types d'effets du travail (ou du non-travail) du sol sur la densité, l'activité et la structure des communautés d'Arthropodes vivant à proximité de la surface du sol. Les effets directs concernent les blessures occasionnées par les pièces travaillantes des outils et l'exposition des individus aux températures élevées, à la dessiccation ou à la prédation. Ainsi, en zone tropicale, le travail du sol, en détruisant les nids et les tunnels des termites (très sensibles à la lumière et à la sécheresse), a un impact très négatif sur leurs populations. Les effets indirects passent par la modification de la structure au voisinage de la surface du sol, la destruction des adventices et la répartition des résidus. Par exemple, la diminution du nombre de sites favorables à la mise en place d'une toile affecte fortement les populations d'araignées comme les Linyphiidae (Rypstra, 1983). De même, la présence d'adventices, leur fournissant nourriture et abris, accroît le nombre d'Arthropodes présents (Vickerman, 1974).

Quelques travaux évoquent la possibilité d'utiliser la compétition ou la prédation entre populations pour favoriser le rôle de la macrofaune dans la régulation des populations de certains parasites. Samu *et al.* (1999) par exemple suggèrent qu'en ajustant les dates d'intervention sur le sol, sur les résidus (broyage) ou sur les bordures de champ, on puisse favoriser le passage des araignées des résidus vers les jeunes plants de la culture, favorisant ainsi la protection contre les pucerons. Une revue (Kromp, 1999) discute le rôle des Carabidae dans le contrôle des populations de certains bioagresseurs. L'impact de ces Coléoptères sur un certain nombre de parasites (insectes, limaces) est connu, mais certaines espèces sont plus « généralistes », s'attaquant aux plantes, détruisant ainsi des pousses ou des graines

d'adventices, des champignons. Ces rôles sont encore mal connus, mais pourraient s'avérer très importants en non-labour (Stinner et House, 1990).

L'effet sur les vers de terre est celui qui a été le plus étudié. Le travail du sol modifie l'abondance et la composition spécifique des populations de lombriciens présents dans les sols cultivés (Chan, 2001), mais son impact est très largement dépendant des conditions climatiques récentes, de la nature du sol (texture, pH). Si quelques travaux font état d'une stabilité, voire d'une augmentation des populations en situation labourées (Boström, 1995), la plupart des résultats montrent *a contrario* un accroissement en non-labour. Cet effet n'est pas irréversible : l'abandon du labour conduit, lorsqu'il est bien mené, à une amélioration de l'état biologique en général, et de la biomasse lombricienne en particulier. Plus précisément, les espèces dominantes de vers de terre ne sont pas les mêmes en parcelles labourées et en parcelles non labourées (Chan, 2001 ; Balabane, 2005). D'autres travaux mettent en évidence des effets négatifs sur la faune du sol du tassement lié aux interventions culturales (Röhrig *et al.*, 1998) ou au piétinement du bétail (Cluzeau *et al.*, 2003). Les mécanismes invoqués concernent la perturbation des habitats, la redistribution de la matière organique et les modifications de la structure. Les effets du travail du sol dépendent des types d'outils utilisés, de la profondeur de travail et du nombre et des dates d'intervention.

Indicateurs de la qualité biologique des sols

L'un des principaux enjeux de la conception de systèmes de culture durables est celui de la mise au point d'indicateurs de la qualité biologique des sols, outil indispensable à l'élaboration de modes de conduite préservant, voire améliorant la qualité biologique des agrosystèmes. Les mesures portent soit sur les fonctions d'intérêt agronomique ou environnemental (minéralisation du carbone, dénitrification, etc.), soit sur les populations elles-mêmes, ce qui est plus délicat car les effets varient très fortement au cours du temps, parfois sur des périodes très brèves. Les approches sont extrêmement diversifiées (Chaussod, 1996) et les tentatives de standardisation récentes. Ainsi en est-il de l'évaluation des populations de lombriciens, dont on peut mesurer l'abondance, la biomasse, la structure de la population ou la diversité spécifique. Du fait du grand nombre de mesures possibles, mais également de la sensibilité de ces mesures aux effets des systèmes de culture, les vers de terre sont souvent considérés comme étant des indicateurs des états et usages du sol.

L'évaluation de la biomasse microbienne après fumigation est l'une des rares méthodes normalisées et praticables en laboratoire en condition standard. Elle permet de caractériser la contribution de la composante vivante de la matière organique du sol sur les grands cycles biogéochimiques. Chaussod et Houot (1993) ont ainsi montré que le potentiel de minéralisation d'un sol donné était proportionnel à la taille de sa biomasse microbienne. La mesure de l'activité respiratoire de cette biomasse complète utilement la mesure de la biomasse elle-même, très dépendante de la texture du sol, de sa teneur en carbone, de son pH et de la période de mesure. D'autres méthodes sont aujourd'hui proposées pour évaluer globalement la taille de la biomasse et sa contribution aux cycles du carbone et de l'azote, comme la mesure de l'ADN microbien (Balabane, 2005).

Les mesures d'activités enzymatiques ont été proposées pour caractériser la vie biologique des sols. La plupart de ces activités enzymatiques sont très sensibles aux facteurs du milieu. De plus, les mesures sont souvent effectuées dans des conditions standard de laboratoire qui n'ont que peu à voir avec les conditions régnant dans le sol. Il est en conséquence très difficile d'établir des corrélations stables entre une activité enzymatique unique et le niveau des populations microbiennes. La mesure de l'activité d'un cortège d'enzymes pourrait avoir plus de pertinence pour approcher la dynamique des cycles biochimiques. D'autres activités enzymatiques témoigneraient plutôt de l'état de richesse d'un sol en une substance donnée, comme l'activité uréase stimulée par la présence d'urée.

Contribuent aux aptitudes culturelles d'un sol tous les micro-organismes qui favorisent l'alimentation des cultures (bactéries fixatrices d'azote, champignons mycorhiziens...) ou qui réduisent les risques sanitaires. L'appréciation de cet aspect de la qualité biologique du sol passe par la recherche du micro-organisme concerné (dénombrement de *Rhizobium*, mesure du pouvoir endomycorhizogène) ou par la mesure de sa manifestation (mesure de réceptivité d'une culture à une maladie dans un sol donné). Le dénombrement des populations microbiennes est l'une des plus anciennes tentatives de caractérisation de l'activité biologique ; celui des espèces individuelles a été rapidement remplacé par l'évaluation de la taille de groupes fonctionnels définis comme des ensembles de germes capables de se développer sur un substrat donné ; cette approche tend à être abandonnée aujourd'hui au profit de la détermination de populations spécifiques au sein desquelles on évalue une diversité génotypique ou phénotypique. La redondance fonctionnelle étant fréquente, la caractérisation des sols du point de vue de leur pouvoir épurateur vis-à-vis des polluants fait appel à l'appréciation d'une aptitude à métaboliser les chaînes biochimiques considérées, sans que ne soient spécifiquement recherchés le ou les micro-organismes responsables de ces transformations. Une autre approche consiste à repérer des indicateurs sensibles à la modification des techniques culturales, sans que soit posée comme exigence le fait de connaître le lien entre ces indicateurs et une fonction particulière du sol. Dans cette perspective, les récents travaux de Balabane (2005) proposent d'orienter les observations sur la mesure de la biomasse fongique et de son empreinte génétique.

Chapitre 9

La composante physique

Jean ROGER-ESTRADE, Guy RICHARD, Michel BERTRAND,
Frédéric DARBOUX, Pauline DÉFOSSEZ

► Systèmes de culture et gestion de l'eau

Dans de nombreuses régions du monde, les conditions pédoclimatiques font de l'eau une contrainte majeure pour la production agricole, soit parce la quantité disponible est trop faible, soit en raison d'un excès plus ou moins permanent qui pénalise le fonctionnement des racines. Ainsi, l'adaptation à la contrainte « eau » est au cœur de la conception de nombreux systèmes de culture, en milieu aride ou méditerranéen d'une part, en zone humide (sous toutes les latitudes) d'autre part. Après avoir présenté le rôle de l'eau dans le fonctionnement de l'agrosystème, nous traiterons de la question de sa gestion par les systèmes de culture, en nous focalisant sur l'adaptation au manque d'eau.

Le bilan hydrique

Le stock d'eau dans le sol constitue la réserve à partir de laquelle s'alimentent les plantes qui, à de rares exceptions près, prélèvent ce facteur de croissance essentiellement par leurs racines. Le raisonnement de l'utilisation de la ressource en eau s'établit donc à partir de la connaissance des causes de variation du stock d'eau dans le sol.

Deux approches peuvent être considérées pour aborder la question de la fourniture et du stockage de l'eau par le sol. La première repose sur les équations de flux dérivées de la loi de Darcy et nécessite de connaître les valeurs du potentiel hydrique dans le volume de sol exploité par les racines, en pratique rarement disponibles. Dans la seconde, la question du stockage de l'eau dans le sol est abordée en termes de variation d'un stock — la réserve utile (RU) —, ce qui revient à assimiler le sol à un réservoir (Jamagne *et al.*, 1977). La taille de ce réservoir dépend alors d'une part du volume de sol qui contribue à la fourniture d'eau, et d'autre part de la quantité d'eau utilisable par unité de volume de sol.

Le volume utilisable correspond à la zone prospectée par les racines avec une densité suffisante pour permettre l'extraction totale de l'eau. On considère le plus souvent que ce volume correspond à la profondeur maximale d'enracinement, mais cette égalité est à nuancer lorsque des zones tassées ou caillouteuses limitent la prospection par les racines. Enfin certains sols, situés sur des substrats très poreux (sur craies par exemple) peuvent être sujets à des remontées d'eau par capillarité qui conduisent à des fournitures d'eau par des zones de sol situées largement en dessous de la profondeur d'enracinement. Le volume de sol considéré étant déterminé par la profondeur d'enracinement et la densité des racines, la taille de la réserve utile augmente au cours du cycle, jusqu'à ce que l'appareil végétatif de la plante soit constitué. La quantité maximale d'eau utilisable par unité de volume ne dépend que du type de sol. Elle est comprise entre deux teneurs en eau remarquables : l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. La première correspond à l'humidité atteinte à la fin de l'écoulement par gravitation après un apport d'eau ayant saturé le sol (à ce point d'humidité, l'eau n'est plus attirée par la force de gravitation). La seconde humidité correspond à la teneur en eau en deçà de laquelle les racines ne sont plus capables d'extraire l'eau du sol. L'écart entre ces deux humidités définit la quantité maximale d'eau utile, par unité de volume de sol. Cette quantité dépend de la texture mais aussi, dans une plus faible mesure, de la teneur en matière organique du sol (Kay *et al.*, 1997). Le niveau de remplissage de la réserve en eau évolue ainsi entre un niveau 0 (réserve vide, lorsqu'il reste de l'eau dans le sol mais que celle-ci est en quantité trop faible pour être extraite par les racines) et le niveau de remplissage maximal. Au-delà de ce seuil, toute quantité d'eau supplémentaire n'est pas retenue par le sol et est perdue par drainage ou par ruissellement. Ce mécanisme contribue à la recharge des nappes, mais peut entraîner des risques de pollution par les nitrates ou les pesticides.

La reconstitution de la réserve en eau du sol s'effectue grâce aux précipitations (pluies, neige) et aux irrigations, auxquelles il faut soustraire la quantité d'eau qui s'évapore ou qui ruisselle sans s'infiltrer. Une pluie de faible hauteur se limite à mouiller le feuillage et s'évapore rapidement sans s'être infiltrée dans le sol, d'où le concept de pluie « efficace » qui consiste à éliminer les précipitations de très faible valeur dans le calcul des apports. De même, les quantités apportées lors d'irrigations par aspersion devront être toujours largement supérieures à la quantité d'eau qui peut être perdue dans le couvert végétal, d'autant plus importante que le couvert est développé. Le coefficient de partage entre infiltration et ruissellement dépend de trois caractéristiques qui sont la pente, l'intensité des pluies et la présence d'un couvert végétal vivant ou mort protégeant la surface du sol de l'énergie cinétique des gouttes de pluies (cf. p. 232). L'évapotranspiration est une mesure des pertes d'eau par retour dans l'atmosphère. Celles-ci correspondent à la somme de deux termes non indépendants, l'évaporation à partir du sol (ou des parties mouillées des plantes) et la transpiration des plantes, qu'elles fassent partie du peuplement cultivé ou non (adventices, plantes de couverture). Pour raisonner la gestion du stock d'eau dans l'agrosystème, il convient de considérer trois termes. Le premier est d'ordre uniquement climatique, il s'agit de la demande évaporative ou évapotranspiration potentielle (ETP) ; le second fait intervenir le degré de développement de la culture, il s'agit de l'évapotranspiration maximale (ETM) ; enfin, un dernier terme

concerne la quantité d'eau effectivement consommée par la plante, c'est l'évapotranspiration réelle (ETR)²³.

L'ETP ne dépend que du climat. Trois facteurs interviennent dans son calcul : le rayonnement net, le déficit de saturation de vapeur de l'air (lui-même influencé par la vitesse du vent) et la résistance de transfert de l'eau à partir du milieu (surface du sol pour l'évaporation, résistance stomatique dans le cas de la transpiration). L'importance du vent dans la demande évaporative justifie l'installation de brise-vents pour limiter l'évaporation dans certains milieux fortement ventés où la ressource en eau est limitante.

L'ETM dépend du degré de croissance et de développement du couvert végétal. En effet, au cours d'un cycle de culture, l'augmentation de la surface foliaire entraîne une diminution progressive de l'évaporation du fait de la réduction de la quantité de rayonnement parvenant à la surface du sol. En revanche, la transpiration augmente, en raison de l'accroissement de la surface foliaire. Dans l'approche classique du fonctionnement hydrique fondée sur la notion de « réserve utile », le rapport entre l'évapotranspiration maximale de l'agrosystème (ETM) et la demande climatique (ETP) correspond au coefficient cultural $k = \text{ETM}/\text{ETP}$, dont la valeur varie pour chaque culture en fonction des étapes de son cycle cultural (Katerji, 1977). Lorsque l'eau n'est pas limitante, on considère alors que la consommation d'eau du peuplement est égale à l'ETM.

L'ETR est classiquement déterminée à partir de l'ETM et de la détermination de la capacité ou non du sol à fournir la quantité d'eau nécessaire. À partir de cette approche, le niveau de satisfaction des besoins en eau est décrit par le rapport ETR/ETM. Ce ratio est égal à 1 quand il n'y a pas de contrainte et tend vers 0 au fur et à mesure que la contrainte hydrique s'intensifie. Cette approche à partir de la comparaison des ressources en eau contenues dans le sol et des demandes climatiques ne permet toutefois pas de décrire la dynamique réelle de la contrainte hydrique, car elle ne tient pas compte d'un certain nombre de régulations que la plante peut mettre en œuvre pour économiser l'eau quand la demande est maximale (régulation stomatique, limitation des surfaces d'échange, augmentation de l'absorption d'eau, limitation de la déshydratation des tissus ; voir chapitre 4), ou du ralentissement de l'absorption d'eau qui intervient lorsque le niveau de remplissage de la réserve en eau descend en dessous d'un certain seuil.

La contrainte hydrique affecte différentes fonctions physiologiques. L'accroissement de l'intensité du stress s'accompagne des processus suivants : limitation de l'allongement foliaire (stress de turgescence) et modification des rapports entre la croissance des parties aériennes et celle des parties souterraines, puis diminution de la photosynthèse du fait de la régulation stomatique, puis augmentation de la sénescence et diminution du nombre de puits (donc du nombre de grains), et enfin mort de la plante. Ces conséquences seront variables suivant l'espèce considérée, le génotype (résistance à la sécheresse), et la période du cycle pendant laquelle le déficit hydrique se produit.

23. Pour plus de détails sur les méthodes de mesure et sur les facteurs faisant varier l'évapotranspiration, voir des ouvrages de bioclimatologie comme Chamayou, 2000 ; voir également chapitre 4.

Adaptation des systèmes de culture à la contrainte hydrique

L'excès d'eau perturbe les fonctions physiologiques de la plante (anoxie, intoxication ammoniacale, limitation de la croissance racinaire²⁴) et limite le nombre de jours disponibles pour les travaux agricoles. Dans certains milieux très humides comme les zones équatoriales, la saison la plus pluvieuse est souvent accompagnée d'une pression en maladies telle que la principale saison de culture est justement la saison la moins pluvieuse. Deux grandes stratégies sont développées pour lutter contre l'excès d'eau : d'une part le positionnement des cycles culturaux et l'utilisation d'un couvert végétal en interculture pour augmenter la transpiration, et d'autre part l'assainissement des terres par le drainage. Dans certains cas, cet assainissement peut conduire à une augmentation de la prospection racinaire, qui permet au peuplement de mieux s'alimenter en période de déficit hydrique. De même, la limitation de l'engorgement a des effets sur le réchauffement des terres et permet d'avancer les dates de semis. Cependant, la diminution des zones humides a un rôle non négligeable sur la perte de biodiversité liée à l'activité agricole.

L'adaptation des systèmes de culture à des conditions arides ou à des déficits hydriques chroniques passe par deux voies qui ne s'excluent pas : le raisonnement de la position des cycles et l'irrigation. Dans le premier cas, la position du cycle, déterminée à partir de l'évolution des températures et du rayonnement en milieu tempéré ou de l'arrivée d'une saison des pluies en milieu tropical, va permettre d'évaluer un risque de sécheresse basé sur une étude fréquentielle du climat. Les périodes à risque sont en particulier déterminées par les phases de sensibilité dans l'élaboration du rendement. À partir de cette phase, plusieurs stratégies sont possibles : la première consiste à esquiver la saison sèche en menant le cycle en dehors des périodes de déficit hydrique, éventuellement en optant pour une durée de cycle plus courte, ce qui va limiter le potentiel de rendement. Une deuxième possibilité est de limiter l'importance du déficit hydrique en jouant sur la surface foliaire de la culture, à partir de la densité de semis et du choix variétal, mais aussi en insistant sur la lutte contre les adventices qui contribuent à la perte d'eau par transpiration. Enfin, une dernière stratégie consiste à raisonner à l'échelle de la culture et de l'interculture en essayant de stocker de l'eau dans le sol avant la mise en place de la culture. On utilise alors une conduite de l'interculture visant à éliminer toute présence végétale (adventices, repousses) par voie chimique ou mécanique, pour diminuer les pertes par transpiration pendant la période où la balance hydrique permet de stocker de l'eau (jachère). Cette stratégie peut éventuellement se décliner avec un système cultivé une année sur deux avec maintien d'un sol nu l'année sans culture (*dry farming*).

La pratique de l'irrigation pose plusieurs questions : celle du choix d'investissement (nature des équipements et de leurs dimensionnements), donc des besoins globaux à couvrir ; celle de la gestion stratégique de la ressource et de l'établissement d'un calendrier prévisionnel des apports, celle des techniques d'apports, et enfin celle du

24. À l'exception notable du riz, dont les caractéristiques botaniques permettent l'oxygénation des parties souterraines à partir des parties aériennes et donc la tolérance aux situations ennoyées (Yoshida, 1981).

pilotage au quotidien de l'irrigation, qui suppose l'utilisation d'indicateurs des besoins en eau des cultures.

L'évaluation de l'intérêt d'une installation d'irrigation et celle de son dimensionnement reposent sur l'estimation des déficits hydriques prévisionnels, de leur incidence en termes de production, et de rentabilité économique de l'investissement : retour sur investissement, sécurisation du revenu. Il faut élaborer des hypothèses sur les prix relatifs des produits et de l'eau, qu'il convient d'explicitier pour évaluer l'intérêt de l'investissement pour plusieurs scénarios d'évolution des prix. Du choix de l'équipement va découler une surface irrigable généralement inférieure à celle de l'exploitation, et des besoins en main-d'œuvre à mobiliser en fonction de cette surface et du matériel retenu.

La question de la gestion stratégique de la ressource et de la répartition des apports au cours du cycle se pose dans le cas, le plus fréquent, où la ressource en eau et/ou le niveau d'équipement et de main-d'œuvre ne permettent pas de satisfaire la totalité des besoins des cultures. L'irrigant doit alors définir des règles *a priori* de satisfaction des besoins et de répartition de la ressource entre parcelles, et remettre en question ces décisions au fil du cycle en fonction du climat réel et des connaissances sur les phases de sensibilité de l'élaboration du rendement à la contrainte hydrique.

Les techniques d'apport utilisées de part le monde sont très diverses (Tiercelin, 1998). La technique la plus ancienne est l'irrigation de surface, par ruissellement dans des rigoles ou par submersion. Deux techniques plus modernes sont l'aspersion et l'irrigation localisée. À ces différentes techniques correspondent des coûts d'implantation, des besoins en main-d'œuvre et des efficacités de l'eau apportée (rapport entre l'eau utilisable par la plante et l'eau apportée) variables. De même, la position des périodes d'arrosage dans la journée par rapport à l'évolution de la demande climatique va jouer un rôle sur l'efficacité de l'eau, les apports aux périodes d'ETP instantanées élevées étant moins efficaces pour la recharge du stock d'eau du sol.

Le dernier point correspond au pilotage au quotidien de l'irrigation. Dans la pratique, la décision de déclencher l'irrigation est prise selon deux modalités : soit c'est la disponibilité de la ressource en eau et en matériel qui conditionne l'apport — la réserve hydrique du sol servant à concilier si possible ces apports avec les besoins —, soit c'est l'évaluation du besoin en eau des cultures. Dans ce dernier cas, deux grandes catégories d'indicateurs peuvent être distinguées : celle qui concerne l'évaluation du degré de remplissage de la réserve utile et celle qui concerne l'état hydrique des plantes. Dans la première, on rangera les calculs de bilan hydrique assortis de mesure du potentiel hydrique du sol, grâce à la tensiométrie par exemple. Dans la deuxième catégorie, on trouvera aussi bien des indicateurs simples comme l'enroulement des feuilles, que des mesures plus sophistiquées comme les variations de diamètres de tiges ou de fruits, ou encore la température de surface.

► Systèmes de culture et évolution de la structure du sol

La structure des sols cultivés (*figure 3.7*) se définit comme « l'ensemble des caractères liés à la disposition spatiale des éléments qui constituent le sol ainsi qu'à la nature et à l'intensité des liaisons qui existent entre eux » (Stengel, 1990). Ce concept désigne donc l'organisation de la phase solide du sol, à différents niveaux d'appréhension. Il se réfère également, à travers la mention des liaisons entre particules, à l'aptitude du sol à conserver un état donné (notion de « stabilité structurale », qui renvoie à celle de « résilience » évoquée plus haut à propos de l'écosystème). Son complémentaire est la porosité du sol et, suivant que l'on s'intéresse au fonctionnement du sol vis-à-vis de l'environnement, des plantes ou à la manière dont le sol réagit aux interventions culturales (travail du sol, passages de roues), on abordera l'étude de la structure en privilégiant respectivement soit la porosité, soit le comportement mécanique de la phase solide. On distingue deux types de porosité : la porosité texturale, liée à l'organisation des composants élémentaires du sol (argile, limons, sables, matières organiques) et la porosité structurale, plus grossière, liée à l'organisation des fragments terreux tels que les agrégats ou les mottes²⁵. Si l'on peut considérer que le premier type de porosité ne varie pas au cours du temps (Monnier *et al.*, 1973), le second subit l'influence des facteurs qui font évoluer la structure, qu'ils soient d'origine anthropique ou naturelle.

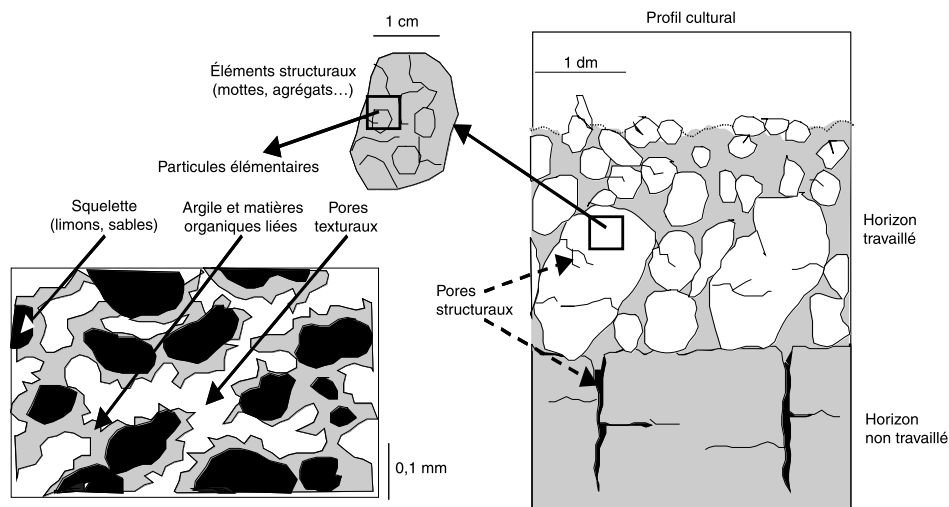


Figure 3.7. Les différents niveaux d'organisation de la structure du sol (Roger-Estrade *et al.*, 2005, in *Sols et Environnements*, M.-C. Girard, J.-L. Morel, Paris, ©Dunod 2005).

25. D'autres typologies existent, distinguant par exemple macro- et microporosité en fonction de la taille des pores. La distinction « structurale/texturale », fondée sur l'origine des deux types de porosité, est plutôt utilisée lorsque l'on étudie les effets des systèmes de culture sur le sol.

Les propriétés qui découlent de la structure déterminent non seulement les conditions dans lesquelles se déroulent la croissance et le développement des cultures (germination, levée, croissance et fonctionnement des racines) et les conditions d'application des techniques culturales (portance, efficacité de l'action des outils...), mais également une part importante de l'impact des systèmes de culture sur l'environnement (pollution par les nitrates ou par les pesticides, érosion, maintien de l'activité biologique et de la biodiversité...). En effet, cette caractéristique physique du sol joue un rôle majeur dans le cycle de l'eau et des éléments qui y sont dissous. L'état de surface détermine le risque de ruissellement, et la structure des horizons sous-jacents conditionne les transferts vers les racines ou en profondeur. La structure du sol joue également sur la vitesse et sur l'intensité des échanges qui régissent l'évolution de la composition chimique de la solution du sol. Enfin, les très nombreuses communautés d'êtres vivant dans le sol voient leur activité très largement influencée par les conditions physiques qui dépendent elles-mêmes fortement de l'état structural du sol (température, teneur en eau, oxygénation). À travers la structure, les composantes physique, chimique et biologique de l'état des sols cultivés sont ainsi intimement liées.

Facteurs d'évolution de la structure autres que le travail du sol

Étudier l'évolution de la structure oblige à disposer d'une méthode de caractérisation. Il existe un très grand nombre de ces méthodes, qui diffèrent par les objectifs poursuivis, le niveau d'organisation abordé, les procédures utilisées (Dexter, 1988 ; Roger-Estrade *et al.*, 2004). Les études dont l'objectif est de comprendre l'évolution de la structure sous l'effet des systèmes de culture privilégient les méthodes de description basées sur l'observation morphologique. Parmi celles-ci, la méthode proposée par Manichon (1982, 1987) est la mieux adaptée à l'analyse des effets des techniques et du tassement sur la structure du sol. Nous renvoyons le lecteur à Gautronneau et Manichon (1987) pour une description détaillée de la procédure.

La structure des sols cultivés évolue en permanence sous l'effet du climat, de la faune du sol, des racines et des actions de l'agriculteur (*figure 3.8*). Ce dernier agit directement par ses techniques culturales ou par la circulation des engins agricoles (qui peuvent, dans certaines conditions, compacter le sol), et plus indirectement par le choix des successions de cultures qui détermine le calendrier d'occupation de la parcelle. La structure du sol est donc une caractéristique dynamique dont l'évolution est régie par des actions qui entraînent soit sa dégradation (diminution de la porosité structurale), soit sa régénération (accroissement de la porosité structurale). Les processus conduisant à la dégradation de la structure sont le compactage par les roues des engins agricoles ou la prise en masse sous l'effet du climat, dont la manifestation la plus visible est le phénomène de battance. Les processus menant à un accroissement de la porosité sont la fragmentation par les outils de travail du sol (dont les effets sont traités plus loin) et l'action des agents naturels : fissuration par le climat ou action de la faune du sol. On notera d'emblée que l'action de la charrue à versoir est particulière : à la fragmentation des couches de sol labourées s'ajoute leur retournement. Ainsi, lors de chaque labourage, la charrue expose à l'action des agents de fragmentation — dont l'efficacité est maximale en surface — des volumes

de sol qui, sinon, seraient restés protégés de ces actions. Au cours du temps, les actions mentionnées ci-dessus se succèdent et, à chaque étape, l'intensité de l'effet de chaque facteur dépend de la constitution du matériau (texture, teneur en carbone, teneur en calcaire), de son humidité et de son état structural. Le comportement du sol dépend donc non seulement de ses caractéristiques intrinsèques, mais également du climat et de son histoire. Ainsi par exemple, un sol fortement dégradé par le passage répété d'engins en conditions humides sera plus difficile à fragmenter qu'un sol non tassé.

Dégradation de la structure

Les pluies, si leur intensité est suffisante, modifient la structure de la surface du sol. Ce phénomène — la battance (Lozet et Mathieu, 1990) — aboutit, sur les sols sensibles au phénomène, à la formation de croûtes épaisses de quelques millimètres. Partant d'un labour ou d'un lit de semence, au cours des pluies successives, les mottes vont se souder et différents types de croûtes vont se former (Valentin et Bresson, 1992). En rendant la surface plus continue, la battance a pour conséquence de diminuer les échanges d'eau, de gaz et de chaleur entre l'atmosphère et le sol (affectant ainsi l'infiltration, le ruissellement, l'oxygénation, etc.) ; la battance crée aussi des barrières au franchissement des plantules, ce qui affecte le taux de levée. Enfin, la fermeture de la surface consécutive à la formation de croûte, empêchant l'infiltration de l'eau, favorise le ruissellement et l'érosion hydrique (cf. chapitre 10). La dynamique de la battance dépend des sollicitations climatiques et de la résistance du matériau face à ces sollicitations. La résistance de la structure du sol à la désagrégation par l'eau de pluie peut être mesurée au moyen de tests effectués en laboratoire, tels ceux proposés par Le Bissonnais (1996). Ces tests de stabilité

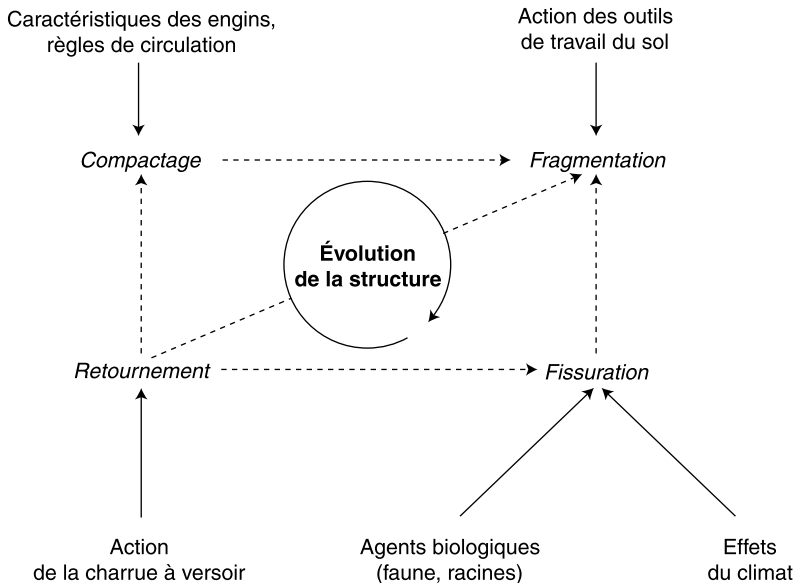


Figure 3.8. Les facteurs d'évolution de la structure des sols cultivés (Roger-Estrade *et al.*, 2005, in *Sols et Environnements*, M.-C. Girard, J.-L. Morel, Paris, ©Dunod 2005).

structurale ont pour objectif de caractériser la sensibilité des agrégats du sol aux différents mécanismes de désagrégation cités ci-dessus.

La stabilité structurale d'un sol résulte de l'interaction entre de nombreux facteurs qui créent ou détruisent des liaisons entre les particules (Amézketa, 1999). Il y a tout d'abord des facteurs internes tels que la texture, la minéralogie, la matière organique, la présence d'oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et la composition de la solution de sol. Certains de ces facteurs, comme la texture et la minéralogie, sont souvent considérés comme constants, alors que d'autres, comme la matière organique et la composition de la solution de sol, peuvent connaître des évolutions plus ou moins rapides. Des facteurs externes affectent aussi la stabilité structurale et donc la battance. Le climat, au travers des alternances gel-dégel ou humectation-dessiccation, entraîne des réorganisations des structures et des réarrangements des liaisons entre particules. Si ces alternances d'origine climatique sont aujourd'hui bien identifiées comme facteurs modifiant la stabilité structurale, elles peuvent contribuer à l'augmenter comme à la diminuer, sans que leur déterminisme soit encore clairement élucidé.

Les pratiques culturales font-elles aussi partie des facteurs externes capables d'affecter la stabilité structurale, et donc la dynamique de la battance. Si leur implication est largement documentée, leur effet — augmentation ou diminution de la stabilité structurale — est encore controversé, les résultats variant selon les études (Amézketa, 1999). Dans quelques cas, cependant, un accord semble se dégager : l'apport d'amendements organiques améliore la stabilité structurale. Les matières organiques ont pour effet de créer des liaisons entre les particules minérales, augmentant la résistance de la structure et ralentissant la formation des croûtes de battance. Un autre exemple classique lié aux pratiques culturales est celui de l'irrigation. La stabilité structurale dépend en effet de l'état des argiles (floculation ou dispersion). Cet état est déterminé par la composition de la solution du sol, et en particulier par sa richesse relative en sodium. Lorsque les eaux utilisées pour l'irrigation sont trop riches en sodium, les argiles passent à un état dispersé, réduisant fortement la stabilité structurale, et donc accélérant la formation de croûtes de battance. Enfin, certaines pratiques culturales ne modifient pas la stabilité structurale mais affectent l'effet des pluies sur la battance. Ainsi, la mise en place d'une culture de couverture (pendant l'interculture ou en association avec la culture commerciale) ou le maintien des résidus à la surface du sol, en interceptant les gouttes de pluie, contribuent à diminuer l'intensité de la battance et, partant, à freiner l'érosion hydrique.

Le compactage, ou tassement, des sols cultivés a des conséquences importantes sur la production végétale et sur l'environnement : il affecte l'implantation et le développement des cultures par son effet mécanique sur l'émergence et l'enracinement des plantes, et il modifie les propriétés de transfert d'eau et de gaz. Il peut altérer la stabilité physique du sol à l'égard de l'érosion hydrique et créer des zones anoxiques favorables à la dénitrification, et donc à l'émission de gaz à effet de serre. La création d'ornières peut s'avérer également problématique pour les interventions culturales ultérieures. Enfin, lorsqu'il affecte les horizons situés sous la couche de sol travaillée, le compactage altère durablement l'état du sous-sol. Une couche de sol soumise à des contraintes mécaniques induites par le passage d'une roue se

comprime. Selon Hillel (1998), on peut distinguer deux processus de compression du sol : la consolidation, qui correspond à une augmentation de masse volumique dans un matériau saturé par l'expulsion de l'eau qu'il contient, et le compactage proprement dit, qui désigne l'augmentation de masse volumique dans un matériau humide mais non saturé, essentiellement par une réduction du volume d'air. En agriculture, les passages ont lieu, sauf exception, en conditions non saturées. Le passage d'un engin agricole provoque donc, si le sol est encore suffisamment humide, un compactage, qui se traduit par une diminution de la porosité structurale sous la roue de l'engin et la création d'une ornière en surface. Le compactage des sols par les engins agricoles dépend de deux types de facteurs : l'intensité de la contrainte et les caractéristiques du matériau.

L'intensité de la contrainte appliquée (le chargement mécanique) dépend des caractéristiques du véhicule. Il peut être décrit par la distribution des contraintes qui s'appliquent en surface au contact des pneumatiques et en profondeur. Les engins agricoles exercent des contraintes qui représentent des pressions allant de 30 kPa pour un tracteur auquel sont attelés des engins de préparation du lit de semences à 400 kPa pour une récolteuse de betteraves sucrières. La propagation de ces contraintes en profondeur dépend d'abord de leur intensité, mais aussi de la surface d'appui au sol des pneumatiques. À poids égal, la pression appliquée (et donc le risque de tassement) est d'autant plus faible que la surface d'appui est grande.

La résistance mécanique du matériau constitutif des horizons de surface détermine l'importance de la déformation de la couche de sol sous l'effet des contraintes évoquées ci-dessus. Cette résistance dépend essentiellement de trois paramètres : la constitution (texture, teneur en matières organiques), la structure et la teneur en eau. Différents tests pratiqués en laboratoire permettent d'évaluer les propriétés mécaniques de la terre. Ces tests, qui s'inspirent de ceux utilisés en physique des matériaux, ont pour principe général l'application d'une ou de plusieurs pressions, d'intensité et de direction connues, à un petit échantillon de sol (quelques centimètres cubes). Leur objectif est d'évaluer la relation contrainte-déformation du matériau en fonction de son état hydrique, et sa réversibilité. En effet, si, à de faibles contraintes, les déformations sont réversibles (on parle alors de « déformations élastiques »), on constate généralement qu'au-delà d'une valeur de pression caractéristique appelée « pression de préconsolidation », apparaissent des déformations plus importantes qui, elles, sont irréversibles (dites « déformations plastiques »).

En raison de ces conséquences sur la production végétale et sur l'environnement, de nombreux travaux ont été menés pour prévoir le compactage en modélisant le phénomène à l'échelle de la parcelle cultivée (Défossez et Richard, 2002). Les modèles pseudo-analytiques de calcul des contraintes ont été évalués de façon satisfaisante pour une large gamme de conditions au champ (types de sol, charges des engins, pneumatiques, conditions d'humidité du sol) dans la limite des couches de sol homogènes sur les cinquante premiers centimètres. Pour les structures hétérogènes, caractéristiques des sols cultivés, les modèles numériques développés à partir de la méthode des éléments finis sont plus adaptés. Cependant, étant plus complexes, ces modèles requièrent davantage de paramètres et, de ce fait, n'ont pas été jusqu'à présent testés en grandeurs réelles pour des fortes intensités de compactage.

Régénération de la structure

La faune agit mécaniquement sur le sol par l'activité fousseuse de nombre de ses représentants (Edwards et Lofty, 1977 ; Lee, 1985). La macrofaune joue un rôle actif sur la structure du sol, alors que les organismes qui constituent la microfaune ont tendance à se déplacer au sein des espaces existant en ne modifiant pas de manière notable la structure du sol. En revanche, les micro-organismes interviennent sur les processus d'agrégation du sol et sur sa stabilité structurale. L'activité fousseuse se traduit à la fois par la création de galeries ou de chambres d'estivation, et par le transport de matériel.

La création de galeries dépend de l'animal et de son mode de progression. Ainsi distingue-t-on les organismes mineurs qui creusent leur chemin souterrain avec leurs mandibules, transportant ainsi la terre à la surface (fourmis, termites) ou la repoussant derrière eux avec leurs pattes (larves de hanneton), des organismes tunneliers qui forent les galeries en agrandissant les interstices existants (diplopodes, vers de terre), ou en ingérant la terre et en l'évacuant sous forme de déjections (vers de terre). Ces déjections, qui correspondent le plus souvent à un mélange intime de débris végétaux et d'éléments minéraux, sont soit localisées dans le sol (déjections endogées), soit déposées à la surface du sol (turricules de vers de terre). La création de galeries ou la production de déjections et le transport de matériel participent d'une réorganisation de la porosité, à différents niveaux (Luxmoore, 1981) : la création de galeries ou de chambres d'estivation accroît la proportion de pores de grande taille, c'est-à-dire d'un diamètre supérieur à 1 mm ; les déjections déposées dans le sol engendrent une porosité d'assemblage, ce qui correspond à un diamètre compris entre 30 μm et 1 000 μm ; enfin, on observe parfois une porosité de petite taille (d'un diamètre inférieur à 30 μm) au sein de ces déjections. Cette réorganisation de la porosité participe généralement de la régénération de la structure mais peut, dans certains cas, mener à une dégradation de l'état physique du sol.

Le plus souvent, l'activité biologique a un effet bénéfique sur la structure : on connaît, depuis la fin du XVIII^e siècle et les travaux précurseurs de Charles Darwin, l'influence positive de la faune du sol sur la structure. L'importance de cet effet dépend de la quantité de matière organique disponible, de la texture et de l'humidité du sol (Edwards et Lofty, 1977 ; Kladvko, 2001), et donc du type de système de culture pratiqué. Plusieurs travaux ont aussi démontré la variabilité des effets entre espèces de lombriciens. Ainsi les épigés ne créent pas ou peu de galeries, alors que les endogés²⁶ créent un réseau de galeries très ramifié, à orientation subhorizontale à horizontale. Ces galeries sont temporaires. Enfin, les anéciques, dont la taille va de 10 à 110 mm, vivant plus en profondeur que les précédents, créent un réseau de galeries très peu ramifié, à orientation verticale à subverticale, qui présente un caractère permanent, les individus réutilisant des galeries existantes. Ainsi, en fonction de la combinaison de l'ensemble des facteurs précités et de la composition en espèces du peuplement lombricien, l'effet sur la structure est très variable, le nombre de galeries pouvant varier de 100 à 1 400 $\cdot \text{m}^{-2}$.

26. En zone tempérée, les épigés, littéralement « sur la terre », ont une taille qui varie de 1 à 3 cm ; les endogés, « dans la terre », mesurent de 1 à 20 cm.

La porosité d'assemblage, liée aux déjections déposées dans le sol, augmente avec la densité de vers de terre. Ce type de porosité est directement lié à une structure grumeleuse et produit de fait des conditions environnementales favorables à l'activité biologique. La quantité de déjections au sein du sol est relativement difficile à déterminer, mais elle est probablement équivalente voire supérieure aux rejets de surface. Les dépôts de surface peuvent être très importants puisqu'en système tempéré, ils peuvent varier de 2 à 10 kg · m⁻², ce qui correspond à la création d'un horizon de 5 à 25 mm d'épaisseur. De plus, la présence de turricules augmente la rugosité de la surface du sol, ce qui ralentit l'écoulement de la lame d'eau, favorisant ainsi l'infiltration au détriment du ruissellement et de l'érosion. Enfin, qu'elles soient localisées en surface ou au sein du sol, les déjections, contenant des matières organiques peu décomposées, favorisent le développement des micro-organismes, ce qui stimule l'activité microbiologique du sol.

En ce qui concerne la régénération de la porosité par le climat, la fissuration liée à l'alternance gonflement-retrait des argiles joue un rôle essentiel. Un sol fortement desséché par une culture pendant l'été, ou bien des mottes d'un lit de semences ayant subi des alternances pluie/dessèchement laissent apparaître des fissures qui sont plus ou moins larges et plus ou moins denses, en fonction du type de sol. Ces fissures, qui peuvent atteindre plusieurs centimètres de large dans des sols argileux, jouent un rôle très important dans le fonctionnement du sol, de résistance à la pénétration des racines, de diffusion des gaz et d'infiltration de l'eau. La fissuration est un processus naturel fondamental de la régénération des volumes de sol fortement compacté, dont l'importance est cruciale dans les systèmes de culture sans travail du sol. Ce sont principalement les variations de teneur en eau, entraînant des changements de volume en raison du retrait (lors d'une dessiccation) ou du gonflement (lors d'une humectation) des argiles du sol, qui sont à l'origine de la formation des fissures (Stengel et Bourlet, 1987). L'intensité de la fissuration qui en résulte, souvent caractérisée par la longueur de fissures par unité de surface (sur un plan horizontal) ou de volume, dépend en première approche de deux groupes de facteurs. Le premier est l'amplitude de la variation de volume du sol liée au gonflement-retrait. Celle-ci dépend de la teneur et de la nature des argiles du sol, de la teneur en matière organique et de la variation de la teneur en eau du sol lors de l'épisode climatique considéré. Une forte capacité d'échange est favorable à la fissuration. En revanche, une forte teneur en matière organique liée limite l'amplitude du gonflement. Le second groupe de facteurs est la répartition dans le sol des variations de volume : plus l'épaisseur de la couche concernée est importante, plus la maille de fissuration est grossière. Ceci permet d'expliquer qu'un régime d'humectation aboutisse à une fissuration plus fine qu'un régime de dessiccation. Il en résulte des éléments structuraux de petite taille. En effet, les gradients hydriques proches de la surface du sol sont souvent plus marqués et concernent une épaisseur de sol plus faible lors d'un épisode pluvieux que lors d'une période de dessèchement (Boiffin *et al.*, 1990).

Les facteurs à l'origine de la fissuration des sols cultivés par gonflement-retrait sont d'ordre climatique (successions pluie-dessèchement ou gel-dégel) et biologique (prélèvement d'eau par les racines des cultures). Le gel peut par ailleurs directement créer des fissures lorsque l'eau présente dans la porosité du sol augmente de

volume en gelant. Il faut enfin signaler qu'en conditions naturelles, l'amorce des fissures s'effectue très souvent au contact des discontinuités induites par les éléments grossiers : graviers, racines, débris organiques. S'il est possible de proposer des classes d'aptitude à la fissuration selon le type de sol, on ne dispose pas de modèle qui soit véritablement opérationnel pour la prévision de la géométrie du réseau de fissures en fonction des conditions pédoclimatiques et culturelles, les modèles disponibles étant trop théoriques et trop difficiles à paramétrer. En revanche, les développements actuels de la géophysique laissent espérer la mise au point de méthodes non destructives qui permettront de décrire la structure tridimensionnelle d'un milieu poreux et son évolution au cours du temps. Ces méthodes devraient permettre de mieux comprendre et de modéliser l'évolution de la fissuration d'un sol *in situ*.

Maîtrise de l'état physique des sols

L'entretien d'un état physique favorable passe d'abord par la limitation des causes de dégradation et, paradoxalement, ne concerne donc pas en premier lieu le travail du sol : la limitation du tassement, particulièrement lors des opérations de récolte, repose sur l'utilisation de pneumatiques adaptés ou sur la programmation des interventions de manière à éviter les périodes de trop forte humidité. La mise en place d'une culture intermédiaire permet également, en asséchant le sol, des travaux ultérieurs en conditions plus favorables. C'est également le cas, mais de manière plus permanente, du drainage.

Très souvent associé à la régénération d'états structuraux dégradés, le travail du sol joue en fait un rôle bien plus complexe dans l'itinéraire technique, et ses conséquences sur la production végétale et l'environnement sont très importantes. Cela explique la vivacité des débats autour de la suppression du labour ou de l'adoption des techniques culturales simplifiées ou sans labour (cf. chapitre 1).

En effet, les opérations de préparation du sol affectent l'ensemble des composantes de l'état du profil (physique, chimique et biologique). De plus, elles ne peuvent, sauf exception, corriger en cours de culture un état défavorable. Les décisions concernant le choix des dates d'intervention, celui des outils ou de leurs règles d'emploi ont donc une importance considérable dans le raisonnement de l'ensemble de l'itinéraire technique et dans la conception de modes de conduite des cultures minimisant l'impact environnemental. Mais le travail du sol présente également un statut à part du fait de la complexité des modifications de l'agrosystème qu'il entraîne (*figure 3.9*). Il modifie la structure des sols cultivés et affecte donc indirectement le fonctionnement du peuplement végétal et, par conséquent, sa capacité à prélever les éléments minéraux lorsque ceux-ci sont encore dans la zone prospectée par les racines. Il modifie également, toujours par le biais de la structure, la plupart des processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans le profil cultural (cycles des éléments minéraux et du carbone, devenir des résidus de culture, transferts d'eau et des substances qui y sont dissoutes). Mais, au rôle indirect du travail du sol sur les processus biophysiques *via* les modifications de la structure qu'il induit, s'ajoute un rôle direct sur les autres composantes de l'état de la parcelle cultivée. La localisation de la matière organique, celle de certains

inoculum pathogène, celle des éléments minéraux et du carbone ou encore celle des graines d'adventices dépendent pour une large part du mode de travail du sol. En particulier, le labour, par l'importance du volume de terre concerné et par l'inversion des horizons qu'il entraîne, est la technique dont l'impact sur ces composantes est le plus important. Bien entendu, le travail du sol n'est pas la seule technique qui entraîne une évolution des caractéristiques des parcelles cultivées mentionnées ci-dessus, mais il intervient en interaction avec la plupart des autres techniques de l'itinéraire, justifiant une approche basée sur l'étude combinée de l'ensemble des techniques (cf. partie 1).

Dans la littérature internationale, les systèmes de travail du sol sont classés en fonction de leur impact sur la localisation des résidus de la culture précédente (Köller, 2003). On oppose ainsi le travail du sol conventionnel (*conventional tillage*), pour lesquelles le taux de recouvrement de la surface du sol par les résidus est inférieur à 15 %, aux techniques dites « de conservation » (*conservation tillage*), pour lesquelles cette proportion est supérieure à 30 %. Cette classification ne recoupe pas exactement celle qui oppose les systèmes de travail du sol conventionnel avec labour aux techniques culturales simplifiées (TCS, maintenant de plus en plus souvent désignées par le terme de « techniques culturales sans labour », voir chapitre 1), même si l'absence de retournement du sol par la charrue entraîne la présence à la surface du sol d'une couche plus ou moins importante de résidus.

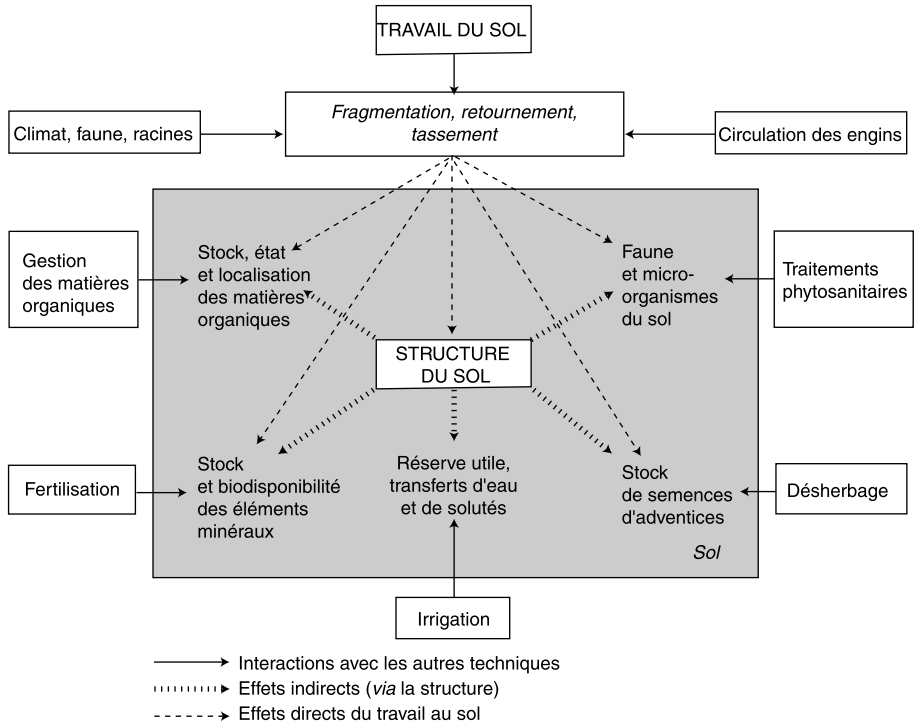


Figure 3.9. Principaux effets du travail du sol sur les caractéristiques des sols cultivés.

La méthode conventionnelle de préparation du sol²⁷ repose sur la réalisation d'au moins deux opérations, choisies dans un ensemble de techniques classées, par ordre de profondeur d'action décroissant, en trois catégories : sous-solage, travail profond et travail superficiel.

Les opérations de sous-solage ont pour but de régénérer la structure des horizons de sol situés sous le fond de labour, qui ne sont pas tous les ans fragmentés par les outils de préparation du sol. Réalisées en général avec un outil à dents droites — une sous-soleuse — lorsque les circonstances l'exigent (comme la présence effective d'un obstacle en profondeur), ces opérations poursuivent deux buts essentiels : améliorer la croissance des racines en profondeur et favoriser le drainage de l'eau en excès. Le terme de « sous-solage » est parfois employé pour « décompactage », mais il est préférable de réserver ce dernier terme aux opérations de travail profond qui ne concernent que la couche de sol située au-dessus du fond de labour.

Les travaux profonds affectent l'ensemble de la couche travaillée sur une épaisseur de quelques dizaines de centimètres. Les objectifs sont multiples : destruction des adventices et des repousses, enfouissement des résidus, des amendements, des engrais de fond ou des résidus de produits phytosanitaires qui pourraient présenter un danger pour la culture suivante, amélioration de l'état structural de l'horizon travaillé lorsque celui-ci a été tassé lors de la culture précédente. Le labour avec une charrue à versoir reste l'opération de travail profond emblématique, caractérisée par un retournement complet de l'horizon travaillé, mais on peut également réaliser un travail profond en utilisant un outil à disques tel qu'une charrue à disques ou un pulvérisateur, dont l'action de retournement est moindre, un outil animé comme une machine à bêcher ou un cultivateur rotatif lourd, ou un outil à dents qui ne retourne pas le sol (décompactage à l'aide d'un cultivateur lourd, d'un décompacteur à dents droites ou obliques). Cette diversité des opérations de travail profond entraîne souvent une confusion de termes, le mot « labour » étant utilisé indifféremment et à tort pour des travaux effectués à l'aide de charrues à versoir, de pulvérisateurs ou de cultivateurs à axe rotatif.

Lors des opérations de travail du sol superficiel, la profondeur d'action des pièces travaillantes est de l'ordre de la quinzaine de centimètres. En travaillant la couche superficielle du sol, on cherche à faciliter l'action d'enfouissement de la charrue et à favoriser l'humification des matières organiques par le déchaumage, et à détruire les adventices et les repousses grâce au déchaumage et au binage. Ces opérations s'avèrent également nécessaires pour diluer d'éventuels résidus ou pour enfouir superficiellement les engrais phosphoriques et potassiques lors de la préparation du lit de semences, là encore par le déchaumage. Mais elles ont pour fonction principale de niveler le sol en pratiquant un roulage, et de créer un état physique du lit de semences favorable à la germination et à la levée des cultures. Il s'agit de niveler le sol pour ne pas entraver le fonctionnement du semoir, particulièrement en culture de printemps où l'on utilise des semoirs de précision. Il faut également favoriser le contact entre la graine et la terre fine, pour que soient correctement assurés les approvisionnements en eau et en oxygène, nécessaires à la germination. Tout

27. On parle également souvent de travail du sol intensif (*intensive tillage*), le caractère intensif désignant ici l'importance du volume de terre travaillé.

obstacle mécanique à la croissance de la plantule et de la jeune racine doit être éliminé. Il s'agit enfin d'éviter une évolution défavorable du lit de semence, durant les premières semaines de culture, comme la création d'une croûte de battance, l'assèchement ou l'érosion. Les objectifs à atteindre sont donc nombreux et, parfois, contradictoires. Ainsi par exemple, le degré d'affinement doit permettre un bon contact entre la terre et la graine et éviter les obstacles de type motte, mais une fragmentation trop importante accélère la vitesse de formation des croûtes de battance en sols limoneux. De même, la porosité du lit de semences doit permettre une bonne circulation de l'air, sans entraîner un risque de dessèchement trop rapide. La décision en matière de choix des objectifs, et donc des outils de travail superficiel et de leur réglages, découle donc de compromis qui sont déterminés en fonction des caractéristiques de l'équipement et du sol, et des exigences de la culture.

Le labour avec une charrue à versoir, par l'importance du volume de terre concerné et par l'inversion des horizons qu'il entraîne, est la technique dont l'impact sur les composantes du milieu cultivé est le plus important. Cette opération est périodiquement remise en cause, souvent dans un souci de lutte contre l'érosion éolienne, mais aussi dans des situations pour lesquelles la conservation de l'eau dans le sol est incompatible avec le dessèchement qu'entraîne le retournement des couches profondes du sol, comme dans les zones semi-arides d'Afrique du Nord. L'abandon du labour peut également découler du manque de temps pour réaliser les travaux de préparation du sol, comme ce fut le cas lors du développement de la culture du blé sans labour derrière une culture de maïs grain en France dans les années 1970. Le mouvement actuel de remise en question du labour obéit à des motivations très diverses (voir le chapitre 1 ainsi que Robert *et al.*, 2004c). Celles-ci sont d'ordre économique — diminution des charges, réduction du temps de travail à l'hectare —, mais s'y ajoutent également des raisons agronomiques — concentration de la matière organique en surface pour augmenter la stabilité structurale, suppression des risques de création d'une semelle de labour, économie d'eau — ou des préoccupations environnementales comme l'amélioration de la résistance à l'incision, la diminution de la vitesse de ruissellement, l'effet positif sur l'activité biologique, sur la biodiversité.

Ceci étant, le labour représente encore, dans de nombreuses régions du monde et tout particulièrement en Europe du Nord, le moyen le plus utilisé pour travailler le sol en profondeur. La charrue à versoir exerce une action qui comprend non seulement la fragmentation des bandes de terre, c'est-à-dire les volumes découpés par le soc et le coutre ou le bord d'attaque du versoir, mais également leur retournement partiel, qui rend le labour particulièrement efficace pour la destruction mécanique des mauvaises herbes ou la répartition dans l'ensemble de la masse de terre travaillée de quantités importantes de matière organique (paille, fumier, couverts d'interculture...). En jouant sur la profondeur et/ou la largeur de travail de la charrue, il est possible d'obtenir plusieurs types de labour : dressé lorsque l'angle que fait la bande avec l'horizontale est élevé, couché dans le cas contraire. Le choix d'un type de labour dépend de l'état du sol que l'on veut obtenir, ou des objectifs que l'on se fixe par rapport à l'enfouissement ou à la circulation de l'eau en excès. Ainsi par exemple, le labour sera dressé si l'on recherche une structure favorisant le

drainage ou si l'on cherche à favoriser au maximum l'action des agents climatiques sur le sol (cas de labours pratiqués avant l'hiver en terres argileuses). On cherchera au contraire à obtenir un labour couché lorsque cette opération est rapidement suivie par la préparation du lit de semences (cas de l'implantation d'une céréale d'hiver par exemple). Les charrues sont le plus souvent équipées d'une rasette, sorte de corps de charrue miniature placé à l'avant du corps principal. Le rôle de cet équipement est d'améliorer l'efficacité d'enfouissement de l'outil. La rasette découpe en effet un petit volume de terre près de la surface qui, lorsque la charrue avance, est projeté en fond de raie avant d'être recouvert par le reste de la bande de terre.

Les systèmes de travail du sol dits « de conservation », mais également les techniques culturales sans labour, regroupent un ensemble très vaste d'opérations culturales techniques dont le seul point commun est de ne pas retourner le sol, ce qui implique systématiquement l'abandon du labour avec une charrue à versoir, mais aussi de toute technique de travail profond ayant un effet d'enfouissement de la matière organique. Un travail profond peut cependant être réalisé à l'aide d'outils fragmentant le sol sur quelques décimètres sans le retourner, afin de laisser la matière organique en surface.

La situation la plus radicale est celle du semis direct (en anglais *direct drilling*, *zero tillage*, *no-tillage*), où le sol n'est travaillé que sur la ligne de semis, par les organes du semoir. Dans certains cas, un travail du sol préalable est pratiqué sur une bande de terre de quelques centimètres de largeur de part et d'autre de la ligne de semis (*ridge tillage*). Mais la préparation du sol peut également comprendre diverses opérations de fragmentation des horizons de surface, réalisées avec des outils à dents ou à disques, animés ou non (*mulch tillage*). On peut également pratiquer des opérations de décompactage sans retournement, à l'aide de décompacteurs à dents droites ou obliques. Si l'intensité du travail du sol désigne le volume de sol concerné, on se retrouve alors dans une situation comparable à celle d'un système conventionnel avec labour (quoique moins consommatrice d'énergie).

Cette diversité des systèmes de travail du sol s'explique par la nécessité de faire face à de nombreux risques agronomiques, dont la maîtrise est rendue plus délicate par la suppression du labour, tout particulièrement lors des premières années du changement : dégradation de la structure après des récoltes en conditions humides, défaut de nivellement de la surface du sol, présence de résidus en surface qui nuisent à la précision des semis et favorisent la prolifération de certains pathogènes, maintien ou augmentation des populations de mauvaises herbes, diminution de l'efficacité de certains herbicides (liée à la présence de quantités importantes de matière organique à la surface du sol et/ou à l'apparition de résistances)...

La plupart des études portant sur les effets du travail du sol sur les composantes de l'état du milieu comparent en général le travail du sol conventionnel avec labour à un traitement sans labour²⁸. L'importance relative des risques évoqués ci-dessus

28. Ce qui, comme le souligne Sebillotte (1978b), pose un problème méthodologique de fond pour l'interprétation des résultats, les états du sol obtenus n'étant pas correctement définis par les termes « labour » ou « non-labour ».

étant très différente selon les types de sol et les systèmes de culture, la relation directe entre semis direct (ou labour) et rendement est rarement stable d'une année à l'autre ou d'un lieu à l'autre (voir aussi partie 1). Même si la décision de retenir ou non le labour doit inclure des éléments d'ordre économique (évolution des temps de travaux, évaluation des économies de carburant...), il est nécessaire, pour raisonner ce choix, d'évaluer les risques pris par rapport à la production et à l'environnement, et de les confronter aux gains attendus, en termes d'évolution de la fertilité du milieu par exemple. Il faut, dans chaque situation, envisager les trois composantes de l'état du milieu cultivé : la composante biologique (évolution des populations d'adventices et autres bioagresseurs, effet sur les auxiliaires et les populations de micro-organismes du sol), la composante chimique (effet sur les cycles du carbone en particulier) et la composante physique (conséquences par rapport au risque érosif, évolution probable de l'état physique des couches travaillées). Dans ce qui précède, les effets du travail du sol sur les composantes chimique et biologique ont été abordés dans les chapitres précédents. Nous n'évoquerons donc dans ce qui suit que l'effet sur la composante physique.

Suppression du labour et évolution de la structure du sol

Les essais de longue durée sur la simplification du travail du sol montrent que les sols non labourés présentent, après quelques années, une porosité structurale plus faible qu'en situation de labour régulier (Guérif, 1991). Cette porosité est essentiellement d'origine climatique et biologique. Ce nouvel état structural du sol, caractérisé par un niveau moyen de la porosité, diffère d'un site à l'autre alors que les systèmes de culture pratiqués sont quasiment identiques, à base de maïs et de blé. Cela étant, l'examen des courbes d'évolution de la porosité structurale révèle des fluctuations entre années autour de ce niveau moyen de porosité : certaines années, la diminution de la porosité est plus forte que son augmentation, du fait de compactages sévères lors des passages d'engins agricoles et/ou lorsque l'intensité de la fissuration est faible. Le phénomène inverse peut également être observé, lorsque le climat permet une régénération importante de la porosité et/ou que les compactages sont peu intenses. On peut penser que cet état d'équilibre apparent de la structure cache également des fluctuations intra-annuelles : un compactage lors d'une récolte par exemple entraîne une baisse brutale de la porosité tandis que l'action de régénération du climat ou de la faune est plus progressive. Ces fluctuations de la porosité sont faibles (de l'ordre de quelques pour-cent), mais elles peuvent avoir des répercussions importantes en termes d'infiltration, entraînant l'apparition d'excès d'eau ou de ruissellements après tassement. Ainsi, malgré une meilleure portance en situation régulièrement non labourée, les conséquences d'un roulage en conditions humides peuvent avoir des effets négatifs importants, équivalents à ceux observés dans les parcelles labourées.

Suppression du labour et érosion hydrique

Les effets de la simplification du travail du sol sur l'érosion hydrique sont multiples, et parfois contradictoires. La couverture du sol par les résidus de culture, l'accumulation de carbone lié dans les premiers centimètres du sol et l'augmentation de la cohésion du sol sont favorables à la lutte contre l'érosion hydrique. Mais la

diminution de la rugosité de surface peut entraîner des risques accrus de ruissellement. Si l'on considère une situation pour laquelle on a atteint un état d'équilibre, soit un non-travail pratiqué depuis plusieurs années en conditions favorables (tassements limités) et avec une protection significative du sol par les résidus de culture, les effets de la simplification sur les risques d'érosion sont généralement bénéfiques. Mais, là encore, on ne peut aborder cette question sans tenir compte de l'existence des fluctuations inter- et intra-annuelles qui sont liées à la succession de cultures différentes sur les parcelles cultivées, et au fait que les variations des conditions climatiques au moment des périodes d'interventions culturelles entraînent des effets variables de celles-ci sur le sol. Certaines cultures telles que pois, betterave, pomme de terre et maïs d'ensilage produisent peu de résidus, et l'effet bénéfique du mulch vis-à-vis de l'impact des gouttes de pluie ou de frein au ruissellement est alors perdu. De mauvaises conditions climatiques, en particulier lors des récoltes — pendant lesquelles les compactages sont les plus intenses —, peuvent entraîner des tassements importants, réduisant fortement l'infiltration de l'eau. Le ruissellement est alors favorisé, accroissant ainsi les risques de formation de ravines dans les parcelles situées en aval. Un décompactage est alors nécessaire. Réalisé en labourant, le bénéfice de l'accumulation du carbone en surface des années précédentes est perdu. D'autres outils qui permettent de fragmenter les horizons travaillés en profondeur sans retourner le sol existent, mais leur efficacité est limitée lorsque l'humidité du sol est élevée.

À la suppression du labour est souvent associé un état physique du sol qui ne pénalise pas les cultures et qui est efficace pour limiter l'érosion hydrique. En pratique, on observe souvent des fluctuations intra- et interannuelles de l'état structural des trente premiers centimètres de la couverture pédologique, qui peuvent limiter l'infiltration de l'eau, voire l'enracinement des cultures. Leur amplitude est à évaluer en fonction du type de sol, du climat et des systèmes de culture (rotation, équipement, dates de semis et de récolte). Prévoir les conséquences de la suppression du labour sur le fonctionnement physique du sol revient donc à prévoir la dynamique d'évolution de la structure du sol en tenant compte des interventions culturelles successives. Par rapport à l'érosion hydrique, cette dynamique doit être analysée en tenant compte de la position de chacune des parcelles constitutives d'un bassin versant (cf. chapitre 10). Enfin, si, d'un point de vue physique, l'agriculteur dispose d'un large choix de modalités de travail du sol dans certaines conditions pédologiques, climatiques et culturelles, il doit aussi tenir compte des autres fonctions du travail du sol : réussite du semis, lutte contre les adventices, les parasites et les ravageurs, et diminution de l'emploi de pesticides.

Conclusion

Jean ROGER-ESTRADE, Jacques CANEILL

L'étude du milieu cultivé, de ses caractéristiques comme des lois de son fonctionnement physique, chimique et biologique s'inscrit dans le cadre d'une double préoccupation : celle d'une définition objective de ses qualités vis-à-vis des usages que l'homme veut en faire, et celle de la conservation ou de l'amélioration de ces qualités par le raisonnement de techniques et d'aménagements adaptés.

La manière dont l'agronome aborde l'étude de ce milieu présente au moins trois spécificités majeures, qui permettent de préciser le cadre de sa contribution à l'élaboration des connaissances sur le milieu cultivé et sa gestion ou son aménagement.

S'il est d'usage de caractériser l'état du milieu par ses trois composantes (physique, chimique et biologique), cette distinction, utile pour l'enseignement et, dans une certaine mesure, la recherche, ne doit pas occulter le rôle majeur que jouent dans son fonctionnement les multiples interactions qui existent entre ces composantes. Ainsi la structure du sol qui conditionne l'évolution de la température, de l'oxygénation et de l'humidité agit-elle sur l'activité biologique du sol et, partant, sur le déroulement des cycles biogéochimiques qui en dépendent. En retour, l'activité biologique agit sur l'évolution de la structure du sol. L'agronomie prend en charge ces interactions, en les replaçant dans le cadre d'une approche systémique du fonctionnement du champ cultivé vu comme un système complexe sur lequel l'agriculteur agit par ses techniques. Dans le contexte de la mise au point de modes de protection intégrée des cultures par exemple, cette exigence est primordiale, l'un des objectifs étant de tirer au mieux parti des régulations qui s'établissent au sein du sol pour minimiser le recours aux produits phytosanitaires. Il faut cependant reconnaître que l'étude des interactions entre composantes n'est, à l'heure actuelle, pas suffisamment développée eu égard aux demandes exprimées à l'agronomie.

L'état du milieu cultivé évolue en permanence sous l'effet du climat, du peuplement végétal et des techniques. L'agriculteur agit sur cette évolution, directement par ses techniques culturales et plus indirectement par le choix des successions de cultures, qui détermine le calendrier d'occupation de la parcelle. L'étude de cette évolution

occupe une place centrale en agronomie, s'articulant autour de la notion de « système de culture », utilisée par les agronomes pour traiter des phénomènes qui s'inscrivent dans la durée (voir la partie 1 de cet ouvrage). Les pas de temps considérés vont du temps court (étude de l'effet d'une technique sur une population de bioagresseurs) au temps long (évolution du stock d'humus). Il est, au moins pour certaines composantes — en particulier celles liées au sol —, possible de définir un état d'équilibre du milieu cultivé et sa capacité à s'écarter puis à revenir à cet équilibre après un événement exceptionnel. Cet équilibre est en général dynamique et il permet, en théorie, de définir un état moyen du milieu cultivé, pour des variables telles que le stock de semences d'adventices, les réserves en phosphore assimilable, l'état structural (Sebillotte, 1978b). Le passage d'un système de culture à un autre se traduit par une rupture de l'équilibre (mais aussi, le plus souvent, de la résilience) du système antérieur, qui évolue alors vers un nouvel état. L'ampleur de cette modification dépend à la fois des facteurs techniques mis en jeu (nature, efficacité et puissance des moyens de culture) et des conditions naturelles (nature du climat, du type de sol) qui déterminent la plus ou moins grande sensibilité du système à ces facteurs. La caractérisation de cet état moyen, la mise au point de modèles permettant de prévoir la dynamique d'évolution de ces variables est un atout majeur de l'agronomie, plaçant cette discipline au cœur des préoccupations actuelles sur la place de l'agriculture dans le développement durable de nos sociétés.

Les variables décrivant l'état du milieu cultivé, qu'elles soient biologiques, chimiques ou physiques, présentent le plus souvent une forte diversité spatiale. La prise en charge de cette variabilité (son analyse, sa modélisation) à l'échelle du champ cultivé est une autre caractéristique majeure des travaux menés par les agronomes s'intéressant aux effets des pratiques culturales sur le milieu ; elle a marqué, entre autres, les travaux portant sur la structure du sol, depuis l'émergence du concept de « profil cultural », dans les années 1960 (Hénin *et al.*, 1969). Mais l'étude des effets des systèmes de culture sur le milieu ne peut plus se contenter de rester à l'échelle parcellaire. Même si des études à ce niveau continuent à être indispensables, il faut envisager des niveaux d'organisation plus vastes (cf. partie 4) qui englobent le champ cultivé : c'est tout particulièrement vrai pour ce qui concerne la dynamique des populations de bioagresseurs, dont les caractéristiques dépendent très souvent des transferts entre parcelles.

En tenant compte de ces trois spécificités, nous proposons quelques perspectives de recherche pour chacune des trois composantes (physique, chimique, biologique) traitées dans cette partie. Ces perspectives sont forcément incomplètes en raison de la rapidité avec laquelle le contexte politique, social et économique de l'agriculture évolue. Il nous semble cependant nécessaire de souligner un point essentiel : la composante biologique de l'état du milieu a trop longtemps été négligée par l'agronomie, au profit des composantes chimique et physique (Doré, 2000). Ainsi, même si l'élaboration de connaissances au service d'une ingénierie écologique concerne aussi l'étude des deux autres composantes, il est clair que c'est à ce niveau que les progrès les plus importants sont à faire.

Concernant la composante chimique, les deux dernières décennies ont été marquées par une forte progression des connaissances sur les relations entre la

dynamique du carbone et celle de l'azote dans les sols et sur leurs interactions avec les peuplements végétaux. *A contrario*, la rareté des données concernant les racines, la difficulté de l'étude du fonctionnement rhizosphérique sont des verrous majeurs de l'amélioration de la prédiction de l'évolution à long terme du carbone dans les sols. En effet, plusieurs études ont suggéré que les apports de matière organique *via* les racines pourraient être beaucoup plus importants que ce qui est généralement admis, et que la nature chimique de ces racines et leur aptitude à se décomposer diffèrent radicalement de celles des parties aériennes des plantes (Rasse *et al.*, 2004). Ces recherches représentent à l'heure actuelle le défi majeur pour améliorer la connaissance des effets à court, à moyen et à long terme des systèmes de culture sur les cycles du carbone et de l'azote dans l'agrosystème. Ces connaissances sont nécessaires à l'établissement d'un bilan environnemental complet des systèmes de culture incluant les effets sur les eaux, le sol et l'atmosphère. Dans le domaine de la fertilisation phosphopotassique, l'analyse de terre par extraction chimique est un outil imparfait d'évaluation de la biodisponibilité des éléments minéraux. Des méthodes alternatives davantage fondées sur une analyse mécaniste du fonctionnement de la rhizosphère sont nécessaires (Schneider *et al.*, 2003). Cependant, les méthodes actuelles d'analyse de terre, malgré leurs imperfections, bénéficient d'un référentiel associé considérable, constitué pour une agriculture conventionnelle intensive. Il est peu probable que ce référentiel soit alimenté par de nouveaux essais. Il risque donc de devenir de moins en moins pertinent dans un contexte de diversification des manières de produire (non-travail du sol, systèmes de culture plus ou moins intensifs, agriculture biologique, etc.). L'élaboration d'un modèle mettant en relation la biodisponibilité des éléments minéraux du sol, leur prélèvement par le système racinaire et la réponse de la culture est la voie actuellement explorée pour produire des références dans un contexte pédoclimatique et technique donné.

Pour la composante physique, les études concernant le tassement et la fragmentation par les outils doivent être menées dans un contexte de diversité des manières de travailler le sol, allant jusqu'à la suppression complète de toute intervention avant le semis de la culture. Ces nouvelles manières de travailler le sol créent de nouvelles conditions d'évolution de la structure et, partant, de nouvelles conditions de fonctionnement biologique du sol. Elles appellent une plus grande exigence par rapport aux risques de tassement, mais demandent aussi qu'une attention accrue soit portée non seulement au fonctionnement des racines, mais également au rôle (qui devient prépondérant avec celui du climat) de la faune sur les états du sol. C'est donc un nouveau regard que les agronomes doivent porter sur le sol, en le considérant désormais comme un écosystème complexe, pour lequel il devient indispensable de mettre au point des indicateurs de fonctionnement et de qualité biologique.

Au regard de la composante biologique, le défi est double : il faut contenir les bioagresseurs par des moyens qui minimisent le recours aux pesticides, tout en préservant la biodiversité dans l'agrosystème. Ainsi les modèles décrivant l'évolution des bioagresseurs sous l'effet des systèmes de culture devront-ils intégrer la dimension plurispécifique des communautés, qu'il s'agisse d'adventices, de champignons pathogènes ou d'insectes, mais aussi de tous les organismes jugés utiles. De plus, il sera nécessaire de prendre en compte la diversité génétique des populations.

Une meilleure évaluation de la nuisibilité est par ailleurs indispensable pour mieux cibler les interventions. Enfin, la question de la durabilité des résistances variétales chez les espèces cultivées devient essentielle pour continuer à développer des méthodes véritablement efficaces. Les démarches de protection intégrée sont maintenant incontournables, elles doivent combiner des méthodes de contrôle génétique, culturale, biologique, physique, voire chimique. L'enjeu est bien de développer nos connaissances sur chacune de ces méthodes, mais surtout sur l'intégration de ces différentes méthodes dans le temps et dans l'espace.

En définitive, comme nous le suggérons plus haut, il est impératif de développer des recherches sur les interactions entre composantes. Le développement de l'agriculture dite « intensive » a été possible en négligeant, pour partie, ces interactions. Le nouveau contexte d'une agriculture économe en intrants de synthèse et en énergies fossiles impose des nouvelles recherches pluridisciplinaires qui intègrent les mécanismes et les décisions au niveau des paysages agraires et dans des durées compatibles avec la gestion des effets cumulatifs des systèmes de culture.

Pour en savoir plus

Le sol : Calvet, 2003a ; Calvet, 2003b ; Girard *et al.*, 2005.

La composante chimique et la fertilisation : Muller *et al.*, 2005 ; Barber, 1995 ; Decroux et Ignazi, 1993 ; Lemaire et Nicolardot, 1997 ; Marschner, 1995.

La composante biologique et la protection des cultures : Collectif, 2002 ; Edwards, 1998 ; Edwards et Lofty, 1977 ; Koul *et al.*, 2004 ; Lavelle et Spain, 2001 ; <http://www.malherbiologie.cirad.fr>.

La composante physique : Chamayou, 2000 ; El Titi, 2003a ; Horn et Van den Akker, 2000 ; Riou *et al.*, 1997 ; Tiercelin, 1998.

Partie 4

Approche agronomique des systèmes techniques pertinents dans les questions d'environnement et de qualité des produits

Marianne LE BAIL, Philippe MARTIN, coordinateurs

Introduction

Marianne LE BAIL, Philippe MARTIN, François PAPY

Comme évoqué dans l'introduction générale de cet ouvrage, une des évolutions importantes de l'agronomie au cours des dernières décennies a consisté en une ouverture vers des systèmes techniques dépassant l'échelle de gestion de la parcelle et de l'exploitation agricole. Cet élargissement des objets d'étude s'explique assez facilement par une nécessité issue du contexte de production. Ainsi, si l'on prend le cas de la France au cours des Trente Glorieuses, les politiques agricoles — conçues pour développer la consommation de masse — ont provoqué une profonde transformation du paysage agricole français. Elles ont encouragé les agriculteurs à adopter rapidement une motorisation et une mécanisation de plus en plus puissantes, des variétés de plantes et des races animales de plus en plus productives, des engrais de synthèse, des matières actives de plus en plus nombreuses contre les différents bioagresseurs, des aliments du bétail..., autant d'innovations techniques qui ont considérablement augmenté la productivité du travail de ceux qui sont restés dans l'agriculture. Pour réaliser des économies d'échelle, les exploitations se sont agrandies et spécialisées ; les systèmes de culture d'espèces annuelles et les systèmes herbagers se sont trouvés déconnectés, la taille des parcelles de culture a considérablement augmenté. Ces changements techniques, s'ils ont permis une formidable envolée de la productivité du travail et de la terre, ont provoqué des dégradations des ressources naturelles que sont l'eau, les sols et l'air, la biodiversité ; ils ont souvent uniformisé les paysages et les produits agricoles tandis que, par ailleurs, ils provoquaient une saturation progressive des marchés.

En même temps qu'elle dispersait dans l'environnement de grandes quantités d'un nombre croissant de substances, l'agriculture cherchant à produire davantage augmentait les flux hydriques, détruisait les structures paysagères ayant un rôle de tampon et de régulation biochimique. On a ainsi pris conscience du rôle que jouaient les haies ou simplement les linéaires enherbés d'interchamp, ainsi que les ripisylves, dans la régulation des flux hydriques et érosifs. On a établi des liens entre fonctionnements biochimiques et préservation de flores et de faunes sauvages auxquelles on reconnaît maintenant une valeur patrimoniale. On a reconnu les fonctions de la prairie sur l'évolution des taux de matière organique, sur l'activité

biologique, sur le régime hydrologique, bref, sur la fertilité. Aussi de nouveaux procédés de culture sont-ils conçus pour réduire les risques de pollution et économiser les ressources non renouvelables. Ils consistent non seulement à limiter l'emploi des intrants sur les parcelles, mais aussi à mettre en jeu des régulations écologiques qui se manifestent, sur des pas de temps plus ou moins longs, entre les parcelles et les aménagements. Ils ne portent plus seulement sur la conduite des seules parcelles culturales avec des pas de temps courts — de l'ordre de l'année, de la succession de cultures —, mais aussi sur la conception raisonnée de la mosaïque paysagère, en prenant en compte simultanément le temps long — d'une à plusieurs décennies. La configuration des parcelles et de leurs limites, la disposition des modes d'occupation du sol en rapport avec la morphologie deviennent des éléments importants des évaluations, des conceptions et des modes de conduite des cultures.

Parallèlement, la saturation progressive des marchés de produits de masse a entraîné des politiques de qualité par segmentation des marchés. Celles-ci se sont traduites par une valorisation marchande de la localisation des procédés de culture et d'élevage. Les appellations d'origine contrôlée (AOC) avaient déjà donné une valeur de spécificité géographique à des produits issus de petits territoires, et le principe en a été généralisé. Mais, au sein même des bassins d'approvisionnement des organismes de collecte, les politiques de qualité portant sur les produits comme sur les services ont conduit à reconsidérer la localisation des cultures : les productions dont les critères de qualité exigent des conditions écologiques particulières ont été relocalisées en fonction des terrains ; les produits dont la qualité dépend de tris ou de mélanges de plusieurs provenances ont été relocalisés en fonction de la situation géographique des dispositifs techniques de traitement de ces produits.

Ainsi l'agronomie ne peut-elle plus se cantonner à l'échelle de la parcelle — comme elle l'a fait pendant la phase historique où l'on demandait à l'agriculture essentiellement de produire —, pas plus qu'elle ne peut se limiter, comme elle l'a fait dans les deux dernières décennies, à l'étude des pratiques des agriculteurs pour concevoir, avec eux, de nouveaux procédés de culture ; elle doit désormais élargir son champ d'investigation aux coordinations techniques entre les acteurs concernés par la qualité dans les filières de productions et par la préservation des ressources naturelles, questions qui font dans cette partie l'objet de deux chapitres distincts. Dans l'un et l'autre cas, cependant, les problèmes diffèrent : il est possible d'accorder à la qualité des produits une valeur marchande, tandis que les ressources naturelles sont des biens publics ; le réseau des acteurs des filières existe de longue date, tandis que les dispositifs sociotechniques de préservation des ressources naturelles sont de création récente, et les réglementations évoluent vite mais tâtonnent. L'un des défis lancés à la recherche agronomique se trouve dans la collaboration entre écologues, agronomes, économistes, sociologues, pour jeter les fondements théoriques de politiques qui permettent de reconnaître à la fois les fonctions productives et les fonctions environnementales de l'agriculture.

Systèmes de culture et territoires : cas des questions environnementales

Philippe MARTIN, Alexandre JOANNON, Catherine MIGNOLET,
Véronique SOUCHÈRE, Claudine THENAIL

► Évolution de la prise en compte des questions environnementales

Une histoire récente liée aux évolutions réglementaires

Les travaux sur les relations entre agronomie et questions environnementales résultent en grande partie des besoins d'accompagnement de politiques publiques destinées à la protection de ressources naturelles. La nécessité pour les agronomes de traiter des questions environnementales a progressivement émergé au fur et à mesure que ces questions évoluaient en débat de société et que le modèle d'agriculture intensive était remis en question (Meynard et Girardin, 1991). En France, on peut dater ce mouvement à la publication du rapport Hénin sur la pollution par les nitrates en 1980. La thématique environnementale s'est ensuite considérablement renforcée dans le courant des années 1990. Dans cette évolution, 1992 est une année charnière car elle correspond à la fois à la convention mondiale pour la biodiversité de Rio¹ — où la notion de « durabilité » est fortement mise en avant avec les questions que posent son application à l'agriculture européenne (Bonny, 1994) —, à la directive européenne Habitats² qui, avec la directive Oiseaux de 1979³, constitue la base de Natura 2000, à la loi sur l'eau⁴ et à la première réforme de la politique agricole commune⁵ initiant les mesures agri-environnementales.

1. Texte de la convention disponible à l'adresse : <http://www.biodiv.org/doc/legal/cbd-fr.pdf>.

2. Directive 92/43/CEE du Conseil du 21/05/1992.

3. Directive 79/409/CEE du Conseil du 02/04/1979.

4. Loi n° 92-3 du 03/01/1992.

5. Règlement (CEE) n° 1765/92 du 30/06/1992.

Au fil des ans, l'origine supranationale des programmes d'amélioration de l'environnement s'est renforcée, mais la nature de ces programmes a aussi évolué. À une logique de directives européennes très sectorielles⁶ conçues dans les années 1970-1980, s'est progressivement substituée, dans le courant des années 1990, une logique de directives dites « horizontales », réglementant de nombreuses activités sensibles du point de vue de l'environnement, que les États membres peuvent appliquer avec une certaine souplesse, en fonction des conditions locales. Cette logique se retrouve dans la directive-cadre Eau⁷ qui emprunte beaucoup aux principes énoncés en France dans la loi sur l'eau de 1992. Le recours aux dispositifs économiques comme la fiscalité ou les aides aux changements techniques a aussi complété les normes et interdictions des premières années. Par ailleurs, la logique de développement durable conduit aussi à développer les partenariats et le partage des responsabilités entre les gouvernements, les entreprises et le grand public. Les dispositifs réglementaires sont de plus en plus souvent complétés par des démarches volontaires émanant de la profession agricole (en France, opérations Ferti-Mieux, Irri-Mieux, réseau Farre...) ou d'autres composantes de la société locale (partenaires d'un contrat de rivière, parcs naturels régionaux, syndicats de bassins versants...) en lien étroit avec l'administration (Deverre, 2005 ; Sebillotte, 1997). Ces dispositifs sont conçus et encadrés par des décideurs (élus, conseillers, administrations...) dont la recherche agronomique se doit d'éclairer les décisions (Capillon, 1992).

L'émergence du spatial

La gestion des ressources écologiques impose de travailler au niveau des espaces pertinents par rapport aux ressources en question (bassin versant d'une rivière, bassin d'alimentation d'une nappe profonde, espaces de vie et de circulations biologiques...). C'est à la fois le type et l'ampleur de la ressource sur laquelle on travaille qui vont fixer les limites de l'espace écologique pertinent. Par exemple, si l'on s'intéresse à la qualité de l'eau d'une nappe souterraine, c'est l'intégralité du bassin d'alimentation de la nappe qu'il faudra considérer ; en revanche, si l'on ne s'intéresse qu'à la qualité de l'eau d'un captage, l'espace écologique pertinent pourra se limiter à court terme au périmètre de protection, beaucoup plus réduit (Benoît et Papy, 1997). Les espaces écologiques pertinents recoupent les espaces décisionnels (souvent discontinus) que sont les territoires d'exploitations qui conditionnent fortement l'évolution des processus écologiques. Il en résulte que les agronomes sont conduits à intégrer dans leurs recherches et leurs raisonnements des éléments de base sur les espaces écologiques pertinents, empruntant en cela à des disciplines voisines (écologie, hydrologie...). Par la même occasion, ils doivent spatialiser les territoires d'exploitation ainsi que les systèmes de culture mis en œuvre, empruntant cette fois les outils des géographes avec un fort recours aux systèmes d'information géographiques (SIG). Si le niveau d'appréhension des phénomènes est l'espace écologique pertinent, la modification des états du milieu

6. L'agriculture est l'un de ces secteurs auquel a par exemple été appliquée la directive Nitrates.

7. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

suivie par l'agronome est réalisée au niveau de la parcelle culturale. Il en résulte qu'on est amené à discuter les effets des systèmes de culture sur les états du milieu au niveau de la parcelle, et à intégrer les conséquences de ces états au niveau de l'espace écologique pertinent (Martin *et al.*, 2004). Par ailleurs, les modifications des pratiques mises en œuvre sur un territoire d'exploitation interfèrent avec celles des autres territoires d'exploitation situés dans le même espace écologique pertinent. Ces interactions doivent pouvoir être décrites à l'aide de modèles spatialisés, puis intégrées dans la recherche de solutions techniques visant à améliorer la situation environnementale.

Un contexte pluriacteur et multidécideur

Les solutions techniques obtenues par les modèles et les experts se heurtent souvent aux contraintes issues du fonctionnement des exploitations agricoles. Face à cela, il importe de s'intéresser non seulement aux marges de manœuvre individuelles des agriculteurs, mais aussi aux marges de manœuvre collectives qui permettent d'orienter le type de solution coordonnée qui pourra être mise en œuvre au niveau de l'espace fonctionnel et non plus à celui d'un seul territoire d'exploitation. Les questions environnementales impliquent de fait de nombreux acteurs (Chia et Barbier, 1999 ; Cartier, 2002) :

- les agriculteurs, qui orientent les mécanismes écologiques par leurs pratiques mais qui se sentent encore souvent peu concernés par les questions environnementales ;
- les gestionnaires « en titre » du fonctionnement écologique, qui souhaiteraient d'éventuelles modifications de pratiques sans avoir ni les possibilités techniques d'action sur le territoire (ce sont les agriculteurs qui « tiennent » le territoire), ni toujours les capacités financières d'infléchir les pratiques agricoles ;
- les financeurs (institutions européennes, programme nationaux, conseils généraux, agences de l'eau ou entreprises privées...) qui cherchent des structures porteuses en mesure d'utiliser au mieux les fonds dont ils disposent ;
- l'État qui, *via* ses services déconcentrés, doit s'assurer que tout se passe selon les lois et règlements en vigueur ;
- les collectivités locales, les associations...

Dans ce contexte il n'y a pas de décideur unique, chaque acteur est porteur d'une part de la décision collective. Il en résulte que, dans une perspective d'action, les outils que doivent développer les agronomes doivent être plus orientés vers la négociation que vers l'aide à la décision. Ceci se traduit notamment par un besoin de « donner à voir » aux différents types d'acteurs la manière dont raisonnent les autres (notamment les agriculteurs) afin d'avancer vers une prise de décision collective plus raisonnée.

Dans les pages qui suivent, nous développerons en deux parties les éléments formulés ci-dessus. Dans un premier temps, des outils d'analyse des relations entre milieu et organisation spatiale des systèmes techniques seront présentés. Nous n'aborderons pas ici de thématique environnementale particulière, le but étant avant tout d'explicitier comment une variabilité de milieu (due au terrain, aux infrastructures...) peut structurer des activités agricoles et, inversement, comment des modifications de systèmes techniques peuvent entraîner des modifications de

milieu. Dans un second temps, l'impact des espaces décisionnels sur les espaces écologiques fonctionnels sera analysé plus finement. Nous aborderons à cette occasion la question de la recherche de solutions devant prendre en compte les relations spatiales entre territoires d'exploitation ainsi que les marges de manœuvre des agriculteurs concernés.

►► Analyse des relations entre territoire d'exploitation et paysage

Le paysage rural

L'espace physique est un espace continu, structuré, sur lequel se produisent des processus écologiques qui établissent une communication de proche en proche en surface (flux d'eau, de graines, flux érosifs, mouvements d'animaux), ainsi qu'en profondeur et dans l'atmosphère (Burel et Baudry, 1999). Les éléments qui composent l'espace physique — chemins, parcelles, haies, bâtis, unités de sol, etc. — sont construits ou largement modelés par les activités humaines. L'évolution de ces éléments et de leur assemblage joue un rôle dans les flux, et donc dans l'évolution et le maintien des ressources naturelles qui en dépendent (Liu et Taylor, 2002). C'est cet espace physique, assemblage d'éléments à quatre dimensions (les trois dimensions spatiales plus la dimension temporelle), structuré par les activités humaines et soutenant des processus écologiques que nous nommerons ici « paysage ». Par ailleurs, le paysage rural est traversé par différents territoires qui sont autant d'espaces définis et délimités par leur usage, leur fonction et leur appropriation par un ou plusieurs acteurs : territoire d'une commune, du périmètre d'un schéma d'aménagement et de gestion des eaux par exemple (Di Méo, 1998 ; Papy, 1999). Le territoire d'une exploitation agricole présente des caractéristiques particulières.

Territoires d'exploitations agricoles et paysage

Le territoire de l'exploitation agricole est un espace approprié, géré par un agriculteur ou un groupement d'agriculteurs (Papy, 1999). Ce territoire est constitué de parcelles mais aussi d'autres types d'éléments qui ont un rôle dans la gestion de l'exploitation et des ressources naturelles (haies, dessertes, mares par exemple), ce qui fait préférer le terme de « territoire » à celui de « parcellaire ». Or, ce territoire est généralement discontinu, alors que les processus écologiques se déroulent sur des espaces continus, et souvent plus vastes. Cette discontinuité est due aux routes, aux cours d'eau, aux bâtis, ainsi qu'à la fragmentation (taille des parcelles) et la dispersion (isolement et éloignement des parcelles) des territoires d'exploitation au sein des paysages ruraux.

La gestion du territoire d'exploitation contribue à celle du paysage et des ressources naturelles associées. Inversement, le territoire d'exploitation dépend aussi, pour partie, du paysage dans lequel il s'inscrit : les décisions pour sa gestion dépendent

d'une configuration parcellaire, des aménagements fonciers, de zones réglementées pour l'utilisation des terres, etc. Dans ce qui suit, ces deux types de relations entre territoire d'exploitation et paysage seront abordés suivant trois niveaux : l'unité de gestion agricole vue comme élément de paysage, le territoire de l'exploitation agricole, enfin le paysage, à des échelles locales et régionales.

Unité de gestion et élément de paysage

La parcelle

L'unité la plus communément considérée en agronomie est celle de la parcelle d'usage — champ (parcelle culturale) ou prairie —, délimitée par la gestion homogène qu'en fait l'agriculteur (Milleville, 1972). Par sa définition, la parcelle d'usage diffère de la parcelle cadastrale cartographiée suivant le découpage foncier, mais elle peut s'y superposer plus ou moins. Elle peut persister en l'état tout au long d'une succession culturale, voire tout au long du cycle de vie d'une exploitation, mais elle peut aussi voir ses limites remaniées d'une année sur l'autre. Cette stabilité variable des limites de la parcelle d'usage dépend de la matérialisation de celles-ci, qui peut aller du talus à la simple limite de labour (Thenail et Baudry, 2004). Sur cette base, l'agriculteur dispose d'une latitude plus ou moins importante et peut exercer différents choix de mise en œuvre de la production. Ainsi, tout ou partie d'un parcellaire d'une exploitation d'*openfield* peut changer d'une année à l'autre, pour ajuster au mieux ce découpage à un assolement qui lui-même varie (Joannon *et al.*, 2005). En situation de pastoralisme, des unités spatiales de gestion, appelées « secteurs », existent aussi pour conduire le troupeau, mais sans plus de limites matérialisées que les différences de végétation et de topographie par exemple (Savini *et al.*, 1993). Dans ce dernier cas, le terme de « granularité de l'utilisation des terres » a été proposé pour désigner la plus petite unité de pâture à laquelle un lot d'animaux est alloué (Girard *et al.*, 2001). Une telle notion pourrait être appliquée à la parcelle travaillée en agriculture de précision, au sein de laquelle on différencie spatialement telle ou telle opération technique en fonction des caractéristiques du sol et de la végétation (Blackmore *et al.*, 2003 ; Yule *et al.*, 1996).

Les exemples précédents montrent que la notion de « parcelle d'usage » recouvre des réalités assez différentes. Ils montrent également que les unités spatiales de gestion agricole ne peuvent être identifiées indépendamment du pas de temps de la gestion (Deffontaines, 1991 ; Thinon, 2005) et de la nature des structures au sol plus ou moins héritées. C'est aussi cela qui rend cette démarche d'identification informative. En effet, la réalisation d'une unité spatiale de gestion contribue au processus d'élaboration de la production. Elle réfère à des fonctions et des pratiques choisies par l'agriculteur dans le cadre d'objectifs ; elle est donc informative pour explorer ce fonctionnement et ses déterminants. On a montré à cet égard que la « potentialité » des terres était une notion relative et qui n'entraînait pas seule en jeu dans la délimitation parcellaire : les questions foncières, d'organisation du travail, de fonctionnement global de l'exploitation interviennent aussi (Deffontaines, 1991 ; Fraser, 2004 ; Morlon, 2005 ; Corry et Nassauer, 2002). De ce fait, les parcelles d'usage chevauchent les unités de milieu physique (sol, hydromorphie, etc.) de façon variable dans l'espace et dans le temps. Ces unités de milieu physique peuvent elles-mêmes évoluer de façon hétérogène sous l'action différenciée dans l'espace des

activités agricoles et des aménagements tels que le drainage. Enfin, les politiques agricoles contribuent à définir de nouvelles unités de gestion aux échelles de la parcelle, par exemple des bandes enherbées conditionnant l'obtention de primes et sujettes à des normes de gestion.

Vers une approche agronomique des éléments du paysage

D'autres éléments que les couverts végétaux des parcelles, tels les bois, les haies et les bordures de champs herbacées, les mares ou les chemins de terre, ont été évalués en écologie comme des éléments semi-naturels essentiels pour le maintien des ressources naturelles (rôles de corridors, d'habitats, de barrières...). Accompagnant l'intensification et la concentration de l'agriculture européenne, la disparition et le changement de gestion de ces éléments semi-naturels ont été stigmatisés (Manhoudt et de Snoo, 2003 ; Robinson et Sutherland, 2002 ; Schmucki *et al.*, 2002). Or, en milieu rural, ces éléments de paysage sont étroitement imbriqués au parcellaire agricole. Cela amène à se poser les questions des conditions de maintien de ces éléments de paysage et, en amont, celles de la nature des relations entre éléments du paysage et activités agricoles.

C'est sans doute la haie puis la bordure de champ qui ont été les éléments les plus étudiés dans ces paysages ruraux. Les premières approches agronomiques ont surtout porté sur les incidences de la haie sur les cultures et les pâtures : effets microclimatiques, sources de nuisibles (Inra *et al.*, 1976 ; Boatman, 1994) ou réduction des dérives de pesticide au-delà de la parcelle (Boatman, 1994). Plus tard, c'est une vision écologique qui a prédominé avec l'évaluation du rôle des bordures de champ, en particulier pour la faune et la flore non cultivée (Le Cœur *et al.*, 2002). Des travaux ont alors porté sur les types de bordure de champ à créer ou à restaurer et sur la conception de techniques appropriées d'entretien (Asteraki *et al.*, 1994 ; Hinsley et Bellamy, 2000). Enfin, un dernier courant de recherche a proposé une vision plus intégrative des champs et des bordures de champ comme l'illustre la *figure 4.1*⁸. La diversité et l'organisation des pratiques agricoles sont reconnues dans la gestion et la dynamique écologique des bordures de champ (Baudry et Jouin, 2003 ; Marshall et Moonen, 2002 ; de Blois *et al.*, 2002 ; Le Cœur *et al.*, 2002). Les intérêts et les inconvénients réciproques entre champ et bordure de champ, entre production et fonctionnements écologiques sont davantage évalués (de Snoo, 1999 ; Smith *et al.*, 1999 ; Theaker *et al.*, 1995 ; Collins *et al.*, 2002).

Une généralisation peut être proposée sous la forme d'une approche agronomique des éléments du paysage. Elle repose sur le principe selon lequel tout élément du paysage peut être en relation avec les activités agricoles, avec un gradient allant de la relation incidente (dérive de pulvérisation par exemple) à la prise en main par une gestion spécifique (taille de branches, débroussaillage, fauche, curage, etc.). Ces éléments du paysage peuvent être hérités et remodelés. Les activités agricoles à prendre en compte dans cette optique sont des activités de production (finalité de réalisation d'un produit consommé ou vendu), mais aussi d'aménagement (installation, arasement ou modification de la structure de l'élément) et d'entretien (finalité de maintien de l'élément dans un certain état). On a montré à cet égard

8. http://www.rennes.inra.fr/sad/pages_sad_armorique/theme_developpement.htm.

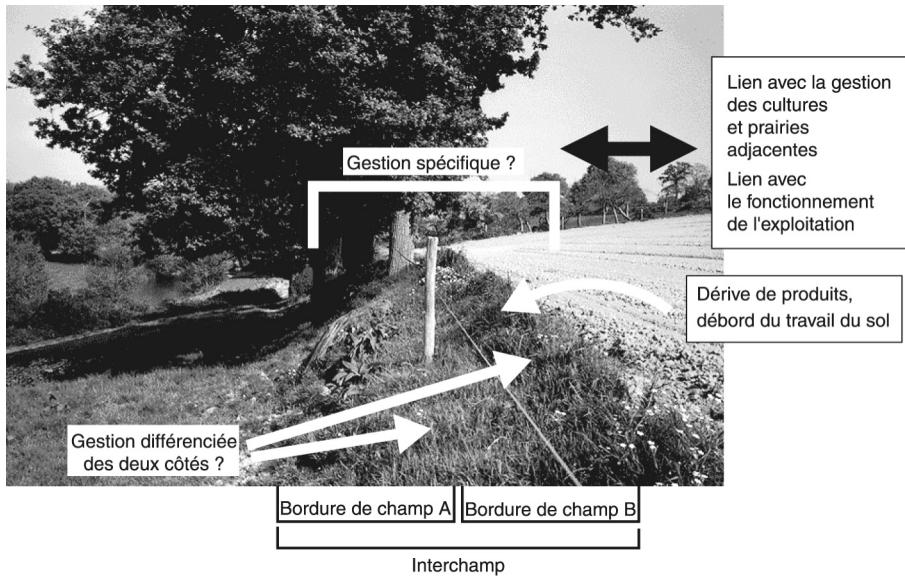


Figure 4.1. Interactions entre champ et bordure de champ en lien avec la gestion des cultures et le fonctionnement de l'exploitation. Photo D. Le Cœur.

qu'aménagement, entretien et production sont à considérer ensemble au cours du temps (Thenail et Baudry, 2001). Par exemple, les dispositifs installés de type clôtures, haies, rigoles, peuvent constituer des outils de production pendant un certain temps, puis des structures héritées éventuellement contraignantes pour la production, enfin être l'objet d'entretien pour de nouvelles fonctions (Bonnemaire *et al.*, 1977). La question de l'intégration plus ou moins forte d'éléments boisés dans l'agriculture participe de cette problématique (Balandier *et al.*, 2002 ; Bayala *et al.*, 2003 ; Maigrot *et al.*, 2004). Cela amène à revisiter la question de l'intégration ou de la ségrégation entre agriculture et nature dans les paysages ruraux.

Gestion technique du territoire de l'exploitation agricole

Le territoire de l'exploitation agricole est d'abord le support de l'activité agricole, et l'agronomie s'intéresse à la façon dont l'agriculteur tire parti de ses atouts et de ses contraintes, dans une optique de développement de l'exploitation (voir chapitre 2). Il est aussi le produit de l'activité agricole : ce territoire présente une organisation spatiale et fonctionnelle des systèmes techniques associés aux parcelles et aux autres éléments qui sont aussi des éléments de paysage. Ce sont les modes d'intégration de cette organisation spatiale que nous allons aborder maintenant.

La notion de gestion territoriale de l'exploitation agricole

L'analyse du raisonnement à l'origine de la constitution de l'assolement et des systèmes de culture d'une exploitation fait l'objet de deux principaux courants de recherche qui n'intègrent pas la composante spatiale de la même façon.

Dans le premier courant, les déterminants privilégiés pour expliquer les choix d'assolement réfèrent au potentiel biophysique du milieu et aux niveaux stratégique

et tactique de décision, qui incluent par exemple l'organisation de la main-d'œuvre et des équipements. Ces travaux aboutissent notamment à la production d'outils de planification de l'utilisation des terres de l'exploitation (*farm land use planning*), qui peuvent être développés sur des supports de type SIG pour faciliter la gestion des données, et surtout le transfert de l'information au moyen d'une cartographie des résultats (Sharifi et Van Keulen, 1994 ; Yule *et al.*, 1996). De cette façon, la composante spatiale intervient dans la représentation des résultats finaux, mais peu ou pas dans la compréhension de la gestion des terres de l'exploitation.

Le second courant de travaux rend compte de façon explicite des caractéristiques spatiales du territoire de l'exploitation comme déterminants et composantes de sa gestion. Il est basé sur le principe de la gestion territoriale de l'exploitation (Gras *et al.*, 1989 ; Morlon et Benoît, 1990 ; Benoît, 1985). On retrouve dans cette approche les niveaux stratégique et tactique de décision de l'activité agricole, mais on recherche ici leur déclinaison à la fois dans le temps et dans l'espace, sur le territoire de l'exploitation : l'espace est structuré par la gestion. Conjointement, on recherche comment les caractéristiques spatiales et structurelles du territoire de l'exploitation jouent sur les décisions de l'agriculteur : l'espace est un déterminant de la gestion. L'un des principes de base de cette approche est de considérer le territoire de l'exploitation comme un système piloté par un (ou plusieurs) décideur(s) : une décision est prise sur une parcelle relativement aux décisions prises sur les autres parcelles. Une telle démarche d'analyse de la gestion territoriale des exploitations repose d'une part sur l'étude des modèles d'action des agriculteurs, d'autre part sur l'analyse statistique des liens entre facteurs déterminants et systèmes techniques alloués aux parcelles et autres éléments du territoire. C'est cette approche de la gestion territoriale de l'exploitation que nous développons ci-après.

L'hétérogénéité du territoire de l'exploitation est un facteur important de choix de localisation des systèmes de culture et des autres systèmes techniques, comme des prairies permanentes destinées à la pâture. Ainsi, ces choix dépendent non seulement des conditions pédoclimatiques, plus ou moins hétérogènes sur l'exploitation, mais aussi de la topologie du territoire de l'exploitation (Auricoste *et al.*, 1985 ; Benoît, 1985 ; Morlon et Benoît, 1990 ; Thenail et Baudry, 2004). Par topologie, on entend la place relative des parcelles les unes par rapport aux autres, et en particulier par rapport au siège et autres bâtiments d'exploitation, la taille et la forme relative de ces parcelles, ainsi que la structure des voies d'accès à ces parcelles. Les équipements et les aménagements pour l'irrigation contribuent aussi à structurer la gestion territoriale de l'exploitation (Bergez *et al.*, 2001 ; Nesme, 2004). L'autre composante essentielle de la gestion territoriale de l'exploitation, complémentaire à la localisation des systèmes techniques, est la circulation au sein du territoire de l'exploitation des animaux, des fourrages (Berthet-Bondet *et al.*, 1986 ; Savini *et al.*, 1993), ou des machines (Morlon, 2005). La *figure 4.2* illustre la gestion territoriale d'une exploitation d'élevage qui vise à maintenir proche de l'exploitation les prairies destinées aux vaches laitières.

Des méthodes ont été développées pour formuler avec l'agriculteur son raisonnement lorsqu'il adapte le choix des systèmes de culture et des fonctions associées aux contraintes spatiales de son exploitation. On a par exemple proposé une grille de lecture des systèmes de culture sous la forme d'un tableau dont l'une des dimensions

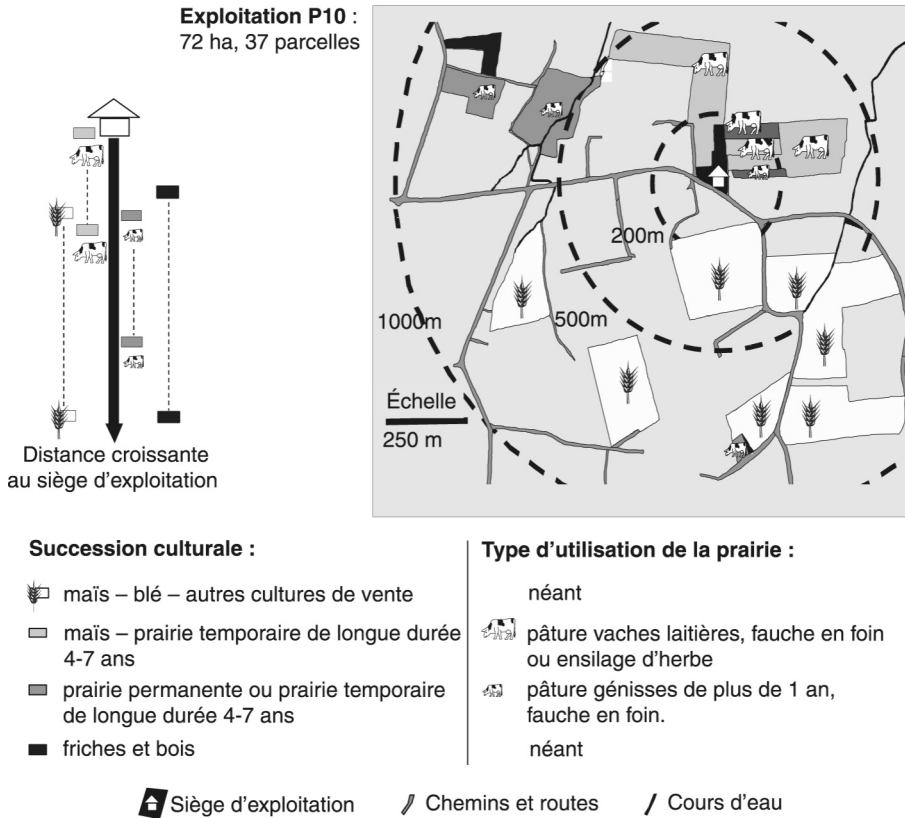


Figure 4.2. Illustration de la notion de gestion territoriale d'exploitation : cas d'une exploitation de polyculture élevage de 72 ha (37 parcelles). Les vaches laitières et les prairies de fauche sont localisées près des bâtiments alors que les génisses et les cultures annuelles sont plus excentrées. D'après Thenail et Baudry, 2004.

est la distance relative des parcelles au(x) bâtiment(s) (Morlon et Benoît, 1990 ; Havet *et al.*, 2004). Une autre grille d'analyse consiste en un planning des opérations techniques reposant sur une cartographie des parcelles pour expliciter les fonctions auxquelles participent ces parcelles (Bellon *et al.*, 1995). En fonction de la topologie du territoire de l'exploitation, l'agriculteur ou l'éleveur compose des sous-ensembles fonctionnels de parcelles proches ou contiguës : blocs de culture (Aubry *et al.*, 1998b, voir aussi chapitre 2), blocs de parcelles affectées à un seul lot d'animaux en saison de pâturage (Josien *et al.*, 1994), ou encore quartiers regroupant des unités, ou secteurs, de pâturage (Savini *et al.*, 1993). L'îlot tel qu'il est utilisé pour la déclaration des surfaces primables des agriculteurs en France (les « déclarations Pac ») est une portion continue de paysage gérée par l'agriculteur, qui cristallise à la fois les stratégies foncières et les stratégies d'utilisation des terres. En effet, on montre que l'agrandissement des surfaces des exploitations se fait en essayant au minimum d'agrandir des îlots par acquisition de parcelles adjacentes et par arasement des limites parcellaires internes. Cela se traduit en zone de bocage par un réseau bocager mieux conservé autour qu'au sein de chaque îlot (Baudry et Jouin, 2003).

Ces approches de description fonctionnelle ont permis l'élaboration de diagnostics de la gestion territoriale de l'exploitation. Des méthodes ont ainsi été développées pour évaluer les marges de manœuvre pour l'épandage des effluents d'élevage selon les contraintes spatiales de l'exploitation agricole (Foissy *et al.*, 2004 ; Le Houérou, 1994). Dans le cadre de politiques agri-environnementales, les prescriptions portent souvent aujourd'hui sur la localisation des pratiques agricoles selon différentes zones. Or des écarts existent entre prescriptions et pratiques effectives, par exemple des différences de localisation de la fertilisation : le diagnostic des contraintes et des modes d'ajustement des agriculteurs aux contraintes de leur territoire permet de comprendre ces écarts (Soulard, 2005).

Les modèles de gestion territoriale de l'exploitation agricole

Par les mécanismes mentionnés ci-dessus, l'agriculteur crée un ensemble de relations à la fois spatiales et fonctionnelles entre les éléments du territoire de l'exploitation. Des approches de modélisation ont été développées pour évaluer l'impact de changements internes (nouvelle organisation, nouveaux systèmes de culture, etc.) ou externes à l'exploitation (action publique, marchés, etc.) sur la gestion territoriale de l'exploitation, et par voie de conséquence sur les conditions techniques de la production agricole et sur l'environnement. On peut distinguer globalement deux types de modélisation.

Le premier cherche à représenter les mécanismes décisionnels qui conduisent à une répartition spécifique des systèmes techniques sur le territoire de l'exploitation. Des modèles logiques et numériques ont été développés pour évaluer, voire optimiser les remembrements (accessibilité, distance et taille des parcelles) par rapport au fonctionnement technico-économique de l'exploitation (Kik, 1990 ; Castro Coelho *et al.*, 2001). Après avoir identifié les contraintes potentielles d'utilisation des parcelles, on évalue les grandeurs associées à ces contraintes et leurs conséquences par le biais du rendement des cultures par exemple. Les développements récents en intelligence artificielle permettent d'introduire des dynamiques dans les raisonnements et dans les interactions entre éléments modélisés. Cela concerne par exemple des systèmes à base de connaissance dans lesquels sont intégrés des modèles de raisonnement d'agriculteur ou de chercheur comme les systèmes multi-agent. Il s'agit de modéliser les raisonnements d'attribution des cultures au territoire en fonction des besoins et des contraintes, y compris d'ordre spatial, exprimés dans les systèmes d'exploitation agricole (Girard *et al.*, 2001 ; Le Ber, 1995 ; Le Ber et Benoît, 1998). On obtient, à l'issue de ces simulations, des cartes ou d'autres formalisations graphiques de la gestion territoriale des exploitations agricoles ou de sous-parties.

Le second type de modélisation cherche à représenter les patrons spatiaux porteurs des règles d'organisation des systèmes techniques. Les travaux de géographie ont particulièrement inspiré le principe des modèles développés dans ce cadre. Nous donnons ici deux étapes ou voies prises en agronomie. La première est la recherche de modèles spatiaux élémentaires. On peut considérer que l'identification et la représentation de sous-ensembles de parcelles ou d'autres éléments du paysage (cf. ci-dessus), qualifiés par leur caractère à la fois spatial et fonctionnel agricole, fait partie de cette approche de modélisation. Une approche plus théorisée

de cette recherche de modèles spatiaux élémentaires repose sur l'adaptation des chorèmes — développés par Brunet (1980) — à la représentation des modules élémentaires du fonctionnement spatial de l'exploitation agricole⁹. Les chorèmes sont des signes graphiques dont chacun représente un mécanisme spatial ou un état spatial élémentaire, tels qu'un gradient, une structure en auréole, une structure en pavage, etc. Il s'agit donc d'élaborer un lexique recensant ces mécanismes ou états élémentaires au sein de l'exploitation agricole. Une telle standardisation doit permettre, par ses qualités de synthèse cognitive, de comparer plus aisément les situations d'exploitations agricoles et leurs changements (Capitaine et Benoît, 2001 ; Naïtlho, 2002). La seconde voie ou étape est celle des modèles spatiaux complexes. Il s'agit ici de donner une représentation du territoire de l'exploitation en fonctionnement vu comme un ensemble de composantes en interactions spatiales et fonctionnelles. Des modèles d'organisation de l'utilisation des terres en fonction de la distance d'un centre fonctionnel à sa périphérie¹⁰ ont été appliqués à l'exploitation agricole, à cause du rôle central du siège d'exploitation. Des combinaisons de chorèmes ont aussi été développés pour représenter le fonctionnement d'un territoire d'exploitation (Capitaine et Benoît, 2001 ; Lardon *et al.*, 2000 ; Houdart *et al.*, 2004). Ces différentes approches sont synthétisées dans le *tableau 4.1*.

Tableau 4.1. Diversité des modèles de gestion territoriale de l'exploitation agricole.

	Mécanismes décisionnels		Patrons spatiaux	
Types de modèle	Logique et numérique	À base de connaissances	Spatial élémentaire	Spatial complexe
Exemples	Évaluation de l'impact lié à la distance d'un bloc de parcelle sur la production, dans le cadre d'un remembrement	Test de raisonnement agricole ou agronomique d'attribution des cultures au territoire	Modélisation à base de chorèmes	Modèle centre-périphérie ; combinatoire de chorèmes

Approche agronomique de l'organisation du paysage par les activités agricoles

Les territoires des exploitations agricoles sont discontinus et ne coïncident généralement pas avec les espaces fonctionnels écologiques. La plupart du temps, on est donc conduit à considérer non pas un seul territoire d'exploitation comme traité ci-dessus, mais un ensemble plus ou moins vaste de territoires d'exploitations. En outre, l'utilisation, la structuration des terres et les fonctionnements écologiques

9. Il s'agit d'une adaptation : les chorèmes et leur combinatoire ont été initialement développés pour représenter un espace géographique local ou régional.

10. Voir le modèle de von Thünen « centre ville-périphérie », décrit par Pinchemel et Pinchemel (1988).

sont dépendants de l'échelle (Burel et Baudry, 1999 ; Veldkamp et Fresco, 1997) : lorsque l'on fait varier l'échelle, le phénomène observé varie, ainsi que les interactions entre les différents phénomènes. Il est de ce fait nécessaire d'identifier les échelles d'espace et les pas de temps appropriés pour traiter de l'interaction entre agriculture et paysage en fonction des phénomènes auxquels on s'intéresse.

Organisation spatiale et organisation territoriale de la mosaïque paysagère

Les systèmes techniques associés aux éléments du paysage forment une mosaïque dynamique et organisée d'éléments et d'états de ces éléments. L'organisation peut être comprise selon deux acceptions :

- dans le cas de l'organisation spatiale (ou topologique), l'analyse porte sur les relations spatiales entre éléments, en postulant que l'agencement des systèmes techniques dans l'espace diffère significativement d'une distribution spatiale aléatoire ;
- pour l'organisation territoriale (Papy et Torre, 2002 ; Di Méo, 1998), l'analyse porte sur les relations fonctionnelles agricoles entre éléments. On postule en effet qu'il existe des relations entre des éléments du paysage — même éloignés les uns des autres — du fait des décisions et de leur rôle dans la gestion territoriale des exploitations. Ces décisions peuvent être le fait d'agriculteurs réalisant des choix individuellement et/ou de façon concertée au sein d'un collectif. Ces relations fonctionnelles influencent l'organisation spatiale de la mosaïque paysagère par une localisation particulière des systèmes techniques, par leur synchronisation sur des lieux différents ou encore par la circulation d'engins, de troupeaux entre ces lieux. C'est pourquoi il est intéressant de considérer l'organisation spatiale et l'organisation territoriale de la mosaïque paysagère en complément l'une de l'autre dans l'analyse.

Les échelles d'analyse de l'organisation paysagère par les activités agricoles

Les échelles locales, jusqu'à quelques dizaines de kilomètres carrés sont celles de l'aménagement et de la gestion portant sur des espaces où le rôle des activités agricoles individuelles est encore fortement perceptible. Les échelles régionales (jusqu'à quelques milliers de kilomètres carrés) sont celles de l'aménagement de régions, de bassins versants de rivières, voire de fleuves, dans lesquels sont localisées plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'exploitations agricoles. À ces dernières échelles, il est le plus souvent impossible de recueillir des informations sur l'organisation territoriale des systèmes techniques agricoles par des observations de terrain et des enquêtes directes en exploitation. Se pose alors la question du type et de la qualité des autres sources d'informations disponibles, ainsi que des méthodes à développer pour mobiliser ces informations à des fins d'analyse des organisations territoriales agricoles.

Organisation territoriale du paysage aux échelles locales

Deux démarches complémentaires sont menées pour étudier ces interactions agriculture-paysage aux échelles locales : une démarche descendante qui consiste à repérer des formes d'organisation spatiale du paysage pour en rechercher ensuite les modes de gestion sous-jacents, et une démarche ascendante qui consiste à analyser la façon dont s'agrègent les modes de gestion territoriale des exploitations au paysage. Même si ces deux démarches peuvent être mises en œuvre indépendamment, on insiste aujourd'hui sur leur complémentarité.

La démarche descendante consiste à caractériser d'abord l'organisation spatiale de la mosaïque paysagère, avec en particulier le repérage d'unités de paysage, c'est-à-dire de zones se différenciant les unes des autres par leur parcellaire, le réseau de haies, l'utilisation des terres, la topographie, le terrain... Il s'agit ensuite d'évaluer le rôle des exploitations dans la composition interne des unités de paysage, pour faire le lien entre l'organisation territoriale et l'organisation spatiale (Benoît, 1985 ; Thinon et Deffontaines, 1999). L'hypothèse sous-jacente est qu'une unité paysagère peut être un objet de gestion effectif et/ou pertinent du fait de son homogénéité interne.

C'est sur cette base que l'on a identifié l'empreinte des systèmes agraires en tant qu'ensemble des éléments en interactions d'une société locale agricole sur le paysage par les terroirs, qui sont des unités de paysage historiquement construites et utilisées de façon complémentaire les unes des autres (Blanc-Pamard et Milleville, 1991 ; Bonnemaire *et al.*, 1977 ; Di Pietro, 2001 ; Sautter, 1993 ; Castella *et al.*, 2004). Tandis que la notion de « terroir » réfère à une dimension historique et pérenne, on utilise davantage la notion de « territoire » pour nommer aujourd'hui les espaces d'appropriation et de gestion qui se développent et évoluent souvent rapidement (Papy et Torre, 2002 ; Castella, 2005). Une telle démarche descendante peut ainsi être conduite pour tester si des zones circonscrites dans le paysage à la faveur de plans d'aménagement (zones de protection de captage par exemple) ou de politiques agri-environnementales (zones d'habitats d'espèces) peuvent être des unités de gestion durables du paysage. Ces zones sont sujettes à prescriptions sur les pratiques agricoles, et l'on peut tester leur adéquation avec la gestion territoriale des exploitations intervenantes, qui peuvent être nombreuses (Benoît *et al.*, 1997 ; Soulard, 2005 ; Thenail *et al.*, 2003). De la même façon, on a évalué comment certaines zones valorisables en agriculture pouvaient s'intégrer de façon durable dans la gestion territoriale et dans la production d'exploitations agricoles (Erout et Castella, 2004).

La démarche ascendante évalue comment l'agrégation des systèmes techniques agricoles contribue à la mosaïque paysagère dans son ensemble, des échelles fines aux échelles locales. Une première étape consiste à échantillonner les exploitations agricoles d'un lieu et à rechercher les facteurs et les règles d'allocation au sein de ces exploitations, susceptibles de jouer sur la mosaïque paysagère (Thenail et Baudry, 2004 ; Thinon *et al.*, 1998 ; Le Ber et Benoît, 1998). L'échantillon doit permettre de mettre en regard les mécanismes humains et les processus écologiques se produisant sur cet espace en continu. C'est pourquoi dans certains travaux, on a même choisi d'étudier par enquête l'ensemble des agriculteurs utilisant au moins une parcelle dans un site d'étude choisi (Baudry *et al.*, 1999 ; Deffontaines et Brossier, 1997). Une seconde étape consiste à évaluer cette contribution au paysage. Une évaluation de la situation réelle peut être faite en couplant l'analyse de la gestion territoriale des exploitations à une mesure de l'agrégation des systèmes de culture dans l'espace à différentes échelles (Baudry, 1993, cité par Burel et Baudry, 1999). Il est plus courant de travailler sur la base de simulations. On peut alors se concentrer sur la seule contribution des exploitations, ou encore sur l'effet de mécanismes élémentaires tels que l'allocation des systèmes de culture selon le seul critère de distance au siège d'exploitation. Par exemple, si les critères de distance des parcelles

aux sièges d'exploitation prédominant, avec des sièges d'exploitation groupés dans le même bourg, comme c'est le cas d'un village lorrain, alors un modèle concentrique des modes d'utilisation des terres peut s'exprimer au niveau du paysage (Le Ber et Benoît, 1998). Au contraire, si ces territoires sont dispersés, ainsi que les sièges d'exploitation, comme dans les hameaux bretons, l'organisation territoriale selon la distance est bien réelle, mais avec une organisation spatiale brouillée, tous les territoires d'exploitations étant entremêlés (Thenail et Baudry, 2004). Pour tester la validité de ces mécanismes élémentaires, on peut utiliser le principe du modèle neutre. Un modèle neutre est un modèle simple qui exclut le mécanisme dont on veut évaluer le poids ; celui-ci est mesuré par l'écart entre les deux résultats, avec ou sans intégration de ce mécanisme (Gardner et O'Neill, 1991). Les logiques d'allocation des systèmes de culture dans les exploitations agricoles sont simulées sur la base de modèles statistiques (Baudry *et al.*, 2003), de modèles multi-agents (Le Ber, 1995 ; Barreteau *et al.*, 2004 ; Benoît *et al.*, 1998), accompagnés de jeux de rôle (Bousquet *et al.*, 2002). Ce peut être la base pour formuler et mettre en œuvre des scénarios portant sur les exploitations agricoles.

Organisation territoriale du paysage aux échelles régionales

Une première approche consiste à entrer par les systèmes d'utilisation des terres. Très étudiée chez les géographes, la description des changements de l'occupation du sol (*land cover*) aux échelles régionales est, par définition, une notion biophysique qui réfère à la couverture des surfaces terrestres. L'utilisation du sol (*land use*) relie son occupation aux activités humaines qui transforment le paysage (Geist et Lambin, 2002). En fonction des échelles spatiales et temporelles investiguées, les changements d'occupation et d'utilisation des sols peuvent être appréhendés avec une résolution spatiale assez fine à partir de données de télédétection comme des photographies aériennes, des images satellitaires, et de données d'origines diverses comme des cartes, des plans, des cadastres, des séries de données statistiques...).

Actuellement, un courant de recherche important vise à concevoir des modèles de changement d'utilisation du territoire à des échelles régionales avec trois objectifs (Veldkamp et Lambin, 2001) : comprendre les dynamiques des systèmes d'utilisation des terres, tester la sensibilité des modes d'utilisation du territoire vis-à-vis d'une modification de certains facteurs jugés explicatifs (modification de la demande en produits agricoles, variabilité du climat...), et évaluer l'impact des changements d'utilisation du territoire sur les processus écologiques. Les travaux développés dans ce courant de recherche présentent des caractéristiques communes :

– l'analyse des déterminants de l'utilisation du territoire est le plus souvent réalisée par des méthodes empiriques, basées par exemple sur des techniques d'analyses statistiques multivariées telles que la régression linéaire multiple. Elles ont pour but de quantifier l'importance relative des facteurs socio-économiques et biogéophysiques et leurs relations à différentes échelles spatiales. Cependant, elles ne permettent pas de garantir les liens de causalité entre ces facteurs et les changements d'utilisation du territoire (de Koning *et al.*, 1999 ; Verburg et Veldkamp, 2001). Les résultats montrent que les facteurs de changement d'utilisation du territoire varient en fonction des échelles où l'on se place : si la topographie et le

potentiel agroclimatique sont des facteurs déterminants aux échelles locales, ce sont plutôt les facteurs climatiques, géomorphologiques mais aussi macro-économiques et démographiques qui interviennent aux échelles régionales ;

- la description des modes d'utilisation du territoire reste le plus souvent assez grossière. Elle peut *a minima* être limitée aux modes d'occupation du sol (terres cultivées, forêts, prairies, zones construites...), ou détailler des grands groupes de cultures (cultures annuelles *versus* cultures permanentes), voire des cultures individualisées (Verburg et Veldkamp, 2001). Les mailles spatiales sur lesquelles sont analysés les changements d'utilisation du territoire sont ainsi caractérisées par des pourcentages de surface occupée par chaque culture ou groupe de cultures une année donnée. Il n'y a donc pas d'identification des systèmes de culture dans lesquels ces cultures sont insérées : les successions de cultures ne sont pas reconstituées, et la transition d'une culture à une autre entre deux années successives est considérée comme un changement, même si cette transition entre dans le cadre agronomique normal d'une rotation culturale ;

- l'analyse des changements d'utilisation du territoire vise non seulement à quantifier ces changements et leur progression, mais aussi de plus en plus à les localiser dans l'espace. La localisation de ces changements est le plus souvent réalisée en fonction de déterminants spatiaux : caractéristiques physiques des paysages (types de sol, topographie), infrastructures telles que les routes, etc. Elle ne prend pas en compte des déterminants liés au fonctionnement des systèmes de production agricoles et à leur dynamique propre, qui sont finalement considérés comme des boîtes noires.

Une autre approche possible consiste à entrer par les systèmes de production et les systèmes de culture. Les approches du changement des systèmes d'utilisation des terres permettent de décrire et de modéliser l'organisation spatiale de la mosaïque paysagère, mais elles ne s'intéressent pas à son organisation territoriale telle que définie précédemment. Cette organisation territoriale est du reste très difficile à appréhender à des échelles régionales, car les logiques de fonctionnement des exploitations agricoles, qui créent des relations fonctionnelles entre unités spatiales de gestion au sein de ces exploitations, ne peuvent pas être directement tirées des sources d'information statistiques disponibles à ces échelles. La prise en compte de ces logiques nécessite la mise au point de méthodes de modélisation et d'indicateurs pour compléter l'étude des modes d'utilisation du territoire dans deux directions :

- replacer ces modes d'utilisation du territoire dans la diversité des systèmes de production agricole présents dans une région donnée, qui sont eux-mêmes inscrits dans des filières de production différentes et adaptés à des milieux naturels et humains contrastés ;

- aller au-delà de l'identification d'un assolement une année donnée, en caractérisant et en localisant les systèmes de culture, c'est-à-dire les successions de cultures et les itinéraires techniques qui leur sont associés, dont les composantes interfèrent de manière importante avec les processus écologiques (Mignolet *et al.*, 2004).

Aux échelles régionales, la description des systèmes de production et des systèmes de culture dépend des caractéristiques des sources d'informations disponibles sur l'agriculture. En France, l'appareil statistique comprend différentes banques de données issues d'enquêtes ou de recensements conduits à l'échelle nationale par le

SCEES¹¹. À titre d'exemples, citons les recensements agricoles (SCEES, 2001), l'enquête Teruti (SCEES, 2002), enfin, l'enquête sur les pratiques culturales (SCEES, 2004). La description des systèmes de production et des systèmes de culture d'une région mobilise des modèles de représentation de leur diversité (modèles typologiques) qui conditionnent la nature des distinctions pouvant être faites entre eux. Concernant les systèmes de production aux échelles régionales qui nous intéressent, ces distinctions peuvent se limiter aux structures d'exploitations (leur taille, les principales productions réalisées, voir SCEES, 1997) ou intégrer certains critères permettant de décrire de grandes catégories de pratiques agricoles caractéristiques de logiques de fonctionnement d'exploitations, comme la nature des successions culturales, le mode d'alimentation des animaux, etc. (Cristofini, 1985 ; Perrot, 1990 ; Capillon, 1993). Les modèles typologiques des systèmes de culture sont à l'heure actuelle beaucoup moins développés (Mari *et al.*, 2002).

Pour analyser la façon dont la diversité des systèmes de production et des systèmes de culture se répartit spatialement au sein d'une région, il est nécessaire de choisir un maillage spatial d'agrégation des informations concernant ces systèmes. Ce choix résulte le plus souvent d'un compromis entre la qualité des données disponibles, la précision spatiale de la maille au regard de la région d'étude et sa signification par rapport aux phénomènes décrits. Aux échelles régionales, les maillages administratifs (cantons, communes) sont souvent privilégiés pour des raisons de disponibilité des informations statistiques et de relative stabilité dans le temps, qui autorisent des comparaisons sur des séries temporelles longues (Reynard, 1995). Ils présentent toutefois des biais pour décrire des répartitions spatiales d'activités agricoles car ils n'ont pas été conçus dans ce but. Le maillage des petites régions agricoles, construit en France au début des années 1950 sur des critères d'homogénéité du milieu physique et des systèmes de production de l'après-guerre (Klatzmann, 1955), est le seul à avoir été spécifiquement destiné à l'analyse spatiale de l'agriculture.

► Impact des espaces décisionnels sur les espaces écologiques pertinents

La connaissance des interrelations entre gestions territoriales et paysages ruraux est une étape essentielle dans l'identification de l'impact des activités agricoles sur les ressources écologiques (cf. pages précédentes). Cette connaissance doit toutefois être doublée d'outils permettant d'estimer l'impact de ces gestions territoriales sur les espaces écologiques pertinents. Dans une courte introduction, nous analyserons la diversité des outils qui existent en ce domaine, en nous questionnant sur leur capacité à traiter correctement des relations entre gestion territoriale d'exploitation et préservation des ressources au sein d'espaces écologiques pertinents. Cette réflexion initiale sera suivie d'exemples illustratifs qui déboucheront sur l'analyse des marges de manœuvre dont disposent les agriculteurs pour améliorer une situation environnementale jugée défavorable sur le territoire agricole.

11. Service central des enquêtes et des études statistiques du ministère en charge de l'agriculture.

Comment relier espaces écologiques fonctionnels et espaces décisionnels ?

Une diversité d'objectifs

Du fait de la complexité des systèmes, le recours à la modélisation est souvent nécessaire pour relier l'activité agricole et les fonctionnements écologiques. Toutefois, du fait que les modèles mécanistes ne sont pas toujours disponibles ou que les données d'entrée sont trop difficiles à obtenir, on est souvent amené à mobiliser des cadres d'analyse génériques qu'un travail d'expertise doit ensuite conduire à adapter localement. C'est ainsi que dans le cadre des opérations Ferti-Mieux en France (Lanquetuit et Sebillotte, 1997), on utilise la grille de classification des parcelles cultivées proposée par Sebillotte et Meynard (1990) (*tableau 4.2*).

Tableau 4.2. Grille de classification des parcelles cultivées selon la variabilité inter-annuelle des potentialités agricoles et les risques de lixiviation de l'azote (d'après Sebillotte et Meynard, 1990).

Variabilité interannuelle des potentialités agricoles	Risques de lixiviation d'azote hors de portée des racines les plus profondes durant un cycle cultural		
	Faibles à nuls	Intermédiaires	Forts à certains
Faibles : besoins en azote assez prévisibles	A	B	C
Fortes : besoins en azote imprévisibles	D	E	F

À l'intérieur de ce tableau, on peut distinguer des situations qui seront de toutes manières dangereuses car les nitrates seront très vite hors de portée des racines (cases C et F) et d'autres qui seront faiblement, voire rarement polluantes, dès lors que les fertilisations seront conformes aux besoins, car les nitrates resteront, en général, dans la zone de colonisation des racines (cases A et D). Les situations B et E correspondent à des situations intermédiaires.

Cette grille peut être adaptée à de multiples contextes de milieux et de systèmes de culture, pour peu que l'on dispose de références ou de jugements d'experts locaux. Dans le même ordre d'idée — sur la thématique de la pollution par les produits phytosanitaires —, le Corpen propose en France une démarche générale d'identification de la circulation de l'eau dans une parcelle agricole qui permet de repérer les risques d'entraînement soit vers les eaux de surface, soit vers les eaux profondes (Corpen, 1999). Lorsque la modélisation est possible, il faut noter que le type de modèle utilisé dépend fortement des objectifs poursuivis. Comme dans d'autres parties de cet ouvrage, on peut distinguer les modèles de recherche qui visent à comprendre comment fonctionne le monde, et des modèles pour l'ingénierie qui visent à résoudre des problèmes pratiques (Passioura, 1996). Toutefois, la frontière entre modèle de recherche et modèle pour l'ingénierie n'est pas étanche. C'est ainsi que le travail de Beaudoin *et al.* (2004) constitue un exemple intéressant d'utilisation d'un modèle de culture — initialement conçu pour la recherche — pour l'évaluation d'une politique environnementale, en l'occurrence la mesure

agri-environnementale française portant sur la réduction d'intrants azotés. Ces auteurs montrent que l'implantation de cultures intermédiaires est plus efficace pour diminuer les risques de pollution nitrique que la réduction de 20 % de la dose d'engrais. Dans ce premier exemple, l'analyse se fait à l'échelle de la parcelle agricole. Steyaert et Papy (1999) proposent d'aller au-delà en plaçant l'évaluation agromique d'une politique environnementale à l'échelle du territoire. Ils proposent entre autres de vérifier que le périmètre d'application d'une politique environnementale est bien celui où l'incitation à modifier les pratiques était la plus justifiée compte tenu de la situation initiale. Une application de ce principe au cas des premières opérations locales agri-environnementales (Olae), qui ont accompagné la réforme de la politique agricole commune en France en 1992, conduit les auteurs à conclure que le périmètre initialement défini pour ces opérations n'était pas pertinent car déconnecté de la réalité de la dynamique agricole¹².

Dans tous les cas, la question se pose de savoir qui utilise les outils d'analyse des relations entre espaces écologiques fonctionnels et espaces décisionnels. Les modèles de conduite de systèmes de culture peuvent être utilisés par les agriculteurs dans un objectif d'aide à la décision (*decision support system*, voir les chapitres 2 et 3). Boote *et al.* (1996) font toutefois remarquer que ces modèles sont encore essentiellement mis en œuvre par des équipes de recherche. Au-delà de l'agriculteur seul « décideur » sur son exploitation, les modèles agronomiques peuvent aussi être mobilisés par des collectifs constitués de différents acteurs agissant à différents niveaux territoriaux, comme les syndicats de bassin versant, les communes, les exploitations agricoles... On est alors plutôt dans une logique d'aide à la concertation telle qu'elle peut être développée dans des jeux de rôle ou dans des systèmes multi-agents (Hervé *et al.*, 2003).

Une diversité d'origine des relations

La définition et l'évaluation de politiques environnementales impliquent que les modèles agronomiques comportent des modules environnementaux pouvant traiter de questions comme le lessivage des nitrates, la dissipation des produits phytosanitaires, ou encore l'érosion des sols. Du point de vue de l'agronome, on peut distinguer deux types de modèles. D'une part les modèles environnementaux, dont le but premier est de traiter de la question environnementale pour laquelle ils ont été conçus : ces modèles sont généralement des modèles conçus par des disciplines voisines de l'agronomie telles que l'hydrologie, l'écologie, la bioclimatologie. La prise en compte de l'activité agricole reste parfois fruste. On dispose d'autre part des modèles de culture qui visaient initialement à rendre compte de la quantité et de la qualité d'une biomasse agricole produite, et pour lesquels on développe des modules permettant de prendre en compte les conséquences des pratiques agricoles sur l'environnement. Pour ces modèles, c'est la prise en compte de la composante spatiale des mécanismes écologiques qui est parfois limitée. L'interdisciplinarité

12. Certains secteurs où la prairie n'était nullement menacée car bien intégrée dans les systèmes techniques et située sur des terres difficilement mécanisables se trouvaient dans le périmètre de l'Olae, alors qu'inversement étaient exclues des zones où la probabilité de disparition à court terme des prairies était très élevée du fait du fort potentiel cultural des terres et de la présence de systèmes de culture dominants à base de maïs irrigué.

aidant, la tendance va vers un rapprochement des deux types de modèles ainsi que vers des couplages de modèles (Faivre *et al.* 2004 ; Martin *et al.*, 2004).

Prise en compte des pratiques agricoles et recueil des informations nécessaires

Il résulte du paragraphe précédent que les modèles rendant compte d'un fonctionnement écologique particulier peuvent intégrer l'activité agricole avec une précision très variable. Dans certains modèles, cette activité est inscrite « en dur » dans le modèle et ne peut pas être modifiée. C'est le cas de certains modèles hydrologiques, qui définissent un espace cultivé par opposition à un espace boisé ou urbanisé sans plus de précisions possibles quant à la nature des cultures, aux interventions culturelles, etc. sur cet espace. C'est notamment le cas de beaucoup de modèles de calibrage de bassin d'orage de type « ingénierie », pour lesquels il est délicat d'intégrer la variabilité agricole sur les pas de temps pour lesquels l'ouvrage est prévu, à savoir une vingtaine d'années. D'autres modèles, au contraire, intègrent jusqu'aux dates et aux conditions d'intervention sur chaque parcelle (sol plus ou moins humide, températures plus ou moins élevées...). On se heurte alors à deux difficultés : la stabilité des relations entre pratiques culturelles et modification des états du milieu, et le recueil des données sur les pratiques culturelles.

En ce qui concerne la stabilité des relations entre pratiques et modifications des états du milieu, on pourra se reporter aux trois parties précédentes. Notons toutefois que les connaissances agronomiques sont parfois insuffisantes pour préciser l'ensemble des conditions conduisant à un résultat donné (Wendroth *et al.*, 2001, et partie 1). Une des solutions consiste alors à associer une variable aléatoire au résultat de la pratique (Makowski *et al.*, 2001b). L'acquisition des données nécessaires pour utiliser le modèle constitue aussi un réel problème (Boote *et al.*, 1996), surtout lorsque la surface considérée est importante. Se pose alors la question d'un accès indirect à l'information *via* des images satellitaires, pour déterminer *a posteriori* des dates de semis et initialiser par là même les modèles de culture utilisés (Guérif et Duke, 1998) ; se pose également le problème du recours à des indicateurs, grâce à des bases de données (Mignolet *et al.* 2004), ou à une simplification du modèle utilisé — rarement envisagée, comme le rappellent Hartkamp *et al.* (1999). Dans le cas des pollutions par les herbicides en zone de vignoble, Biarnès *et al.* (2004) proposent une démarche originale consistant à recouper des informations prises à différents niveaux afin d'affiner l'information sur les pratiques conduites dans une même zone. Au niveau de la parcelle, des images satellitaires permettraient ainsi de repérer de faibles interrangs correspondant le plus souvent à des interventions chimiques, les interventions mécaniques risquant d'endommager la récolte. À l'échelle du territoire d'exploitation, les contraintes majeures d'organisation du travail ou d'équipement permettraient de moduler l'information parcellaire. En dernier lieu, la connaissance du bassin d'approvisionnement de la coopérative viticole dans lequel se trouve la zone concernée peut aussi compléter l'information, dans la mesure où les politiques commerciales et contractuelles orientent les pratiques des agriculteurs. Bellon *et al.* (2001) dans le contexte de l'arboriculture et, dans une optique de diagnostic sur les nitrates et les produits phytosanitaires, proposent d'associer aux pratiques culturelles la manière dont ces pratiques sont raisonnées

par les agriculteurs. Ils distinguent ainsi ceux qui opèrent des apports systématiques de ceux qui modulent les apports en fonction des états du peuplement.

Les questions environnementales et leur représentation dans l'espace

Le couplage de SIG avec des modèles agronomiques constitue une voie intéressante pour traiter des impacts des espaces décisionnels sur les espaces fonctionnels. Actuellement, en agronomie, les SIG sont avant tout utilisés pour discuter de la variabilité intraparcellaire (comme pour l'agriculture de précision), afin d'ajuster les dates et les niveaux de techniques culturales, alors que le recours à l'information spatiale reste encore limité pour de plus petites échelles sur de plus grandes surfaces (White *et al.*, 2002). Au-delà de la question de l'échelle d'utilisation, se pose la question de l'interface entre SIG et modèles agronomiques. Au travers d'une revue bibliographique, Hartkamp *et al.* (1999) distinguent trois situations de communication entre modèles et SIG :

- la relation : on a un SIG et un modèle de culture, avec des interfaces distinctes. Le SIG sert à représenter dans l'espace les sorties du modèle de culture. La base de données du SIG sert à alimenter le modèle pour les différentes entités spatiales. C'est l'utilisateur qui assure la communication entre les deux interfaces ;
- la combinaison : on n'a plus qu'une interface, mais le SIG et le modèle continuent à fonctionner indépendamment, comme pour la relation ;
- l'intégration : c'est l'incorporation d'un modèle dans le fonctionnement d'un SIG, ou d'un SIG dans la structure d'un modèle. À ce niveau, les relations topologiques peuvent être prises en compte dans le fonctionnement du modèle, ce qui n'était pas possible dans les étapes précédentes. Il sera ainsi possible d'intégrer le fait que telle parcelle se situant près d'une autre présentant une forte proportion de plantes transgéniques pourra plus facilement être contaminée.

Dans son travail de thèse portant sur le ruissellement et l'érosion, Joannon (2004) fait un classement du même type en regroupant sous le vocable « spatialisé » les situations de type « relation » ou « combinaison ». En revanche, il distingue deux niveaux d'« intégration ». Le premier est celui des modèles de type « plan-vecteur » dans lesquels, par exemple, une parcelle entière de bassin versant sera considérée comme une entité unique de type « plan », dont l'intégralité du ruissellement produit pourra s'effectuer selon les vecteurs particuliers que constituent les chemins d'eau. Le deuxième cas est celui des modèles dits « spatiaux », pour lesquels la même situation hydrologique sera représentée, sous forme de mailles élémentaires dont le ruissellement s'opère de l'une à l'autre selon les conditions locales de pente et de sens du travail. Potentiellement, les modèles spatiaux sont ceux qui reproduisent le mieux les mécanismes écologiques, mais ce sont aussi les plus difficiles à mettre en œuvre, dans la mesure où les modèles activés dans une maille n'intègrent pas uniquement la composante temporelle, mais aussi l'espace à travers ce qui se passe dans les mailles adjacentes. Il en résulte souvent une simplification du modèle intramaille.

Vers une recherche d'adéquation entre pas de temps et niveau spatial d'analyse

La mise en relation de l'activité agricole et des fonctionnements écologiques nécessite d'intégrer des niveaux spatiaux et des pas de temps qui soient compatibles à la fois avec les fonctionnements écologiques concernés, mais aussi avec le type de question que l'on se pose sur l'activité agricole. On peut affirmer sans trop de risques qu'il y a autant de croisements de niveaux d'étude et de pas de temps que de questions qui se posent (Sebillotte, 1974).

La pollution des eaux d'un captage donne un exemple de ces relations complexes (Benoît et Papy, 1997). Dans un tel cas, il faut tout d'abord identifier le bassin d'alimentation afin de savoir quelles sont les surfaces agricoles à prendre en compte. Partant de ce bassin, il est nécessaire de déterminer s'il existe des circulations préférentielles rendant l'impact de certaines surfaces agricoles sur le captage plus prononcé. C'est ainsi que, pour une nappe de craie en France, la descente des polluants est relativement lente — de l'ordre d'un mètre par an —, ce qui fait que plusieurs années, voire plusieurs décennies sont nécessaires pour que cette pollution atteigne un captage. À l'inverse, cette circulation peut être très rapide à l'aplomb de zones fissurées, où quelques heures peuvent suffire pour contaminer un captage. Quand ces deux types de surfaces existent sur un même bassin d'alimentation, on est donc amené à travailler à la fois sur le court terme pour les surfaces en communication directe (par exemple la date d'épandage des effluents), mais aussi sur le plus long terme pour le reste du bassin (en agissant sur l'effet des successions de cultures mises en œuvre).

Notons que le degré de précision requis pour les pratiques agricoles dépend aussi du niveau d'analyse. Sur de grandes surfaces, les pratiques agricoles ne sont pas forcément les premiers déterminants des phénomènes constatés. Par exemple, le sens de travail du sol ne joue qu'un rôle limité sur la concentration du ruissellement au sein de bassins versants comme celui de la Seine. En revanche, ce sens de travail joue un rôle déterminant à l'échelle d'un bassin versant agricole de quelques centaines d'hectares. Cette donnée illustre à nouveau la dépendance des fonctionnements écologiques à l'égard de l'échelle (Burel et Baudry, 1999 ; Veldkamp et Fresco, 1997). Notons aussi que pour de grandes surfaces, il n'est statistiquement plus possible de distinguer les techniques à l'échelle de la parcelle : on est alors conduit à raisonner en typologies d'exploitations ou de systèmes de culture (voir p. 268).

Impact des espaces décisionnels sur les fonctionnements écologiques

Nous proposons ici deux cas d'étude illustrant la manière dont il est possible d'intégrer l'impact des espaces décisionnels sur des fonctionnements écologiques. L'un porte sur le ruissellement érosif et comporte une forte composante spatiale. L'autre aborde la gestion quantitative de l'eau en tant que ressource rare et se focalise plus sur la dimension temporelle.

Modélisation des relations entre ruissellement érosif et activité agricole

Le ruissellement issu du territoire agricole est à l'origine de coulées de boues pouvant prendre un caractère catastrophique. Il est aussi cause de pollutions de cours d'eau et de nappes profondes du fait des polluants qu'il transporte (Auzet, 1987 ; Martin *et al.*, 2004). Le ruissellement prend sa source sur un espace physique continu bien défini — le bassin versant — qui englobe généralement plusieurs territoires d'exploitations agricoles. De nombreuses études ont montré que les opérations culturales modifient l'état de la surface du sol, les propriétés physiques de l'horizon travaillé et la localisation des motifs linéaires d'origine agricole, tandis que le choix de l'assolement détermine la nature et l'évolution du couvert végétal. Ainsi, dans le cas du ruissellement érosif observé sur les sols limoneux sensibles à la battance du nord-ouest de la France, le ruissellement survient lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration et de rétention des sols. Cette aptitude au ruissellement dépend de l'état de surface du sol qui, après un travail du sol, se dégrade progressivement sous l'action des gouttes de pluie et provoque le développement d'une croûte de battance peu perméable et la réduction de la rugosité de surface. Cette dégradation est régulée par la nature et la densité du couvert végétal, par les taux d'argile, de matière organique et d'humidité du sol (Auzet, 1987). Par ailleurs, dans ces régions au relief modéré, la concentration de l'eau en fond de vallon, à l'origine d'importants phénomènes d'érosion, est déterminée non seulement par la topographie du terrain, mais aussi par la rugosité orientée du sol qui dépend de la forme du parcellaire, des éléments interstitiels comme les haies, les talus, de la présence de traces de roues et du sens du travail du sol. Les pratiques agricoles conditionnent donc fortement à la fois la production et la concentration du ruissellement.

Pour réduire les nuisances associées au ruissellement et à l'érosion des sols, une des stratégies envisageables repose donc sur une meilleure gestion des pratiques agricoles. Cependant, encore faut-il identifier les « bonnes » pratiques et les localiser de façon adéquate au sein des bassins versants. La difficulté réside alors dans la complexité des combinaisons d'états et de structures spatiales possibles, ce qui rend l'expérimentation de tous les cas de figure impossible. C'est pourquoi il apparaît intéressant d'utiliser les ressources offertes par la modélisation.

Ludwig *et al.* (2004) ont ainsi utilisé le modèle « Stream » (Cerdan *et al.*, 2002) pour tester l'influence d'une modification de la répartition des parcelles potentiellement ruisselantes dans l'espace. Stream est un modèle spatial (cf. p. 272) qui intègre l'effet des états de surface sur la production et la concentration du ruissellement dans le bassin versant. Si, dans un bassin versant, il existe une mosaïque d'états de surface, le ruissellement émis par une parcelle ruisselante est susceptible d'être partiellement ou totalement infiltré en traversant une parcelle infiltrante, située en aval de la première. L'intérêt de l'existence d'une mosaïque d'états de surface est donc réel, mais son obtention n'est pas évidente à réaliser. En effet, il arrive fréquemment qu'un agriculteur exploitant plusieurs parcelles contiguës alloue la même culture à toutes les parcelles pour des questions d'organisation du travail. Si plusieurs agriculteurs d'un même bassin versant adoptent le même comportement une année donnée, on peut obtenir des situations à haut risque

érosif. Afin de montrer les conséquences de ce comportement courant, les auteurs ont réalisé deux simulations en utilisant un événement pluvieux de faible intensité, environ $3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (figure 4.3). Les données de terrain utilisées ont été simplifiées afin de ne garder que deux types de parcelles : des parcelles non ruisselantes (récemment travaillées) et des parcelles ruisselantes (semis de blé battus). Dans la première simulation (a), les surfaces ruisselantes sont dispersées alors que dans la deuxième (b), le même pourcentage de surfaces ruisselantes est regroupé artificiellement au centre du bassin versant. Les conséquences de ce regroupement sont

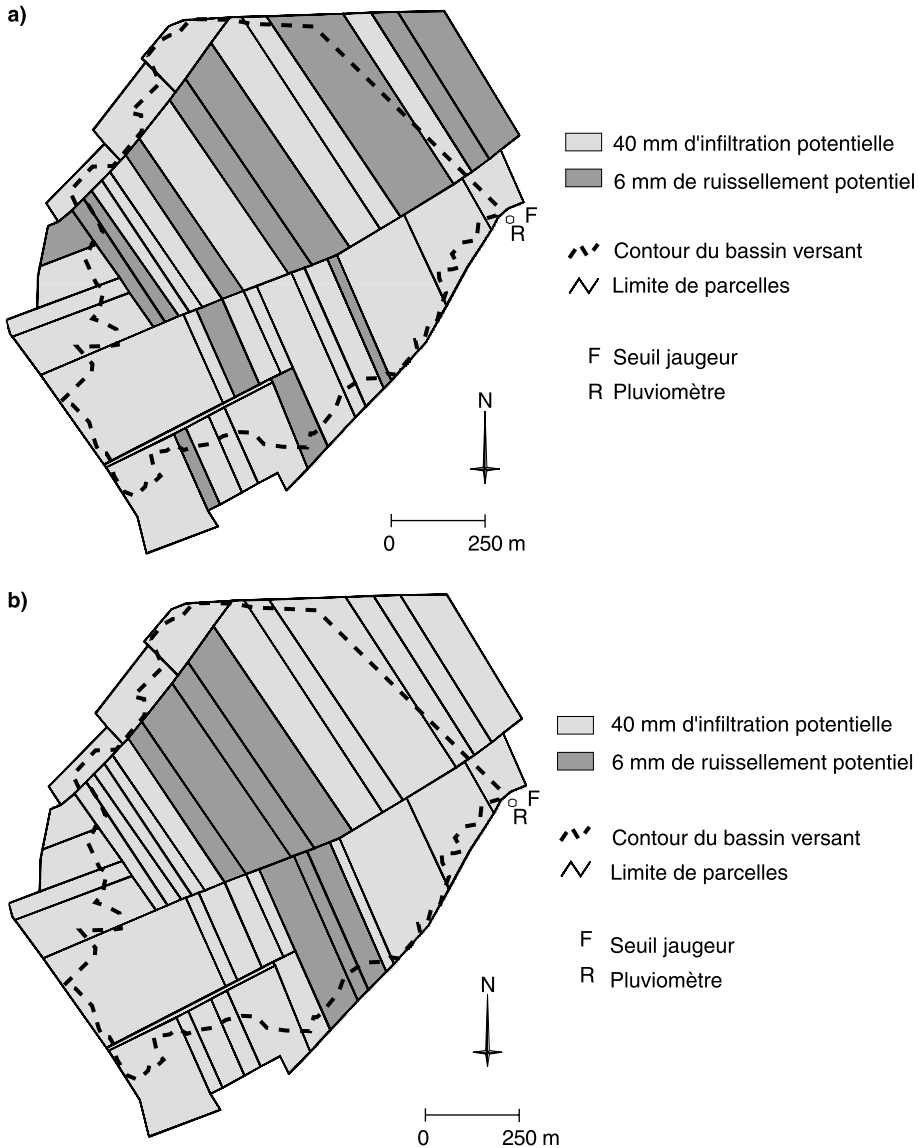


Figure 4.3. Localisation des zones ruisselantes pour chaque simulation. D'après Ludwig *et al.*, 2004.

visibles sur les cartes du volume ruisselé obtenues avec le modèle Stream (figure 4.4). Lorsque les surfaces ruisselantes sont dispersées, le ruissellement émis est progressivement infiltré en traversant des parcelles non ruisselantes (a). En revanche, la disparition des alternances entre parcelles ruisselantes et non ruisselantes entraîne un accroissement du flux de ruissellement à la sortie de l'unique zone ruisselante (b). Ce flux sature rapidement les possibilités d'infiltration des zones non ruisselantes en aval, et le ruissellement cumulé à l'exutoire est alors deux fois plus important qu'avec des surfaces ruisselantes dispersées.

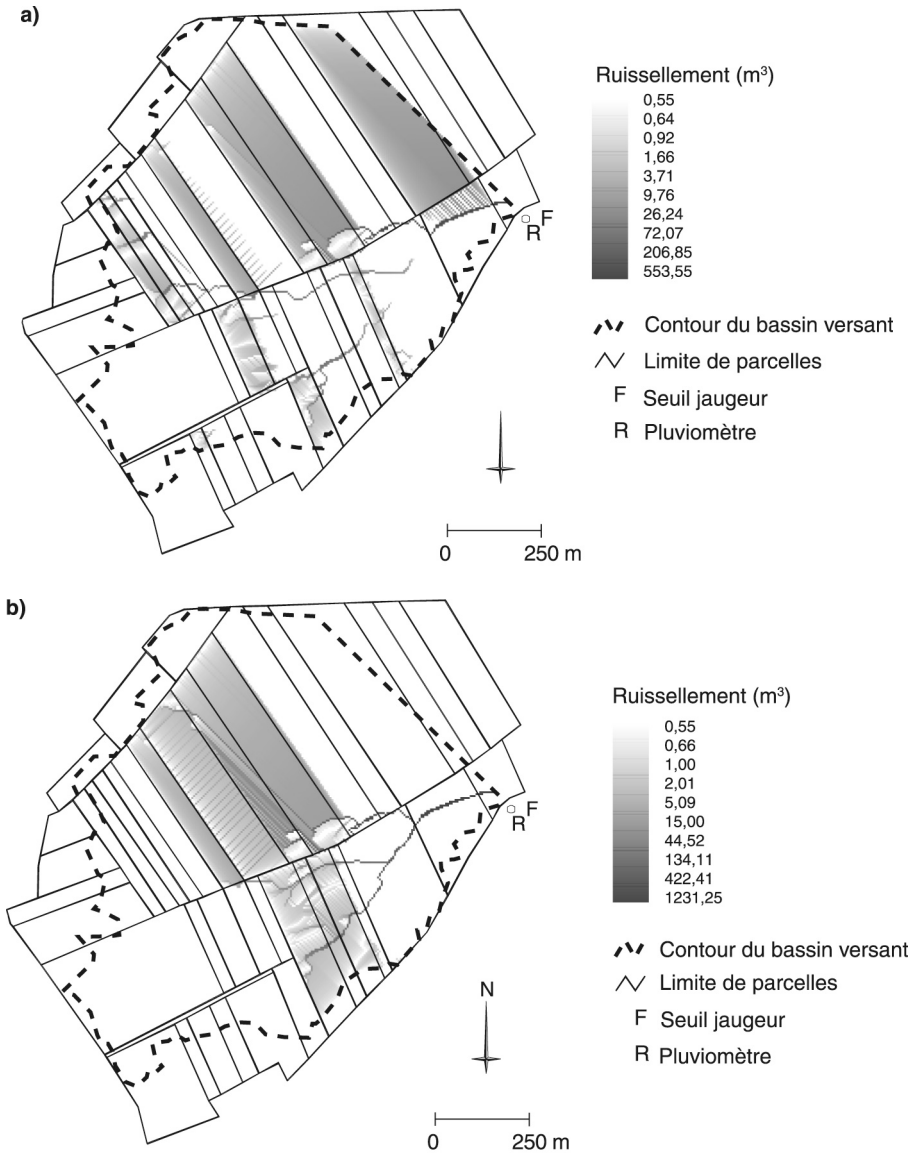


Figure 4.4. Volumes ruisselés en m^3 calculés par Stream pour chaque simulation (événement pluvieux du 13/10/1993 : 36 mm en 14 h sur un sol sec). D'après Ludwig *et al.*, 2004.

Ces simulations montrent l'intérêt des mosaïques d'états, c'est-à-dire d'une diversité des systèmes de culture au sein d'un territoire. Toutefois, la modification concertée de localisation de cultures annuelles n'est pas toujours chose facile. On peut donc avoir intérêt à coupler cette approche avec une réflexion sur l'introduction de cultures pérennes comme les prairies permanentes, qui permettent d'éviter une concertation annuelle. Pour être efficaces, ces mesures doivent être raisonnées spatialement. Souchère *et al.* (2003) ont montré, à partir de simulations réalisées avec des données issues de télédétection, que l'introduction de 1 % de prairie supplémentaire entraînait une réduction plus ou moins efficace du ruissellement à l'exutoire du bassin versant. Une répartition au hasard de ces surfaces entraîne, pour le cas étudié, une diminution de seulement 15 % du ruissellement alors qu'une remise en herbe affectée préférentiellement aux axes majeurs de concentration des écoulements d'eau permettait d'atteindre une réduction de 46 % dans les conditions de la simulation.

C'est sur la base de ce raisonnement qu'en Haute-Normandie, une mesure agri-environnementale basée sur l'enherbement des talwegs a pu être mise en place dans les années 1990.

Impact des espaces décisionnels sur la disponibilité de la ressource en eau

Dans beaucoup de pays, l'accroissement de la production agricole s'est accompagné d'un développement de l'irrigation. Planifier et gérer la ressource en eau est alors devenu primordial afin d'éviter les conflits potentiels entre différents usagers de cette ressource (Cans, 1994). Cette gestion passe par une estimation précise de la demande en eau par le secteur agricole compte tenu des quantités d'eau importantes qu'il consomme lors des périodes estivales. Certaines régions comme le sud de la France étant faiblement pourvues en réserves souterraines, ce sont essentiellement les eaux de surface qui sont mobilisées. Cette mobilisation conduit souvent à la mise en place d'aménagements hydrauliques parfois très complexes. Le réseau du canal de la Neste, géré par la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG), est un exemple type de réseau complexe. Un ensemble de réservoirs permet de stocker en hiver des volumes vidangés en été dans les rivières gasconnes où ils permettent d'assurer les besoins en eau d'irrigation tout en maintenant un débit d'étiage suffisant. C'est la CACG qui doit décider de l'ouverture et de la fermeture des vannes ainsi que de la révision des quantités d'eau affectées aux agriculteurs compte tenu des besoins estimés restants et des réserves instantanées.

Leenhardt *et al.* (2004a) ont développé un outil (Adeaumis) pour aider la CACG à améliorer la prévision de la demande en eau d'irrigation. En effet, le modèle utilisé jusqu'alors par la CACG fonctionnait correctement en cas d'année climatique moyenne, mais a été pris en défaut en 1998 en fournissant une mauvaise estimation de la position dans le temps du pic de demande en eau d'irrigation, ce qui a conduit la CACG à effectuer un déstockage trop précoce de l'eau des barrages. Lorsque le pic réel d'irrigation est arrivé, l'eau des barrages n'était plus suffisante pour satisfaire pleinement l'ensemble des usages (irrigation, alimentation en eau potable, salubrité et soutien d'étiage des rivières). Cette mauvaise estimation était due au modèle de bilan hydrique inclus dans le modèle de gestion stratégique de la CACG.

En effet, dans ce modèle de bilan hydrique, la plante est représentée par des coefficients culturaux décennaires invariants quelle que soit l'année. Ce modèle ne permet donc une prise en compte ni des dates de semis effectives, ni des caractéristiques climatiques de l'année en cours, d'où des risques de mauvais positionnement du cycle cultural et de mauvaise estimation du pic de demande en eau d'irrigation.

En développant Adeaumis, les auteurs ont donc cherché à tirer profit des outils modernes (modèles agronomiques, télédétection, SIG) pour améliorer la prévision de la demande en eau d'irrigation en optimisant, en cours de campagne, le volume final d'eau à déstocker des barrages. Adeaumis intègre donc un modèle biodécisionnel basé sur une approche couplée du développement de la culture du maïs et des décisions d'irrigation des agriculteurs. À un pas de temps quotidien, la base de données combinée sous un SIG¹³ fournit les données d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle bio-décisionnel. Le modèle de culture du maïs utilise les températures journalières minimales et maximales et les dates de semis pour fournir une estimation de l'état de développement de la culture. En fonction de cette estimation, des stratégies d'irrigation des agriculteurs et des conditions climatiques (pluviométrie et évapotranspiration), le modèle de décision détermine s'il y aura ou non irrigation des cultures et estime alors les besoins en eau liés à l'irrigation. Le gestionnaire peut alors gérer l'eau des barrages en conséquence. Après une phase de test sur des années passées (1998 et 2000), le modèle a été utilisé avec succès en grandeur réelle par la CACG en 2003, année exceptionnellement chaude et sèche pour laquelle l'ancien modèle de la CACG était inadapté. Les résultats d'Adeaumis ont permis de voir, dès le début du mois de juillet 2003, que la saison était « en avance » de quinze jours, et que l'on se trouvait dans une situation pire que celle d'une année décennale sèche telle que définie jusqu'à présent par la CACG. Adeaumis a alors permis, en cours de campagne, en évaluant les conséquences de divers scénarios sur la consommation en eau future, de guider la réflexion et la prise de décision du gestionnaire en matière de réduction des quotas d'eau pour satisfaire au mieux les besoins des différents usagés de l'eau (Leenhardt *et al.*, 2004b).

Outils d'aide à la formulation de solutions

Place des solutions techniques dans les systèmes de régulation

Nous avons vu, à partir des exemples précédents, comment peut être caractérisé l'impact des gestions territoriales agricoles sur les fonctionnements écologiques. Nous avons aussi montré l'intérêt environnemental de certaines modifications de pratiques. La question qui se pose alors est de savoir quelles sont les possibilités effectives de mise en œuvre de ces modifications. Ces possibilités dépendent des efforts que les différentes entités concernées consentent au sein des dispositifs de régulation préexistants. Dans le cas du réseau de la Neste évoqué ci-dessus, la régulation environnementale est facilitée par l'existence d'un gestionnaire en titre de la ressource, la CACG, qui détient la « clé des vannes » et organise les réunions

13. On entend par « combiné » le fait qu'il n'y a pas prise en compte des relations topologiques au sein du SIG (cf. p. 272).

de concertation entre acteurs. En revanche, pour le ruissellement érosif, la régulation est bien moins poussée car il n'y a pas de gestionnaire centralisé, et donc pas de réel coordinateur. Les agriculteurs sont *a priori* libres de leurs décisions, alors même que les simulations présentées plus haut montrent que la somme de ces décisions individuelles peut avoir des conséquences importantes à l'échelle d'un bassin versant. Conscients de ces insuffisances, il arrive que les pouvoirs publics mettent en place de nouvelles structures permettant des amorces de coordination. C'est ainsi que, sous l'impulsion de la préfecture de région, le territoire de la Seine-Maritime a été découpé en syndicats mixtes de bassins versants qui financent des animateurs agricoles de bassin versant, afin d'aider à la modification des pratiques agricoles et de réduire le ruissellement érosif. En ce cas, les leviers d'action sont des aides économiques permettant de compenser la baisse de revenu des agriculteurs associée à l'adoption de pratiques environnementales¹⁴ (Bontemps et Rotillon, 1998). Un appui technique pour un changement volontaire, non indemnisé, de pratiques de la part des agriculteurs constitue un autre levier d'action.

La réglementation, qui reste un moteur fort de la régulation — et qui est parfois le seul — tend de plus en plus à être associée à des dispositifs économiques (cf. p. 254). La politique agricole commune issue du sommet de Luxembourg en 2003 en Europe est un bon exemple de ce mouvement, puisqu'elle conditionne l'obtention des aides économiques européennes au respect de la réglementation environnementale (loi sur l'eau, directive Nitrates), ainsi qu'à la mise en œuvre de critères environnementaux non obligatoires au regard de la loi (notamment en ce qui concerne le maintien des prairies permanentes). Notons que dans tous les cas, les décisions d'origine européenne ou nationale comportent des parts d'adaptation locales pour lesquelles des modèles intégrant l'effet des pratiques agricoles deviennent de plus en plus nécessaires dans la mesure où l'effet d'une pratique dépend du milieu dans lequel elle est mise en œuvre (cf. partie 1). Papy *et al.* (1996) ont ainsi montré que l'accroissement des surfaces de blé limitait les risques de ruissellement érosif dans le Lauragais alors qu'il les augmentait en Haute-Normandie.

Les marges de manœuvre des agriculteurs

Après cet aperçu des types de régulations environnementales entre acteurs agricoles et non agricoles, nous allons maintenant focaliser notre approche sur les possibilités effectives de mettre en œuvre des solutions techniques sur des territoires d'exploitation. Dans les cas où l'on exclut *a priori* toute nouvelle incitation économique ou toute nouvelle contrainte réglementaire, on se concentre sur les marges de manœuvre dont disposent les agriculteurs pour modifier leurs pratiques, sous l'hypothèse que la fonction de production des exploitations ne soit pas affectée (Papy *et al.*, 1996). Par « marge de manœuvre » — que nous pouvons qualifier d'agricoles —, nous entendons la capacité de mise en œuvre de modifications des pratiques compatibles avec la disponibilité des facteurs de production de l'exploitation, cette disponibilité étant évaluée à partir des règles d'utilisation que se fixent les agriculteurs (Martin, 2000 ; Papy, 2001b ; Joannon, 2004). Les facteurs de

14. D'autres dispositifs économiques tels que les taxes ou l'instauration de « droits à polluer » seraient possibles mais restent techniquement difficiles à mettre en œuvre et d'une acceptabilité sociale limitée.

production sont d'une part le territoire de l'exploitation qui va être déterminant des choix des cultures, de la succession dans le temps des cultures et de leur localisation dans l'espace, et d'autre part la main-d'œuvre et le matériel¹⁵ : ceci va déterminer le temps qui sera consacré aux différentes productions de l'exploitation, et donc le temps restant disponible pour réaliser d'autres travaux (cf. chapitre 2 pour l'organisation du travail dans les systèmes de culture, et pp. 259-263 pour la gestion territoriale de l'exploitation). C'est ainsi qu'en grande culture, les marges de manœuvre peuvent porter sur trois niveaux : la modification des techniques culturales mises en œuvre à la parcelle, la modification des successions de culture et des assolement associés, et la mobilisation d'équipement et/ou de main-d'œuvre supplémentaire.

Si les contraintes techniques internes au fonctionnement de l'exploitation ont été étudiées, notamment en ce qui concerne les contraintes d'organisation du travail (Papy *et al.*, 1988 ; Dedieu *et al.*, 1999), elles sont peu prises en compte lors de la proposition de modification des pratiques agricoles pour limiter un problème environnemental (Joannon, 2004 ; Nesme, 2004). Si nous revenons au cas de l'érosion, ce sont les contraintes agronomiques (perte de rendement) et socio-économiques (diminution de la marge brute, perception des solutions par les agriculteurs) qui sont principalement évaluées lorsque des modifications d'itinéraire technique sont proposées (Kwaad *et al.*, 1998 ; Schuler et Kächele, 2003 ; Cramb et Nelson, 1998 ; Turkelboom et Trébuil, 1998).

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons deux exemples d'analyse des marges de manœuvre des agriculteurs pour modifier leurs pratiques, l'un à l'échelle régionale, l'autre à l'échelle locale d'un bassin versant. Le premier porte sur les facteurs de production « matériel » et « main-d'œuvre » déterminant la possibilité de modifier les itinéraires techniques, le second sur le facteur de production « terre », qui concerne les possibilités de modifier la localisation des cultures sur le territoire de l'exploitation agricole.

Réduction de la pollution de l'eau par les nitrates dans les Alpes du Nord (Caneill et Capillon, 1990)

Dans les régions de montagne, la gestion des effluents d'élevages laitiers peut dans certains cas poser des problèmes importants. D'une part, la période de stabulation est longue du fait de la durée de l'hiver, ce qui induit des quantités importantes de déjections à stocker. D'autre part, les contraintes d'épandage sont fortes, notamment en raison de l'intensité des pentes qui limite l'étendue des surfaces épanchables. Il en découle une pollution azotée de l'eau, en particulier par un rejet direct des lisiers dans la nature, qui atteignent rapidement les rivières. Une étude a été conduite en France dans les vallées de la Maurienne et de la Tarentaise pour évaluer les possibilités de réduction des pollutions, compatibles avec le fonctionnement des exploitations agricoles (Caneill et Capillon, 1988).

L'étude a consisté à enquêter dans cinquante-six exploitations afin d'en cerner le fonctionnement global, les pratiques de gestion des effluents d'élevage et les

15. Au sens large, incluant à la fois les outils agricoles pour les opérations culturales et les infrastructures telles que la salle de traite, les bâtiments d'élevage, etc.

possibilités de modification. Concernant les obstacles à une bonne utilisation des déjections animales, il est ressorti que les caractéristiques du territoire d'exploitation n'étaient pas l'obstacle le plus contraignant. En effet, entre 12 et 45 % des déjections sont perdues, c'est-à-dire ni épandues par l'agriculteur, ni données ou vendues, alors que 60 % des exploitations utilisent moins de 50 % de leur surface potentiellement épandable. La totalité des déjections n'est pas épandue en raison de trois contraintes principales :

- la majorité des déjections sont sous forme de lisier sec se décomposant lentement : les agriculteurs ne l'épandent pas avant le pâturage au printemps ;
- les périodes de transition pour le troupeau laitier au printemps et à l'automne correspondent aux périodes d'épandage ; sauf cas particulier, la disponibilité en main-d'œuvre est faible à cette période pour les épandages, du fait de la surcharge en travail liée à l'élevage, surtout dans les exploitations où l'épandage des déjections est majoritairement manuel ;
- la taille réduite des fosses et des plates-formes oblige certains agriculteurs à se débarrasser des déjections en hiver, période à laquelle il est impossible de les épandre en raison de la couverture de neige.

Nous voyons ainsi qu'étant données les contraintes liées au pâturage de printemps et à la disponibilité de l'ensemble « main-d'œuvre et matériel », les marges de manœuvre pour épandre des quantités plus importantes de déjections sont quasiment nulles. Les améliorations de l'épandage des déjections passent obligatoirement par :

- une modification des infrastructures et du matériel : augmentation des capacités de stockage afin de réduire les déstockages hivernaux des déjections ;
- un passage à du lisier mou dont l'épandage au printemps sur prairie ne pose pas de problème ;
- l'achat de matériel en commun pour les petites exploitations afin de mécaniser l'épandage des déjections.

Notons que, dans les années qui ont suivi cette étude, un programme d'aide aux agriculteurs a été mis en œuvre en France dans le but d'aider à la maîtrise des pollutions liées aux effluents d'élevage. Il s'agit du programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole (PMPOA) initié en 1994. Ce programme vise effectivement à une amélioration des conditions matérielles de stockage et d'épandage des effluents d'élevage (voir le « niveau 3 » p. 300). Cependant, il s'appuyait sur une logique de structure d'exploitation. Ce sont donc les exploitations de grande taille (considérées comme les plus polluantes) qui ont été concernées prioritairement, il a donc eu peu d'effet dans les zones de montagne où prédominent les petits élevages. Depuis 2002 un second programme a été initié, le programme de maîtrise des pollutions liées aux effluents d'élevage (PMPLÉE). Il donne priorité aux territoires présentant des niveaux de pollutions importants indépendamment de la taille des exploitations présentes. Il permet donc plus facilement de traiter les problèmes réels en zone de montagne.

Maîtrise des coulées boueuses dans le pays de Caux

Nous avons mentionné ci-dessus qu'une possibilité de réduire les nuisances dues au ruissellement et à l'érosion, dans les régions du nord-ouest de l'Europe, était de

créer au sein du bassin versant une mosaïque de surfaces potentiellement infiltrantes et de surfaces potentiellement ruisselantes. En effet, le ruissellement produit sur certaines parcelles est alors infiltré par d'autres parcelles intercalées (on agit ici au « niveau 2 » évoqué p. 299). Cependant, si l'on souhaite ne pas affecter la fonction de production des exploitations, créer une telle mosaïque au sein du bassin versant suppose au préalable de comprendre comment les cultures sont localisées au sein des territoires d'exploitations. Les agriculteurs mobilisent certaines règles pour affecter les cultures aux parcelles, ces règles fixant pour chaque culture la zone cultivable, le délai de retour, les précédents possibles et la taille de la sole (cf. chapitre 2). L'analyse de ces règles permet alors d'en déduire les marges de manœuvre pour modifier cette affectation au sein des exploitations, c'est-à-dire modifier la localisation des cultures sans changer les règles ni les cultures, ceci pour créer une mosaïque au sein du bassin versant (Joannon, 2004).

Une étude a été conduite à cette fin sur un bassin versant en France dans le pays de Caux, auprès de quatorze agriculteurs exploitant 90 % des terres labourables d'un bassin versant d'environ 1 000 ha. Des enquêtes ont été menées au sein de ces exploitations afin de reconstituer les règles de localisation des cultures. De l'analyse de ces règles, il est ressorti que différentes successions culturales étaient mises en œuvre par les agriculteurs, mais que la majorité résultait de la combinaison de deux motifs élémentaires : l'un basé sur du blé une fois tous les trois ans, et l'autre sur du blé une fois tous les deux ans. Ces motifs sont combinés dans le temps de manière à ce que les délais de retour soient respectés, et les successions culturales ainsi obtenues sont réparties sur le territoire de l'exploitation en tenant compte des zones cultivables. *In fine*, en fonction des cultures présentes dans l'assolement, des contraintes de zones cultivables et des règles de délai de retour et de précédents culturaux que s'accorde l'agriculteur, les possibilités de modifier la localisation des cultures une année donnée sont plus ou moins grandes. Le choix final des cultures implantées sur chacune des parcelles d'une exploitation dépendra aussi de l'assolement, l'agriculteur devant respecter la surface totale qu'il s'est fixée pour chacune des cultures. Notons enfin que si, d'un point de vue strictement agronomique, il peut exister des marges de manœuvre quant à la localisation des cultures sur le territoire d'exploitation, certains agriculteurs mettent en œuvre des règles plus strictes qui peuvent aboutir à des successions culturales fixes. Cela présente pour l'agriculteur l'avantage de stabiliser l'assolement d'une année sur l'autre, mais ne laisse aucune possibilité de modifier la localisation des cultures une année donnée.

Pour une campagne culturale, différentes organisations spatiales des cultures dans le bassin versant ont été explorées en utilisant les marges de manœuvre mises en évidence, ceci dans le but de réduire le ruissellement à l'exutoire du bassin versant. Par une simulation des règles spécifiques à chacune des exploitations, il s'est avéré qu'un quart des terres labourables avait différentes occupations du sol envisageables (successions culturales non intégralement fixées). Plusieurs configurations du bassin versant sont alors possibles. Le recours au logiciel Stream a permis de montrer, pour la période hivernale, que ces différentes configurations pouvaient entraîner une variation de l'ordre de 10 % des volumes ruisselés à l'exutoire du bassin versant, montrant par là le rôle de l'organisation spatiale des cultures dans la maîtrise du ruissellement. Le recours conjoint aux modifications de techniques culturales dans

le respect des contraintes d'organisation du travail (voir le « niveau 1 » évoqué p. 299) permet de réduire le ruissellement de 20 % supplémentaires.

Tableau 4.3. Différentes approches des marges de manœuvre des agriculteurs : comparaison entre les exemples de la gestion des effluents d'élevage (Caneill et Capillon, 1990).

	Gestion des effluents d'élevage – Alpes du Nord	Maîtrise du ruissellement érosif – pays de Caux
Composante spatiale du processus écologique	Faible	Forte
Échelle d'analyse	Régionale	Locale
Niveau d'analyse	Fonctionnement global de l'exploitation agricole	Décisions à l'origine des systèmes de culture et de leur localisation
Leviers d'action	Ressources productives → niveau 3	Systèmes de culture → niveaux 1 et 2

Les niveaux 1, 2 et 3 font référence à la section traitée pp. 299-300.

Les deux exemples précédents montrent qu'il existe différentes manières d'aborder la question des marges de manœuvre des agriculteurs pour modifier leurs pratiques (cf. *tableau 4.3*). Dans le premier exemple, il s'agissait de déceler à l'échelle régionale les points de blocage d'une meilleure gestion des effluents d'élevage au sein des exploitations agricoles. Pour cela, une typologie basée sur le fonctionnement global des exploitations a été réalisée et des propositions d'amélioration ont été proposées en fonction des types. À la suite d'une telle étude, il est envisageable de classer rapidement toutes les exploitations de la région et d'adapter les propositions, et éventuellement les aides, en fonction des types. Du fait du niveau d'étude — la région — et du phénomène considéré — la pollution diffuse —, il n'y a avait pas à ce stade nécessité d'une spatialisation des informations. Le second exemple consistait en une étude plus détaillée des marges de manœuvre à l'échelle d'un petit territoire pour un phénomène à forte composante spatiale. Cela impliquait de reconstituer les règles de décision à l'origine des pratiques, et de localiser spatialement ces pratiques. À la différence de l'étude précédente, il n'y a pas de résultat générique pouvant s'appliquer à toutes les exploitations de la région ; c'est la démarche d'analyse des marges de manœuvre qui constitue le point généralisable à d'autres exploitations. Notons aussi que les niveaux d'action sont différents d'une situation à l'autre : techniques culturales et successions de cultures pour l'exemple du ruissellement, équipements pour la maîtrise des effluents. Cette démarche d'analyse agronomique doit bien entendu être complétée par des analyses des marges de manœuvre d'un autre point de vue, notamment économique et sociologique, lorsque les modifications proposées impliquent des coordinations entre agriculteurs : il s'agit de déterminer dans quelle mesure ces coordinations sont possibles, les dispositifs nécessaires pour les faire émerger, etc.

Chapitre 11

Agronomie et qualité dans les filières de production végétale

Marianne LE BAIL, Christine AUBRY,
Mireille NAVARRETE, Aurélien VAUCELLE

L'amplification des questions de qualité dans le champ de l'agronomie au cours des vingt dernières années répond, à côté d'un objectif de sécurité alimentaire et sanitaire (cf. l'introduction générale), à la montée en puissance, en particulier dans les pays les plus développés, d'autres dimensions de la qualité issues de l'évolution des rapports entre la production agricole, la transformation, la distribution des aliments et les pouvoirs publics (Sauvée et Valceschini, 2004). Tout d'abord, la gestion privée de la qualité s'est en partie substituée à son administration centralisée (publique ou professionnelle) jusque dans les années 1980, changeant les règles de la concurrence. Les industriels et la grande distribution ont recours à une segmentation croissante des marchés de clientèle pour dépasser la concurrence par les prix, et font remonter vers la production une partie de la responsabilité de cette segmentation *via* une multiplication de cahiers des charges. Par ailleurs, les consommateurs et la grande distribution, généralement éloignés des processus de fabrication des produits alimentaires, réclament des garanties accrues sur la conformité des pratiques agricoles aux cahiers des charges. Ces deux derniers mouvements se lisent bien dans la multiplication des signes apposés sur les produits et dans l'apparition, à côté des cahiers des charges portant sur les caractéristiques des produits, de procédures de certification des pratiques (Mazé *et al.*, 2000 ; Sauvée et Valceschini, 2004). Ces procédures de certification, généralisées dans l'industrie sous des formes très normalisées, ont comme principal objectif de réduire l'incertitude sur la qualité. Pour l'agronome, cette évolution a trois conséquences.

En premier lieu, la question de la définition de la qualité n'est pas triviale. Elle ne se réduit pas à la définition de caractéristiques intrinsèques du produit, déjà difficiles à cerner (cf. chapitre 3 et chapitre 6). Elle suppose, en préalable à toute tentative de gestion, la réalisation d'un diagnostic intégrant des considérations d'ordre biotechnique mais aussi économique, gestionnaire, juridique voire sociologique. Elle est d'emblée un objet d'analyse pluridisciplinaire. Ainsi, la recherche de

systèmes de culture améliorant la qualité du blé pour le marché de l'éthanol a-t-elle exigé la confrontation des objectifs des agriculteurs (rendements et faibles coûts pour une production faiblement rémunérée), des industriels (taux de protéines et dureté du grain) et de l'État (bilan énergétique positif et faibles rejets d'azote dans l'environnement) et le recours à des méthodes de décision multicritères pour trier les systèmes de culture les plus pertinents (Loyce *et al.*, 2002a). La qualité est donc multicritère, mais elle est aussi objet de négociation, et sa définition évolue avec la demande, avec l'état de l'offre et avec les moyens de contrôle. En France dans les années 1980, quand la production d'orge de printemps était trop faible et trop riche en protéines dans les régions proches des malteries, celles-ci cherchaient à encourager la relance de la culture en limitant leurs exigences à des taux de protéines inférieurs à 11,5 %. Après la mise au point de systèmes de culture répondant à cet objectif (Le Bail et Meynard, 2003) et des années marquées par de trop faibles taux de protéines, dans un contexte agricole plutôt demandeur de diversification, les cahiers des charges des malteurs se sont resserrés sur une exigence de protéines entre 10 et 11 %. Demain, si un indicateur de la « maltabilité » de l'orge plus précis que le taux de protéines totales est disponible et contrôlable, la définition de la qualité pourrait encore évoluer, alors même que ni la demande des buveurs de bière, ni la technologie de fabrication n'auront beaucoup changé !

En second lieu, la conception de solutions agronomiques pour la gestion de la qualité ne tient pas seulement à la proposition de nouveaux systèmes de culture et à l'élaboration de règles de décision pour les agriculteurs. Elle suppose des changements d'échelle pour concevoir et évaluer des solutions techniques dans des espaces gérés par différents acteurs des filières, qui ont en outre besoin d'outils d'aide à la négociation. Ainsi, pour améliorer la qualité de la canne ou de la betterave dans tel bassin sucrier, on peut concevoir des systèmes de culture pour augmenter le rendement sucrier parcellaire et réduire les non-sucre qui gênent l'extraction à l'usine (Manichon et Caneill, 1987), mais on peut aussi organiser le bassin sucrier en vue d'une optimisation des quantités de sucre globales extraites par l'usine, sous contrainte des conditions de fonctionnement des plantations, de l'usine et des transporteurs (Gaucher *et al.*, 2003 ; Hansen *et al.*, 2002).

Enfin en dernier lieu, l'émergence des dispositifs de certification des pratiques renforce la nécessité d'une mise à l'épreuve des systèmes techniques innovants au cours du temps et dans l'espace. Cette exigence de garantie impose aux concepteurs des innovations de prévoir des indicateurs aisément mesurables pour contrôler leur application et leurs effets.

Dans ce qui suit, nous nous attacherons dans un premier temps à proposer un cadre conceptuel d'analyse des questions de qualité, pour l'essentiel indépendant du type de qualité recherché, qui intègre l'interface entre la production agricole et le reste des filières. À ce titre, on étudiera particulièrement deux acteurs dont la coordination paraît stratégique pour la qualification des produits dans la plupart des filières. Ce sont d'une part les agriculteurs dont on a discuté la représentation des stratégies, de l'organisation et des décisions dans le chapitre 2 et, d'autre part, les structures de concentration de l'offre agricole dispersée sur le territoire (coopératives et négociants, organismes intermédiaires de commercialisation, voire opérateurs de la distribution) (Filippi, 2002 ; Heintz, 1994 ; Le Bail, 2002). Dans un second temps,

nous illustrerons la conception de systèmes innovants pour répondre à des objectifs de qualité autour de quatre axes :

- diagnostic du système d’approvisionnement pour l’identification des questions agronomiques ;
- conception d’innovations proposées aux acteurs ;
- interaction de ces innovations avec les processus de décision des acteurs ;
- simulation d’organisation de systèmes d’approvisionnement en vue d’une aide à la négociation.

Enfin, les questions de certification des manières de produire seront traitées, en mettant l’accent sur ce qu’elles impliquent pour les agronomes en termes de conception et d’évaluation de référentiels (cahiers des charges, normes techniques...).

►► Un cadre conceptuel pour analyser les systèmes techniques finalisés par la maîtrise de la qualité

Le cadre conceptuel retenu par les agronomes reprend l’idée, commune aujourd’hui dans le champ de l’économie et des sciences de gestion, qu’il est nécessaire de comprendre et de modéliser les mécanismes de coordination structurant la gestion de filière (*supply chain management*) pour améliorer la qualité (Sauvée et Valceschini, 2004 ; Tijssens et Vollebregt, 2003). En insistant sur l’analyse agronomique de ces relations et de leurs effets sur la qualité, nous introduisons la nécessité d’étudier l’interface entre les filières et les territoires de la production agricole. Il ne s’agit pas seulement d’y caractériser ce qui fait la spécificité de certains produits d’origine (Moity-Maïzi *et al.*, 2001 ; Vaudour, 2003), mais aussi de proposer des outils d’analyse et de conception de systèmes de production sensibles à la diversité des milieux, des pratiques et des organisations dont les agriculteurs sont acteurs.

Pour ce faire, nous proposons, à côté des modèles de la parcelle et de l’agriculteur (cf. chapitres 1 et 2), un cadre conceptuel de la gestion de la qualité, englobant agriculteurs et entreprises, pour expliciter les mécanismes de coordination entre ces deux groupes d’acteurs, pour comprendre et intervenir sur les logiques qui rendent en partie interdépendants les systèmes de culture d’un territoire au-delà des objectifs propres des exploitations qui l’occupent (Papy, 2001a). Les travaux qui ont permis de structurer cette approche (en particulier Le Bail, 1997, 2002, 2003), en complément et dans la suite des travaux de Caneill et Capillon (Caneill, 1993 ; Caneill et Le Bail 1995 ; Capillon et Valceschini, 1998), ont concerné essentiellement les grandes cultures (céréales, pommes de terre, betteraves sucrières...). Le cadre défini a ensuite été valorisé dans l’analyse des filières maraîchères en France, ainsi que dans celle de quelques cultures tropicales industrielles (canne à sucre par exemple). Ces travaux ont très majoritairement été menés dans des programmes de recherche pluridisciplinaires (agronomie, économie et sciences de gestion) ; ils restent pratiquement exclusivement d’origine française.

Le bassin d'approvisionnement

Le système local d'approvisionnement¹⁶ fournit une représentation de la coordination entre deux types d'acteurs. D'un côté les agriculteurs, généralement nombreux, proposent, à une date souvent décalée par rapport aux besoins des utilisateurs, une offre de produit dispersée sur le territoire, sous forme de récoltes aux caractéristiques incertaines et variables entre parcelles. Le second acteur, une entreprise de collecte des récoltes, cherche à alimenter des marchés, incarnés par des entreprises de transformation ou de distribution, en lots de produits répondant à des spécifications plus ou moins précises dans des délais et avec des garanties certifiées par différentes formes de contrats.

L'approche systémique insiste ici sur la primauté accordée, dans l'élaboration de la qualité, aux interactions entre les différents niveaux d'organisation autonomes mais interdépendants que sont la parcelle, l'exploitation et l'entreprise. On s'intéresse aux relations de cause à effet, aux échanges de flux physiques et d'information entre ces différents niveaux. Sans que les limites de ce système soient drastiquement établies, elles fixent un « dehors » — les marchés, les autres acteurs de l'amont et de l'aval des filières, les autres structures intervenant sur le territoire... — dont on accepte temporairement une certaine stabilité des caractéristiques que sont les normes environnementales, la nature des technologies agro-alimentaires... Le terme « local » insiste sur l'importance des interactions spatiales entre les éléments constitutifs du système dont le territoire est le bassin d'approvisionnement potentiel de l'entreprise pour une production donnée. Le terme « d'approvisionnement » souligne la priorité accordée dans cette analyse aux relations entre les agriculteurs et le premier niveau de commercialisation de leurs produits. Enfin, on considère que ce système a comme objectif global la réduction de l'incertitude sur la qualité des lots. Cette finalisation n'affirme pas qu'il y a systématiquement un objectif collectif explicite entre agriculteurs et entreprises : il s'agit d'une construction de l'observateur à vocation heuristique, que l'on doit resituer par rapport à la diversité des objectifs particuliers et éventuellement divergents des différents acteurs.

Trois dimensions pour décrire le fonctionnement d'un système local d'approvisionnement

L'espace technique

Il est matérialisé par un ensemble discontinu de parcelles portant la même culture au cours de la même campagne, dont les récoltes sont livrées ou susceptibles d'être livrées à l'entreprise de collecte des productions. Dans ce bassin d'approvisionnement, les parcelles sont identifiées par leurs caractéristiques physiques (taille, forme...), leur système de culture (y compris la variété), leur appartenance à des ensembles pédoclimatiques, et leurs positions respectives dans l'espace. Ces facteurs déterminent les quantités globales récoltées dans le bassin, ainsi que les

16. Dont on peut donner une traduction anglaise par l'expression « *crop supply area system* » (CroSAS).

valeurs moyennes et la variabilité interparcellaire et interannuelle des caractéristiques de qualité attachées au produit.

L'espace décisionnel

Dans cet espace sont définies les stratégies propres de chaque acteur et leurs règles de décision technique pour l'ensemble des productions qu'ils gèrent. Cet espace est matérialisé du côté des agriculteurs par l'ensemble des soles de la culture donnée, chaque sole étant gérée par l'exploitant en fonction de ses diverses productions, de ses ressources productives et en vue d'une certaine affectation des produits aux circuits de commercialisation. Du côté des entreprises, les stratégies touchent à la localisation des infrastructures et des lieux de collecte, et au niveau des ressources affectées à leur gestion pour un produit donné. Ces facteurs affectent la priorité dévolue au produit concerné pour les deux catégories d'acteurs et, pour partie, les décisions techniques soutenant l'organisation des parcelles dans l'espace et le choix des systèmes de culture.

L'espace de négociation

Il englobe, pour la production étudiée, les objectifs de production du système local d'approvisionnement et les modalités de coordinations horizontale et verticale entre acteurs pour les atteindre. Ces relations sont matérialisées par :

- des engagements (contrat d'adhésion à une coopérative, engagement en cours de campagne, contrat avant implantation...), de plus en plus souvent différenciés selon les agriculteurs, formalisant la transaction entre agriculteurs et entreprises de collecte des récoltes ;
- un programme prévisionnel de l'approvisionnement et des règles de pilotage en fonction des évolutions possibles des états des cultures et des marchés, finalisés par la production de lots ;
- différentes procédures pour atteindre ces objectifs, concernant :
 - des prescriptions soutenues par des incitations sur les qualités à produire ou les manières de produire (conseils techniques, démonstrations variétales, cahiers des charges qui touchent à tout ou partie des systèmes de culture...) ;
 - les méthodes de mesure sur le flux de produit et sur l'organisation des plans de contrôle et de traçabilité à la parcelle, en réception, au stockage, etc. ;
 - les dispositifs de prévision des dates, des niveaux quantitatif et qualitatif et du classement des récoltes.

Ces facteurs déterminent différentes modalités de traitement de la variabilité des récoltes du bassin.

Les deux temps du système local d'approvisionnement

On doit distinguer deux pas de temps pour caractériser le fonctionnement et l'évolution de ce système : le cycle d'approvisionnement qui inclut la période de planification des cultures, la campagne culturale elle-même et la période de collecte des récoltes jusqu'à la commercialisation des lots stockés, et le long terme sur lequel les limites mêmes du système peuvent évoluer.

En fonction des cultures, les différentes phases du cycle d'approvisionnement sont plus ou moins longues et plus ou moins superposées. On considère que les composantes de marché sont peu incertaines sur un cycle, et que la négociation des objectifs globaux pour le bassin et des contrats-cadres entre entreprises et producteurs (généralement associés en groupe) a eu lieu. Avant l'implantation, les procédures de coordination visent l'assurance de disposer, globalement sur le bassin, des espèces — voire des variétés — aux dates voulues pour remplir le programme d'approvisionnement ébauché. Elles combinent une information générale faite aux agriculteurs sur les performances des variétés dans la région, et la signature des engagements annuels de production. Les techniciens qui font le lien entre agriculteurs et entreprises rapportent des informations sur les caractéristiques des parcelles et des exploitations (chiffrage et localisation des surfaces variétales, fiches techniques pour la traçabilité des informations...). Au cours du cycle cultural, les modalités de coordination concernent essentiellement le suivi des cultures, appuyé sur des références et des outils analytiques permettant une aide à la décision sur les parcelles. En retour, certaines informations peuvent enrichir les bases de données à l'échelle du bassin, comme la répartition des reliquats d'azote nitrique à la sortie de l'hiver, le relevé des itinéraires techniques... La programmation de l'approvisionnement se précise au fur et à mesure que s'accumulent des informations sur les récoltes espérées, données traitées dans des « modèles de simulation » de nature très variée, portant sur l'échelle parcellaire ou régionale et dont la précision s'accroît à mesure que l'on s'approche de la récolte.

En définitive, quand on avance dans ce cycle d'approvisionnement, les moyens d'agir sur la valeur des récoltes parcellaires se réduisent à mesure que les informations sur ces valeurs moyennes et sur leur dispersion dans le bassin d'approvisionnement s'accroissent. Les modalités de coordination jouent de ces deux leviers de manière à optimiser les conditions de constitution des lots de produits adéquats à la demande (Capillon et Valceschini, 1998 ; Le Bail, 1997 ; Navarrete *et al.*, 1999).

Sur le long terme, le système local d'approvisionnement est marqué par l'émergence de « crises » plus ou moins aléatoires qui peuvent remettre en cause son organisation générale et ses limites (extension-récession, déplacement du bassin) et justifier une renégociation du projet global et des contrats-cadres entre agriculteurs et entreprises lors d'une crise des marchés ou d'une recomposition régionale des entreprises. Par exemple en France, la disparition de la prime allouée pour la culture du blé dur lors de la réforme de la Pac en 1992 pour les zones « non traditionnelles » a pratiquement fait disparaître les bassins d'approvisionnement des semouliers dans les régions Centre et Poitou-Charentes. Ce long terme est aussi celui de l'apprentissage, marqué par des actions correctives qui font évoluer à chaque campagne les résultats du bassin et les instruments de la coordination. En blé dur, c'est en partie pour sauvegarder de tels acquis que semouliers, coopératives et agriculteurs ont signé des contrats de production dans les régions citées ci-dessus, qui se sont substitués au marché, les primes étant alors payées par les semouliers en échange du suivi de cahiers des charges.

► L'organisation de la production à l'échelle du bassin d'approvisionnement

Si l'on prend au sérieux le fait que les attentes de qualité de l'aval sont bien transformées et reformulées par le système local d'approvisionnement, une première étape pour l'agronome est d'identifier et de hiérarchiser, à travers un diagnostic de ce système, les questions de recherche-développement pertinentes pour améliorer la qualité (p. 291). Les réponses apportées à ces questions sont alors de trois types. Elles peuvent concerner des innovations techniques proposées aux acteurs : systèmes de culture adaptés, dispositifs de tri (p. 292). Elles peuvent porter sur l'interaction de ces innovations avec les processus de décision des acteurs (p. 298). Elles peuvent, en tentant d'intégrer les articulations entre les différents acteurs du système, simuler différents scénarios de fonctionnement du système dans son ensemble (p. 303) en vue d'une aide à la négociation.

Définition des questions agronomiques en matière de qualité

Si la littérature sur le *supply chain management* s'attache bien à évaluer l'intérêt et les limites des dispositifs de coordination entre acteurs des filières, c'est généralement du point de vue du seul intérêt économique pour l'amélioration globale de la valeur ajoutée, ou pour identifier les points névralgiques où l'information et la valeur se perdent. Par ailleurs, si des technologues font bien état de relations entre agriculteurs et filières, c'est surtout quand ils cherchent à identifier des caractéristiques intrinsèques des produits. L'organisation locale des relations entre acteurs est rarement évoquée pour définir les objectifs de recherche. Pourtant, les diagnostics combinant l'analyse de différents niveaux d'organisation pour dégager des voies de recherche et de développement en matière de qualité sont fructueux. Ils permettent par exemple de tenir compte d'une certaine complexité de l'environnement socio-économique des exploitations, d'identifier des objets de recherche interdisciplinaires et de proposer des indicateurs d'évaluation des innovations techniques adaptés.

Ainsi, étudiant les obstacles à la mise en place de la protection intégrée sur coton en Thaïlande, Castella *et al.* (1997, 1999) constatent que si le problème du contrôle des insectes est sans doute la principale cause de la réduction des rendements et de la qualité du coton, les voies d'amélioration à explorer sont différentes selon les zones. Si l'on se trouve dans la ceinture cotonnière traditionnelle, il est nécessaire de travailler sur l'amélioration des systèmes de culture et sur la gestion de la main-d'œuvre ; si l'on est en zone frontalière, c'est dans l'organisation des relations entre les travailleurs agricoles immigrés, les entrepreneurs intermédiaires villageois, les unités d'égrenage et les vendeurs de produits phytosanitaires que l'on doit chercher des sources d'innovations. En canne à sucre, plusieurs études dans différents pays (Gaucher *et al.*, 2003 ; Hansen *et al.*, 2002) montrent le poids de l'organisation des récoltes et de leur collecte, entre agriculteurs, main-d'œuvre saisonnière, transporteurs et usines, sur l'élaboration de la qualité globale dans le bassin sucrier.

Au-delà d'une amélioration des taux moyens d'extraction du sucre dans chaque parcelle, la question de la qualité se pose aux agronomes en termes :

- de coordination de cycles de culture-récolte-transport et d'optimum de richesse, différenciés par zone agroclimatique en vue d'une optimisation des approvisionnements de l'usine ;
- d'analyse des conséquences de ces réorganisations sur le fonctionnement des exploitations cannières et sur leurs systèmes de culture.

Plus généralement, de telles analyses ouvrent l'éventail des solutions techniques à explorer en combinant différentes échelles. Ainsi, dans le cas d'une entreprise de collecte-stockage de céréales en France, on a montré (Le Bail, 1997, 2000) que les objectifs de production de lots de céréales, résultant de la confrontation de l'état de l'offre sur le bassin, des caractéristiques des structures de collecte et de la demande des marchés, conduisent à une diversité d'axes de traitement de la variabilité au sein du bassin pour le critère « taux de protéines ». Dans le cas de l'orge brassicole, débouché à forte valeur ajoutée concernant peu de volume dans la région, on vise à constituer un seul lot final par variété, de taux de protéines moyen inférieur à 11,5 %. Dans la situation du blé à plusieurs usages (pain ou biscuit) séparés par une valeur-seuil de taux de protéines de 11,5 % d'origine technologique, on cherche à classer les parcelles pour trier les récoltes en deux lots différents. Enfin, pour les mélanges de variétés de blé recommandées par la meunerie, qui représentent en volume la base du système d'approvisionnement, on souhaite formaliser et conserver la distinction que les clients font dans l'origine des lots provenant de tel ou tel silo. Ces trois axes de traitement de la variabilité supposent la résolution de questions agronomiques différentes :

- la recherche de systèmes de culture adaptés aux différents couples « terrain × succession de culture » de la région, combinant un taux de protéines inférieur à 11,5 % et un rendement supérieur à $6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour l'orge de printemps brassicole ;
- la recherche de modalités de classement précoce des parcelles en blé tendre sur un ou plusieurs indicateurs prévisionnel de la qualité ;
- la formalisation d'un effet « terroir » pour les blés tendres pour les marchés de mélanges de variétés meunières de base.

Dans ces diagnostics, dont on a dit plus haut qu'ils étaient pluridisciplinaires, les différentes disciplines travaillent de concert dès la définition de la question de qualité traitée (Agostini *et al.*, 1996 ; Habib *et al.*, 2001a). En France, les programmes régionaux de recherche pour et sur le développement territorial, élaborés sous l'impulsion de l'Inra (Sebillotte, 2000, 2002), offrent un cadre à ces « diagnostics collectifs construits en partenariat avec les acteurs du développement et des entreprises agricoles et agro-alimentaires, autour d'un recensement des problèmes et questions “de la pratique”, pour lesquels les partenaires souhaitent une intervention de la recherche ».

Innovations techniques adaptées au système local d'approvisionnement

Une fois les objectifs de production du système local d'approvisionnement définis, l'organisation des relations entre agriculteurs et structures de regroupement de

l'offre suppose la mise au point d'outils de coordination que sont les cahiers des charges, des moyens de caractérisation des différents types d'agriculteurs, des instruments d'analyse de la qualité en cours de processus de construction des lots, et des outils de prévision nécessaires au pilotage de la collecte.

Évaluer et concevoir de nouveaux systèmes de culture

L'analyse du système local d'approvisionnement qui produit des lots peut servir de grille à l'évaluation de nouveaux systèmes de culture à l'échelle des bassins d'approvisionnement. Ainsi, à l'issue de travaux menés sur la qualité des orges de brasserie dans un bassin d'approvisionnement de Picardie, on a pu identifier les trois choix techniques majeurs utilisables pour le contrôle d'un double objectif de rendement et de taux de protéines (Le Bail et Meynard, 2003) :

- le choix de la parcelle semée en orge, qui se fait à partir d'une évaluation des risques de tassement du sol au printemps et de déficit hydrique précoce en fin de montaison, ainsi qu'à partir d'une prise en compte du précédent cultural, trois éléments qui jouent sur la nutrition azotée de l'orge et, *in fine*, sur le rendement et la teneur en protéines. Ici, ce n'est pas tant la quantité d'azote minéralisé en elle-même que l'incertitude sur son estimation et sur son rythme de production qui exacerbe le risque de dépassement du taux-seuil de protéines ;

- la date d'implantation de la culture joue sur les risques de tassement du sol en fonction de son humidité, et sur la date de floraison. À trop l'avancer, on risque des tassements préjudiciables à la dynamique d'absorption de l'azote. À trop la retarder, on risque un déficit hydrique responsable d'une réduction du calibre des grains, voire même d'une chute d'efficacité de l'azote, deux causes d'augmentation du taux de protéines ;

- la gestion de la fertilisation intègre la nécessité d'atteindre une efficacité optimale de l'azote pour le nombre de grains. Cette efficacité ne doit être ni trop faible en raison du risque d'augmentation du taux de protéines, ni trop forte (caractéristique d'une carence en azote). Ceci se traduit par un rapport « nombre de grains/quantité d'azote absorbé » optimal, qui sert à calculer les doses d'azote visées en fonction des fournitures du sol.

Pour discuter de l'intérêt des améliorations proposées par la coopérative aux agriculteurs à la suite de ce diagnostic, la procédure d'évaluation a consisté à comparer pendant deux ans, sur une centaine de parcelles du bassin d'approvisionnement, les résultats obtenus avec des itinéraires techniques proches (ITK1) ou plus éloignés (ITK2) des systèmes de cultures recommandés, en particulier au titre de la gestion de l'azote et de l'implantation (choix de la parcelle et date de semis). La *figure 4.5* montre que, pour un effectif d'environ 170 parcelles sur lesquelles la comparaison a été menée, 80 % de celles sur lesquelles ont été appliqués les ITK1 ont atteint les performances visées (cadran en haut à gauche). Il reste que 50 % des parcelles de l'autre groupe (ITK2) sont dans le même cas. En définitive, les rendements moyens de chaque groupe sont du même ordre de grandeur, même si la variabilité intragroupe est plus forte dans le groupe correspondant à l'ITK2. La diminution des charges en intrants (azote en particulier) et l'obtention de primes à la qualité pour les ITK1 leur donnent toutefois un avantage significatif. Au-delà de cette évaluation à la parcelle, on a constaté, à l'échelle de l'exploitation, que suivre les prescriptions ne pesait pas

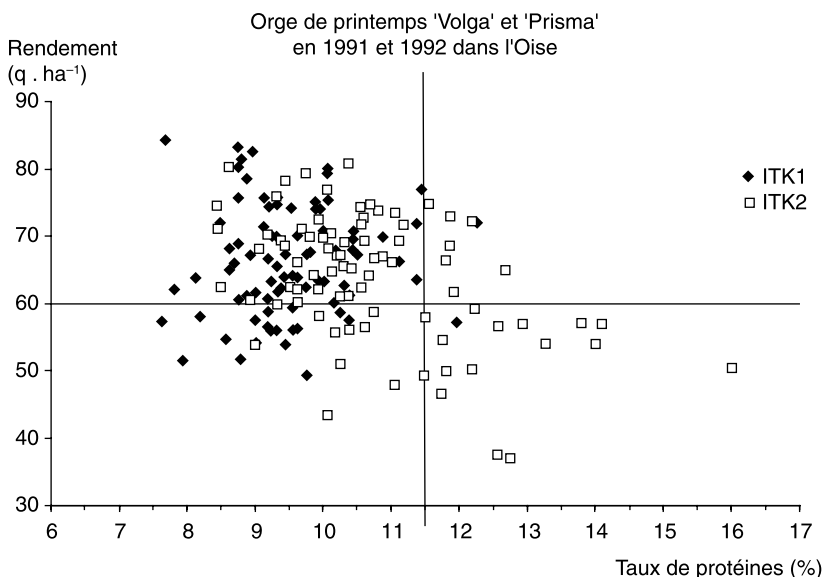


Figure 4.5. Évaluation des itinéraires techniques dans un bassin d'approvisionnement (170 parcelles d'orge en 1991-1992, en Picardie). D'après Le Bail, 1997.

tant sur les ressources en intrants (il y a au contraire moins d'azote apporté, voire moins de traitements phytosanitaires) que sur les ressources foncières et en travail : en réduisant la surface cultivable en orge (critère de choix des parcelles), cette culture est en compétition avec d'autres cultures exigeantes comme les pois, les pommes de terre ou les betteraves sucrières) ; en suggérant la nécessité d'un suivi plus étroit d'une culture jusqu'ici considérée comme secondaire — par l'évaluation des conditions d'humidité à l'implantation, l'analyse de sol, le calcul de la dose, etc. — c'est le temps de travail sur cette culture qui augmente. Le choix des agriculteurs de s'en tenir à des pratiques moyennes plutôt calées sur l'obtention d'un rendement potentiel de la parcelle pourrait alors se justifier par l'organisation de l'exploitation. En revanche, la *figure 4.5* montre qu'à l'échelle du bassin, plus du tiers des parcelles du groupe ITK2 dépassent la limite qualitative fixée, faisant ainsi courir le risque d'un basculement du lot collectif au-delà du seuil commercial fixé par les malteurs à la coopérative : ceci rend légitime, du point de vue de ce collectif, les ITK1.

Cette évaluation des systèmes de culture intégrant différents niveaux d'échelle du système d'approvisionnement offre ainsi l'occasion d'éclairer les discussions entre acteurs à l'occasion des négociations qui président à l'élaboration et à l'évolution des contrats.

Concevoir et évaluer des dispositifs de ségrégation des récoltes

Pour réduire encore l'incertitude sur la qualité des récoltes, les acteurs du système local d'approvisionnement tentent de mettre en place le plus tôt possible des dispositifs contre-aléatoires, complémentaires des innovations en matière de systèmes de culture, qui portent sur l'appréciation de la diversité des exploitations ou sur le classement des parcelles.

D'une campagne à l'autre, on peut ainsi chercher à repérer, à travers une analyse de la diversité de fonctionnement des exploitations du bassin d'approvisionnement, les combinaisons les plus adaptées entre types d'exploitations, type de produit et modalités de coordination pour que convergent plus étroitement les plans des agriculteurs et des entreprises utilisatrices de leurs récoltes. Ainsi par exemple, Capillon et Valceschini (1998) ont montré que l'efficacité du dispositif de coordination à l'œuvre au sein de bassins d'approvisionnement de conserveries de légumes s'appuie, d'une part, sur des procédures de planification des récoltes et, d'autre part, sur un contrat relationnel. La planification est sous-tendue par les variables agronomiques jouant sur la détermination des dates de maturité et de récolte des légumes, elles-mêmes déterminées par certaines décisions techniques ou stratégiques de l'exploitation comme la présence et la mise en œuvre de l'irrigation, l'organisation du travail (*tableau 4.4*)... Les méthodes d'approche globale du fonctionnement des exploitations, qui les classent notamment selon ces niveaux de décision (Capillon, 1993 et chapitre 4), permettent d'orienter le choix des agriculteurs du bassin les mieux à même d'établir durablement un contrat avec l'usine ; elles permettent aussi de proposer des modalités d'ajustement en temps réel des programmes des agriculteurs du bassin et de l'usine.

Par ailleurs, des instruments de classement des parcelles peuvent être élaborés pour simuler l'élaboration de lots de qualité à partir de modèles de prévision de la qualité des récoltes. Par exemple dans le cas du blé tendre (Le Bail et Makowski, 2004), il est montré que si l'on cherche à élaborer deux lots de taux de protéines significativement différents, un modèle de prévision du rendement et du taux de protéines, même assez peu précis dans ses prévisions parcellaires, permet de discriminer précocement deux lots différents tant que l'on ne vise pas des seuils de protéines extrêmes, et ce à partir de la connaissance de la dose d'azote apportée et des reliquats d'azote minéral du sol mesurés à la sortie de l'hiver sur les parcelles du bassin d'approvisionnement. Si l'on souhaite avoir une anticipation plus fiable des performances des parcelles, des modèles de prévision plus précis mais de coût raisonnable doivent être recherchés, intégrant en particulier une dimension variétale (Le Bail *et al.*, 2005). La connaissance de la variété reste en effet aujourd'hui un outil de gestion de la qualité essentiel pour les acteurs des filières.

Formaliser les relations entre qualité et origine des récoltes

L'identification de l'origine et de ses conséquences sur la qualité des produits constitue aujourd'hui un axe fort des procédures de qualification des produits et de l'organisation de la production. Elle ne concerne pas seulement les produits classiquement signalés par leur origine¹⁷, mais aussi des produits plus banals, dont la référence à l'origine est un outil de gestion pour l'industriel (Moity-Maïzy *et al.*, 2001). L'établissement par les agronomes de relations entre des caractéristiques du produit et des composantes physiques du milieu, en interaction avec le peuplement et les techniques, permet d'une part d'intervenir dans les questions de délimitation

17. Appellation d'origine contrôlée, appellation d'origine protégée, labels et indication géographique de provenance.

Tableau 4.4. Variables de pilotage d'une production à la parcelle ou à l'échelle du bassin d'approvisionnement (le programme du service agronomique d'une usine de conserverie). D'après Capillon et Valceschini, 1998.

Niveaux d'observation et de contrôle	Objets d'observation et de contrôle	Éléments de diagnostic par le chef de culture	Conclusions et prévisions	Instruments éventuels d'ajustement
Parcelle	Semis	Conditions de semis (structure du sol et humidité)	Homogénéité de la parcelle au semis	Conseiller les producteurs sur le travail du sol
	Levée	Régulière/irrégulière	Homogénéité spatiale : quantité/qualité	Rouler le sol après semis, irrigation
	Croissance	Climat (sec/humide, « unités de chaleur »)	Rendement, date de récolte	Irrigation
	Traitements phytosanitaires	Observation des maladies et des adventices	Quantité/qualité (coût de traitement)	Date/dose/nombre
	Irrigation	Humidité du sol, aspect de la plante	Accidents éventuels, répercussions sur quantité/qualité	Fréquence et dose d'application
Bassin d'approvisionnement	Récolte	Maturité, évolution	Prévision date de récolte, de rendement, de qualité	Avancement/retardement
	Déficit quantité	Programme de fabrication non atteint	Modification du plan d'approvisionnement	Récolte plus tardive, semis sur les autres parcelles, achats externes
	Excédent quantité	Programme de fabrication non atteint	Modification du plan d'approvisionnement	Abandon des parcelles, récolte plus jeune, ventes externes
	Déficit qualité	Tendérométrie, calibre	Modification du plan d'approvisionnement ; ajustement de la récolte	Récolte plus jeune, irrigation avant récolte, ajustement variétal

de territoires homogènes vis-à-vis de la qualité des produits et, d'autre part, de discuter des évolutions des systèmes techniques et des risques que ces changements font courir au profil qualitatif d'un produit.

En matière de délimitation, le secteur des AOC viticoles en France offre l'exemple d'un débat difficile à trancher sur la nature des critères de délimitation à prendre en compte. S'appuyant sur le caractère pérenne de la culture, certains auteurs dégagent une caractérisation par des facteurs naturels d'unités de territoires dans lesquelles la réponse de la vigne, à travers le vin, peut être considérée comme homogène. Lorsque le corps des pratiques est stabilisé par une tradition confortée par une inscription en AOC, la distinction entre ces unités de terroirs de base (Barbeau *et al.*, 1998 ; Morlat, 1996) peut être validée par les résultats viticoles. Cet effet d'une longue histoire culturelle sur les pratiques et les performances est aussi constaté dans d'autres cultures pérennes (Nesme *et al.*, 2003). En vigne, ce type de caractérisation est enrichi par des approches de modélisation cartographique des pédopaysages, où la légende indique les assortiments de groupes de qualité que l'on est susceptible d'obtenir le plus souvent pour un cépage donné (Vaudour, 2003). Cependant, à l'intérieur de ces entités, la précocité, le type d'alimentation en eau, la vigueur et la potentialité de rendement de la vigne jouent sur la variabilité des performances gustatives, suggérant une variabilité non négligeable due aux techniques culturelles (Brun *et al.*, 1996). À l'extrême, cet effet terroir peut être gommé quand les systèmes de conduite ont toute liberté pour compenser certains facteurs naturels comme dans les pays dits « néoviticoles » (Vaudour, 2003).

En matière de grandes cultures, on peut aussi identifier une hétérogénéité du territoire sur lequel porte la collecte, du point de vue des chances d'obtenir une conjonction entre un rendement élevé et une bonne qualité (Doré *et al.*, 2002b). Le travail déjà évoqué sur orge de printemps brassicole en Picardie a montré que certaines interactions entre les caractéristiques du milieu et les systèmes de culture comportent des risques plus ou moins faciles à maîtriser en matière de rendement, de calibre des grains et de taux de protéines. Sans voir dans cette segmentation des milieux une carte figée des niveaux intrinsèques de qualité des grains, on peut l'utiliser comme un outil de gestion territoriale des risques justifiant l'adaptation des systèmes de culture, la répartition des outils de contrôle du milieu (analyse de sols, surveillance des déficits hydriques...). Cet outil est nécessairement dynamique car, contrairement aux vignes évoquées plus haut, le positionnement spatial des cultures annuelles varie d'une campagne culturale à l'autre. On a ainsi pu noter en Picardie, de 1989 à 1992, une diminution régulière de la proportion de parcelles semées en orge de printemps dans des situations de terrain très limitantes (pente, cailloux, très faible réserve utile en eau du sol) à partir de 1992, la jachère y a souvent remplacé cette culture. Ce déplacement de l'orge de brasserie vers les plateaux limoneux a bien réduit les problèmes de déficit hydrique, mais a induit de nouveaux risques par la fréquence accrue de deux précédents culturels : la betterave, dont les conditions de récolte peuvent conduire à une dégradation de la structure, et les protéagineux, restituant des quantités incertaines d'azote minéral après récolte (Doré *et al.*, 2002b).

Place des référentiels finalisés par la qualité dans les exploitations agricoles

Les innovations techniques et organisationnelles issues des analyses précédentes, qu'elles portent sur la conduite technique des cultures ou sur les autres niveaux de gestion de l'exploitation, notamment les ressources productives, sont formalisées dans des cahiers des charges, des référentiels, soutenus par des procédures de suivi et de contrôle. L'investissement des agriculteurs dans ces dispositifs est très variable dans un même bassin sous l'effet de différents déterminants, et la mise en œuvre de ces cahiers des charges a des effets variés sur le fonctionnement des exploitations et des systèmes de cultures.

La diversité d'adoption des cahiers des charges par les agriculteurs

Sur le territoire d'une région consacrée à plusieurs productions et à plusieurs débouchés, les espaces techniques correspondant aux bassins d'approvisionnements respectifs des différentes productions se trouvent imbriqués. Les exploitations agricoles sont alors au cœur de plusieurs espaces décisionnels, correspondant aux différentes soles régionales des différentes cultures. Au niveau de l'exploitation, il y a d'une part des interactions de nature agronomique entre cultures d'une même succession, et d'autre part une compétition éventuelle entre ressources et cultures. Ainsi, dans l'exploitation, le croisement de ces différents espaces décisionnels par culture interroge l'efficacité des cahiers des charges formulés indépendamment les uns des autres par les opérateurs d'aval. De fait en France, dans une région de grandes cultures très diversifiées comme la Beauce dunoise, où plus de trente référentiels différents sont « proposés » aux agriculteurs, on a pu constater une grande diversité dans l'adoption de ces référentiels. Dans cette région, la mise en place de l'irrigation dans les années 1970 puis la segmentation des débouchés en céréales ont permis l'évolution des systèmes de culture à partir du schéma simple et assez uniforme de succession culturale maïs/blé. On trouve aujourd'hui une large gamme de combinaisons allant de systèmes à base de céréales et d'oléoprotéagineux sans cahier des charges, à des systèmes où la betterave sucrière, la pomme de terre, les oignons, les légumes pour l'appertisation, les porte-graines potagers sont venus diversifier des assolements où, par ailleurs, les céréales telles que blé tendre, blé dur, orge de printemps sont majoritairement produites sous contrat (Vaucelle et Le Bail, 2004a). Sur la base d'une enquête dans une cinquantaine d'exploitations de la région, on constate que le nombre de référentiels engageant les pratiques des agriculteurs varie de zéro à douze, impliquant de 0 à 100 % de la surface cultivée avec un à sept partenaires économiques différents. L'analyse des fonctionnements de ces exploitations révèle que cette variabilité relève peu de contraintes structurelles comme les potentialités agronomiques des sols ou la dispersion du parcellaire — qui limiteraient les choix de productions ou de débouchés — mais plutôt de la combinaison de choix stratégiques des exploitants et de niveaux de ressources plus ou moins limitants.

Ainsi dans cet exemple, pour les agriculteurs qui ont un nombre très faible d'engagements vis-à-vis de leur environnement socio-économique, les choix de limiter le

temps de travail consacré à la conduite des cultures (en le réservant schématiquement soit à la vie de famille, soit à la commercialisation des produits), de produire avec de faibles niveaux de charges opérationnelles, et de demeurer indépendants dans la conduite de leurs cultures vis-à-vis de leurs acheteurs sont ceux qui priment sur la prise d'engagements contractuels qui leur paraissent contradictoires avec ces objectifs. En revanche, pour les agriculteurs valorisant leurs productions *via* un nombre élevé d'engagements contractuels et consacrant éventuellement une part de leur surface agricole utile à la conduite de cultures à haute valeur ajoutée, ce sont surtout les déterminants relevant de ressources ajustables qui dominent (quantité globale de main-d'œuvre, sa compétence et sa répartition sur l'année). Enfin, les exploitations les plus diversifiées et les plus engagées dans des contrats qui peuvent être anciens ont en général bénéficié d'atouts qui leur ont permis d'investir et de s'assurer un équipement non limitant.

L'étude de la diversité des trajectoires qui conduisent à différentes combinaisons de référentiels dans une région éclaire donc l'agronome sur la nature des facteurs qui président à cette adoption, sur les besoins d'innovation en matière de système de culture que ces combinaisons supposent, et sur les objectifs affichés par les agriculteurs auxquels les référentiels présents sur un territoire donné ne sont pas en mesure de répondre.

Les effets des cahiers des charges sur l'exploitation et ses systèmes de culture

Du fait de l'interdépendance des systèmes de culture (chapitre 2 et Papy, 2001b), toute préconisation technique émise par une filière sur une culture est susceptible de peser sur d'autres échelles de décision dans l'exploitation. On peut classer les conséquences *a priori* en trois niveaux selon l'échelle décisionnelle concernée :

- niveau 1 — nouveaux choix techniques à la parcelle. Ils peuvent se raisonner sur une parcelle sans référence forte aux autres parcelles, mais en modifiant en général les successions de culture. L'introduction d'une nouvelle variété, d'une nouvelle opération technique, d'une nouvelle culture dans la succession comme des engrais verts, ou d'un changement dans la modalité de raisonnement et/ou de réalisation d'une opération technique¹⁸, peut rester confinée à l'échelle de la parcelle concernée ;

- niveau 2 — intégration, à l'échelle de la sole, de contraintes provenant de cahiers des charges techniques à la parcelle. Les demandes des filières, même lorsqu'elles portent sur une parcelle donnée, se traduisent en effet souvent par une modification de l'organisation des systèmes de culture dans l'exploitation à travers leur influence sur la sole de la culture concernée. Par exemple un délai de retour minimum exigé sur une parcelle précise, des caractéristiques de terrain ou d'aménagement sur cette parcelle comme l'accès à l'irrigation, la dimension, l'accessibilité, peuvent entraîner une modification de la taille de la sole de l'espèce, de sa zone cultivable, voire se répercuter sur la taille des autres soles ;

18. Par exemple le passage du traitement phytosanitaire systématique au traitement raisonné, où le déclenchement de l'intervention est déterminé par le comptage du nombre de parasites.

– niveau 3 — nouveaux choix stratégiques. Enfin, les demandes des filières peuvent conduire à des modifications du niveau des ressources productives, de leur gestion ou de l'équilibre entre productions : ces changements peuvent être explicites dans les cahiers des charges (abris pour certaines qualités ou pour certaines saisonnalités des produits en maraîchage, irrigation pour des légumes de conserve ou des pommes de terre, équipements de stockage, etc.), ou être induits par des demandes techniques (achat ou location de terres pour répondre à des exigences de délais de retour, modification de l'organisation du travail face à des exigences de dates de livraison, modification quantitative ou de la compétence de la main-d'œuvre de l'exploitation...).

Le fait que les modifications relèvent de l'un ou l'autre de ces niveaux dépend à la fois de la nature plus ou moins exigeante des demandes de la filière et des caractéristiques des exploitations, plus ou moins flexibles. Face aux exigences des filières, les agriculteurs cherchent à limiter les niveaux de changements dans l'exploitation, et c'est surtout l'impossibilité de trouver une solution à un certain niveau qui les conduit à effectuer des modifications au niveau supérieur. Pour l'agronome, un nouveau champ d'investigation s'ouvre alors, pour aider les agriculteurs à évaluer les changements occasionnés par les demandes des filières et à définir jusqu'à quel point accepter une orientation de leurs systèmes de production. Ce champ repose sur l'analyse des marges de manœuvre, c'est-à-dire sur la capacité des exploitations à adopter des changements techniques à un niveau, sans remettre en cause le fonctionnement de l'exploitation à un autre niveau (voir aussi chapitre 2). Nous utilisons ci-dessous deux exemples pour illustrer d'une part comment les agriculteurs peuvent être amenés à faire évoluer leurs systèmes de culture et de production sous l'effet des demandes des filières et, d'autre part, en quoi les modèles d'organisation de la production (Aubry *et al.*, 1998a et b ; Navarrete *et al.*, 1999) sont utiles pour comprendre et prévoir les manières de gérer les systèmes de culture dans une configuration donnée de cahiers des charges.

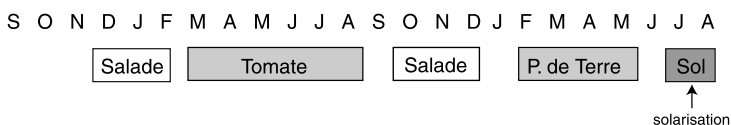
Un premier exemple a trait aux exigences des cahiers des charges et aux évolutions des systèmes de production dans les exploitations maraîchères. En France, pour les produits frais végétaux, deux critères de qualité sont particulièrement visés : la disponibilité d'un produit frais et mûr sur la période la plus longue possible et la qualité sanitaire de ces produits, qu'aucune transformation ne peut corriger puisqu'ils sont consommés en l'état. Un légume-feuille comme la salade, susceptible de contenir des nitrates et des résidus de produits phytosanitaires, est très encadré par la réglementation nationale et européenne. Des solutions techniques à la parcelle existent pour atteindre ces deux objectifs. En augmentant le nombre de cycles de salade par an, il est possible d'allonger la période de production (Navarrete *et al.*, 2003). En introduisant la solarisation, qui permet une désinfection des sols sans produits chimiques, il est possible de réduire les risques associés aux résidus phytosanitaires comme le bromure de méthyl (Stapleton, 2000). On a montré que ces innovations sont très diversement adoptées par les agriculteurs d'un bassin maraîcher important comme le Roussillon, en fonction du niveau de marges de manœuvre dont disposent les agriculteurs (encadré 4.1 et Tordjman *et al.*, 2005). En définitive, l'analyse de ces différents niveaux de marges de manœuvre et de leur mobilisation selon les exploitations permet d'orienter l'agronome soit vers la

Encadré 4.1. Modèles de successions de cultures sous tunnel permettant de pratiquer la solarisation (d'après Tordjman *et al.*, 2005).

Modèle S0 : succession de culture traditionnelle



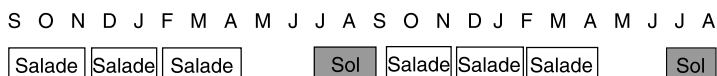
Modèle S1 : remplacement de la culture d'été par une culture de printemps (1 an sur 2)



Modèle S2 : remplacement de la culture d'été un an sur deux et augmentation de la sole de salade



Modèle S3 : arrêt de la culture d'été



Si l'agriculteur ne pratique pas de cultures d'été sous tunnels, l'introduction de la solarisation entraîne seulement des modifications de niveau 1 (travail du sol, humidification, pose du paillage plastique puis extraction du paillage sous le tunnel). Lorsque la solarisation est introduite dans les successions de cultures traditionnelles (S0), qui associent la culture de salade en hiver à la culture de tomate en été, des marges de manœuvre doivent être trouvées au niveau de l'assolement ou de la stratégie même de l'exploitation. Trois niveaux d'adaptation ont été observés :

- remplacement de la culture d'été par une culture de printemps à cycle court (S1) pour concilier sur chaque parcelle une culture de salade en hiver, une culture de printemps et la solarisation en été une année sur deux ;
- suppression de la culture d'été sur la moitié de la sole (S2) : la salade puis la culture d'été en année n , un ou deux cycles de salade puis la solarisation en année $n + 1$;
- arrêt de la culture d'été et monoculture de salade plus ou moins intensive (S3). Il est alors possible d'augmenter la culture de salade en faisant se succéder deux, voire trois cycles en hiver, avec solarisation chaque année en été.

recherche de nouvelles marges de manœuvres par la combinaison d'innovations techniques à la parcelle à l'échelle de la sole, soit vers l'adaptation des innovations techniques aux marges de manœuvres des exploitations, ce qui pose de nouvelles questions agronomiques : par exemple, quels risques prennent les agriculteurs à retarder et à raccourcir un peu la solarisation ?

Le second exemple concerne la multiplication des cahiers des charges et la gestion des systèmes de culture. La segmentation forte du marché de la pomme de terre en France touche aussi bien le marché industriel (chips, frites surgelées, *baby-food*¹⁹, etc.) que celui du frais (différenciation variétale, caractère « lavable », types de marchés — export, grande distribution...). La coexistence fréquente de plusieurs cahiers des charges visant différents segments de marchés au sein d'une même exploitation conduit l'agronome à s'interroger quant aux répercussions de cette diversité sur la constitution des systèmes de culture (Wünsch, 2004). Les critères pour la pomme de terre ont ainsi pu être classés en trois catégories du point de vue de l'agriculteur : « obligatoire », « recommandé », « indifférent »²⁰. Les travaux menés sur ces systèmes montrent que les décisions techniques des agriculteurs s'articulent alors autour de quatre principes.

Tout critère technique obligatoire est respecté par l'agriculteur pour la ou les catégories de pommes de terre concernées, et ce respect s'étend à la plupart des techniques recommandées (le premier principe est le respect d'une obligation, voire d'une recommandation) : c'est le cas par exemple de toutes les obligations variétales. *A contrario*, pour toute opération « indifférente », l'agriculteur simplifie l'opération en l'homogénéisant à l'échelle de la sole (un seul lot de parcelles est concerné par les modalités ou par les dates de plantation, de désherbage ou de buttage). Ce deuxième principe, dit « de simplification », correspond au mode de gestion d'une sole, analysé au chapitre 2. La combinaison de ces deux principes aboutit à un troisième, appelé « effet d'entraînement » : lorsqu'une opération est obligatoire sur l'une des catégories de pommes de terre, elle est extrapolée à la sole, sauf contradiction avec une autre obligation sur la même opération : par exemple pour la fertilisation azotée, la méthode du bilan prévisionnel de raisonnement de la fertilisation est extrapolée à la sole mais sans autre mesure de reliquat (la parcelle « obligée » sert ainsi de parcelle-guide pour la détermination des doses d'azote sur la sole). Un quatrième principe est identifié : cet effet d'entraînement ne joue pas lorsque le coût en argent ou en temps est jugé trop lourd par l'agriculteur, ou bien si les risques encourus sont jugés trop importants ; par exemple, les produits phytosanitaires spécifiques d'une parcelle en *baby-food* ne sont pas utilisés ailleurs dans la sole, car trop coûteux. En définitive, pour chaque opération culturale, l'agriculteur intègre les contraintes issues des cahiers des charges *via* ces principes : chaque opération conduit ainsi à un nombre de « lots » de parcelles inférieur au nombre de cahiers des charges. On constate également que ces exigences ou recommandations peuvent aussi jouer pour l'agriculteur un rôle d'aide à la décision technique, en indiquant une modalité, un positionnement temporel ou un mode de raisonnement qu'il pourra extrapoler à la sole.

19. Alimentation enfantine.

20. « Obligatoire » signifie que l'exigence et les moyens de contrôle sont spécifiés dans le contrat ; « recommandé » signifie que l'aspect considéré est inscrit dans le contrat, mais sans contrôle ; « indifférent » signifie qu'il n'en n'est pas fait mention par l'aval de la filière.

Scénarios d'organisation de bassins d'approvisionnement

Au-delà d'un diagnostic des problèmes qualitatifs et de la conception d'outils techniques et d'outils d'aide à la décision des agriculteurs, on peut utiliser le cadre de ce système, embrassant les coordinations entre agriculteurs et entreprises, pour dessiner à l'échelle du bassin d'approvisionnement de nouvelles organisations globales qui permettent aux acteurs de simuler les effets de leurs décisions. Ainsi dans l'exemple sur le maraîchage vu plus haut, on constate que c'est à l'échelle du bassin que les coordinations entretenues entre exploitations et entreprises permettent de retrouver de la flexibilité, en fournissant par exemple un soutien organisationnel aux exploitations (groupement d'emploi de main-d'œuvre, aides à la construction d'abris, fournitures de plants...) ou en coordonnant les apports des différents agriculteurs produisant sur des périodes différentes.

Il en est de même des travaux sur la modélisation des approvisionnements des sucreries qui se concentrent sur une phase délicate pour la qualité (importance des délais entre la récolte et la livraison, voir Semenzato, 1995 ; Hansen *et al.*, 2002) ou sur la gestion de la quantité de sucre globale (Gaucher *et al.*, 2003 ; Higgins *et al.*, 2004 ; Le Gal et Lejars, 2004). Dans ces travaux on simule, à travers la combinaison de deux modèles conceptuels — logistique et stratégique —, les effets sur la quantité globale de sucre extractible de différentes organisations des livraisons, adaptées d'une part aux composantes agropédologiques de la production de cannes, et d'autre part aux composantes économiques des contrats liant les planteurs aux usines. Basées sur des modélisations statistiques du rendement et de la richesse en sucre par grande région, ces simulations gagneraient sans doute à intégrer des modèles de culture pour affiner ces estimations, sous réserve que les variables d'entrée de ces derniers soient simplifiées (Cheeroo-Nayamutha *et al.*, 2000). C'est ce type de combinaison qui est mis en œuvre aujourd'hui dans les études sur la coexistence OGM/non-OGM dans les filières. Étudiant la faisabilité de filières sans OGM, des équipes pluridisciplinaires alliant généticiens, mathématiciens, économistes et agronomes testent des situations réalistes d'organisation de bassins d'approvisionnement (Meynard et Le Bail, 2001) ou d'exploitations (Angevin *et al.*, 2002), au moyen de simulations qui utilisent les modèles de flux de gènes disponibles pour évaluer les risques de dépassement des seuils de pureté dans les lots collectés. Pour aller plus loin, de telles simulations peuvent être utilisées dans des dispositifs d'aide à la négociation entre les acteurs d'un même territoire, en utilisant jeux de rôle et systèmes multi-agents (d'Aquino *et al.*, 2001 ; Guerrin et Paillat, 2003).

► Qualification des pratiques

Les exigences de garanties sur les pratiques agricoles qui ne cessent de s'intensifier ont en commun la volonté, exprimée par les opérateurs d'aval des filières — porteur du consommateur — ou par les pouvoirs publics — représentants du citoyen —, de réduire les risques de non-respect de la réglementation, de l'environnement ou de la qualité des produits. Elles s'appuient d'une part sur des référentiels qui définissent sur quelles modalités porte la garantie (l'application d'une

technique, l'emploi d'un outil d'aide à la décision...), et d'autre part sur des instruments qui assurent la crédibilité de cette garantie : des audits, des contrôles internes ou par tierce partie. Ces exigences de garanties se concrétisent dans deux grandes formes, l'une sectorielle et l'autre transversale. La forme sectorielle correspond à l'élaboration, pour un produit ou pour un problème environnemental donné, de dispositifs s'appuyant sur des contrats, des normes, et qui se traduisent pour les agriculteurs par la nécessité de respecter des référentiels par culture, par problème environnemental. Par conséquent, d'un point de vue technique, ces engagements visent généralement une gestion à l'échelle de la parcelle. La forme transversale correspond à l'élaboration, à l'échelle de l'exploitation, d'une analyse des risques finalisée par le triptyque « réglementation-environnement-qualité » et inspirée de celles qui prévalent dans les systèmes d'assurance qualité des entreprises²¹.

Dans l'un ou l'autre cas, les agronomes sont sollicités pour concevoir les référentiels et les actualiser au gré de l'évolution des connaissances, en identifiant simultanément comment les modalités répertoriées peuvent être vérifiées, ce que nous illustrons ci-dessous sur l'exemple de Quali'Terre®, référentiel transversal français. Mais ces mêmes connaissances peuvent aussi être mobilisées pour évaluer les référentiels au titre de leurs effets sur les systèmes de cultures et sur les marges de manœuvre des agriculteurs, ce que nous illustrons ensuite sur des cahiers des charges sectoriels en grande culture.

Concevoir des référentiels

En France, la démarche Quali'Terre®, née en 1996 à l'initiative des chambres d'agriculture de la région Picardie, a cherché à restaurer la confiance des consommateurs dans les produits agricoles régionaux et à faire face à la multiplication des cahiers des charges par produit émis par l'aval, en redonnant aux agriculteurs l'initiative de la qualité, afin que la démarche soit un outil de développement régional et non une contrainte supplémentaire imposée (Mazé *et al.*, 2004b). D'emblée, une démarche transversale à l'exploitation a été préférée à une démarche sectorielle. Cette approche a d'abord consisté à définir par consensus ce que pouvait être la « qualité globale » d'une exploitation, résumée à travers :

- les pratiques agricoles, vues de façon générique, comme devant garantir conjointement des objectifs de sécurité sanitaire des aliments et de protection de l'environnement ;
- l'accessibilité à un tiers (consommateur, entreprise, visiteur...) des informations sur l'exploitation et ses modes de production ;
- l'insertion de l'exploitation dans son environnement local et dans ses relations à l'extérieur (limitation des gênes de voisinage, accueil, etc.).

L'approche transversale a ensuite pris en compte l'existence, au sein de chaque exploitation, de plusieurs productions et de leur caractère interdépendant (Mazé

21. La plupart des référentiels, tant en France qu'en Europe, sont élaborés pour une production particulière ou pour un groupe de productions comme celui des céréales et souvent par un des maillons de la filière considérée, mais les préoccupations environnementales sont de plus en plus présentes aux côtés des aspects de qualité des produits eux-mêmes (Manhoudt *et al.*, 2002).

et al., 2000 ; Aubry *et al.*, 2004). Elle insiste en outre sur l'importance d'aborder ces pratiques dans un cadre plus large que celui de la seule conduite des processus techniques, en incluant notamment la gestion de l'information sur l'exploitation.

Pour élaborer un référentiel technique de bonnes pratiques qui puisse servir de perspective aux exploitations de la région et d'indicateur de leurs évolutions, les promoteurs de Quali'Terre® ont résolu d'appliquer une analyse des points critiques, qui emprunte à la gestion industrielle une méthode utilisée pour analyser dans une entreprise les points névralgiques et orienter les préconisations (HACCP²²). Se fondant sur une connaissance préalable et experte des systèmes de production picards, travaillée au sein de groupes d'experts régionaux, l'élaboration concrète de ce référentiel à l'échelle régionale (Aubry et Mousset, 1998) a fait l'objet de trois étapes :

- la réalisation d'une analyse HACCP « théorique » à partir des connaissances agronomiques les plus récentes par rapport au double objectif de sécurité et de protection de l'environnement ;
- la hiérarchisation des risques et l'identification des actions préventives ou correctrices possibles par rapport à une diversité connue des systèmes, de grandes cultures et d'élevage pertinents localement, en faisant appel à des groupes d'experts régionaux ;
- le test en exploitation de la faisabilité de ce référentiel.

Pour les deux premières étapes et concernant spécifiquement la conduite des différentes cultures, la méthode s'est appuyée sur une double entrée : les opérations culturales puis, en leur sein, les étapes du processus (préparation de l'activité, réalisation au champ, post-champ, etc.). Une illustration en est donnée (*tableau 4.5*) pour la protection phytosanitaire des cultures, qui est un bon exemple de risques transversaux car les étapes situées avant et après l'intervention au champ, donc non spécifiquement liées à une culture, sont celles qui engendrent le plus de risques, tant pour la sécurité sanitaire que pour l'environnement ou la santé de l'applicateur.

La traduction en « bonnes pratiques » a été réalisée en classant les différentes mesures préventives ou correctrices envisageables en fonction de quatre critères : réglementation, efficacité par rapport aux objectifs, faisabilité par l'agriculteur, possibilité de contrôle par un tiers. Deux niveaux ont été alors définis par les experts : le niveau A comporte les pratiques considérées comme obligatoires (notamment parce que réglementaires) et qui doivent s'appliquer à toutes les exploitations ; le niveau B comporte des mesures plus difficiles à mettre en œuvre mais très efficaces ou efficaces conjointement sur plusieurs risques, ou relatives à certains contextes de systèmes de production ou de milieu. Pour les critères de niveau B, il a été décidé qu'une exploitation doit respecter au minimum 80 % de ces critères pour être conforme au référentiel et pouvoir prétendre à la qualification Quali'Terre®.

La validation *in situ* de l'application du référentiel dans des exploitations agricoles a permis d'apporter des améliorations sensibles dans la formulation des points du

22. Hazard analysis critical control point : analyse des points critiques pour détecter les risques et les maîtriser.

Tableau 4.5. Identification des risques dans la protection phytosanitaire des cultures (HACCP des systèmes de production agricoles).
D'après Aubry et Mousset, 1998.

Risques	Mécanismes	Étapes du processus concernées	Remarques
Santé du consommateur	- accumulation de résidus toxiques dans les produits agricoles - contamination de l'eau	- traitement au champ - traitement postrécolte - avant, pendant et post-traitement	- concerne l'exploitation mais aussi la filière
Santé de l'opérateur	- intoxication aiguë ou chronique par contact ou par inhalation	- avant traitement (manipulation des produits, préparation des bouillies) - traitement (inhalation) - post-traitement (nettoyage)	- toutes étapes concernées ; problème souvent méconnu - des certifications des opérateurs donnent des garanties de compétence
Ressource en eaux superficielles	- ruissellement	- avant traitement (débordement des cuves, fuite des stocks) - traitement - post-traitement (vidange, rinçage des cuves)	- plus risque contamination directe du circuit d'eau lors du remplissage - risque élevé sur sol nu
Ressource en eaux profondes	- lessivage	- traitement	- dépend de la solubilité du produit et des conditions d'application
Ressource en air	- volatilisation (codistillation)	- traitement	- dépend de la volatilité des produits, des conditions météo lors de l'application
Ressource en sol	- adsorption	- traitement	- dépend de la solubilité du produit, de sa rémanence et des produits de sa dégradation

référentiel et dans leur compréhension par les conseillers et par les auditeurs. En effet, malgré le soin apporté pour limiter les contraintes de mise en œuvre pour les agriculteurs, il s'est avéré lors du test que moins de 10 % des exploitations pouvaient, tous systèmes de production confondus, être qualifiées d'emblée : ce sont pour l'essentiel des contraintes organisationnelles²³, notamment de gestion de l'information sur l'exploitation, qui sont les principales difficultés rencontrées dans l'application du référentiel par les agriculteurs. Ainsi, le caractère transversal du référentiel constitue aussi pour les agriculteurs sa difficulté. Le référentiel Quali'Terre® est devenu l'un des socles du référentiel technique de l'agriculture raisonnée (Paillotin, 2000) : cette extension dans d'autres régions oblige cependant à revoir la hiérarchie des risques en fonction des caractéristiques propres à chaque région (milieux, diversité interne des systèmes de production). Ce type d'initiatives de certification participative dans lesquelles agriculteurs, pouvoirs publics, interprofession et industriels sont impliqués se multiplie en Europe (*Little Red Tractor* en Grande-Bretagne, *Produzione Integrata* en France, *Qualità Controllata* en Italie...).

Évaluer les effets prévisibles des référentiels sur les systèmes de culture

Comme en matière d'environnement (Bockstaller et Girardin, 2003 ; Manhoudt *et al.*, 2002), se pose la question de l'évaluation des effets des référentiels sur les performances qualitatives attendues ainsi que nous l'avons évoqué plus haut, en montrant comment des indicateurs à différentes échelles peuvent être mobilisés (voir pp. 293-295 et 303 en particulier). Si certains effets des cahiers des charges sur les systèmes de culture ont bien été montrés (pp. 298-302), il reste la question de savoir si ces impacts peuvent être évalués *a priori* sur la seule base des connaissances agronomiques disponibles et du contenu des référentiels. Les référentiels proposés aux agriculteurs ont en effet rarement été conçus par des agronomes, et relèvent en tout cas toujours d'objectifs propres aux opérateurs qui les promeuvent en superposant souvent plusieurs objectifs : garantir la qualité, maintenir une image de marque, se singulariser par rapport à la concurrence, recueillir de l'information sur les pratiques... Ainsi les effets de l'application d'un référentiel sur les systèmes de culture sont-ils susceptibles de dépasser les objectifs affichés. De quelle grille d'analyse se dote-t-on pour évaluer de tels effets, et de quelles informations a-t-on besoin pour mener cette analyse à bien ?

Pour l'agriculteur qui s'engage à respecter un référentiel sectoriel, il s'agit en somme d'appliquer un modèle de conduite de culture conçu indépendamment de ses propres objectifs et de ses propres modes de fonctionnement. Si la prise en compte par les agriculteurs des processus de décision technique améliore la conception des systèmes de culture (voir les chapitres 2 et 3), elle permet aussi d'évaluer

23. Et non financière, par des investissements nécessaires pour respecter certains points du référentiel, comme on le pensait *a priori* : l'analyse montre que le niveau moyen d'investissement nécessaire est pour plus de la moitié des exploitations inférieur à 3 000 euros, et des simulations réalisées sur ces exploitations montrent que, même en levant cette contrainte financière, la plupart n'atteignent pas le niveau requis du référentiel.

les référentiels proposés. Quel que soit le référentiel considéré, il est possible d'évaluer de quelle façon chacun des engagements qu'il contient affecte les décisions des agriculteurs qui conduisent à la constitution des systèmes de culture. Menée sur une quinzaine de référentiels en grandes cultures présents dans une région française (Vaucelle et Le Bail, 2004b), une telle analyse dégage deux enseignements. Tout d'abord, l'application d'une grille d'analyse croisant les exigences d'un référentiel avec les variables constitutives des systèmes de culture (chapitre 2 et Aubry *et al.*, 1998a et b) permet de recenser de façon systématique, à partir de la simple lecture du référentiel, les effets potentiels sur les systèmes de culture impliqués²⁴, mais elle ne suffit pas à hiérarchiser ces effets. Par ailleurs, cette hiérarchisation suppose *a priori* des enquêtes dans les exploitations, mais elle peut être approchée à l'aide de deux types d'information complémentaires. Une connaissance générale des successions de cultures et des itinéraires techniques pratiqués dans la région où le référentiel est proposé permet d'abord d'écarter certains effets : si la succession blé-blé est très rare dans une région, son interdiction ne constitue pas une contrainte forte. Par ailleurs, la manière de contrôler le respect de l'exigence joue sur cette hiérarchie. Des exigences peuvent s'avérer invérifiables, comme la prise en compte du sens et de la vitesse du vent dans la décision de traiter une parcelle, ou de fait peu vérifiées.

On identifie ainsi les principaux effets possibles et, connaissant les liens entre les variables décisionnelles étudiées, on peut évaluer la portée des effets du référentiel sur la parcelle engagée, sur la sole, sur le système de culture dans son ensemble, voire sur les autres systèmes de culture de l'exploitation. Ceci permet de faire des hypothèses sur la viabilité du référentiel, qui est souvent voué à être combiné avec d'autres.

Si l'analyse que l'on propose permet bien d'évaluer *a priori* les effets d'un référentiel sur les systèmes de culture, pour être utile elle doit être localisée. Elle requiert en outre une connaissance fine du référentiel, incluant les dispositifs de contrôle de son application. En effet, la crédibilité du dispositif repose souvent sur une formalisation des informations demandées aux agriculteurs pour apporter les preuves de leurs pratiques, formalisation qui fait l'objet de tensions entre la gestion interne à l'exploitation et la traçabilité (Mazé *et al.*, 2004a).

24. Par exemple la limitation de la zone cultivable d'une culture ou la modification des modalités d'intrants pour une opération culturale.

Conclusion

François PAPY, Marianne LE BAIL, Philippe MARTIN

Le chapitre 2 a montré comment l'exploitation agricole était un objet d'investigation pour l'agronomie : un lieu d'analyse de l'interdépendance des systèmes de culture qui y sont pratiqués, de diagnostics sur les marges de manœuvre des agriculteurs et de propositions innovantes de conduite des cultures. Dans les chapitres 10 et 11, les questions relatives à la préservation des ressources naturelles et à la qualité des produits nous ont conduits à analyser, à diagnostiquer et à concevoir des systèmes techniques à des échelons d'organisation qui dépassent celui de l'exploitation agricole.

Que ce soit pour gérer des processus écologiques mettant en jeu des flux de matière, des évolutions de populations et de biotopes, ou encore un système d'approvisionnement d'une structure de collecte, des coordinations d'actes techniques s'avèrent nécessaires entre différents acteurs. Les agriculteurs d'un même territoire, mais aussi les collectivités locales, les administrations, les associations, les entreprises de collectes, les distributeurs alimentaires, les consommateurs, les organismes de certification... se trouvent peu ou prou impliqués. Aussi l'agronomie élargit-elle son champ d'investigation à des systèmes techniques (Osty *et al.*, 1998) vus comme des dispositifs d'actions logiques et ordonnées, appliqués aux objets de processus biophysiques à l'échelon d'un territoire, par différents acteurs coordonnant les finalités poursuivies. L'ensemble des objets que sont les parcelles servant à approvisionner une structure de collecte, les routes, les installations de tri et de stockage localisées sur les trajets, mais aussi les procédures de prévision de l'orientation des récoltes vers telle ou telle qualité, les règles de tri ou de regroupement des lots, etc. constituent un exemple de système technique ; de même une retenue d'eau dans un bassin versant et les règles qui président à sa localisation, à son dimensionnement en fonction des systèmes de culture pratiqués en amont ainsi que les préconisations de conduite des cultures pour limiter le comblement de cette retenue ; de même un réseau d'irrigation et les procédures de prévision des besoins en eau des cultures et les règles de distribution... Ces différents systèmes techniques, mis en œuvre ou en cours d'élaboration, impliquent des ententes plus ou moins formelles entre acteurs sur des finalités plus ou moins partagées. Pour les agriculteurs d'un territoire donné,

il peut s'agir, dans certains cas, de généraliser un mode de conduite des cultures qui, par addition, suffit à atteindre l'objectif : par exemple un itinéraire technique pour augmenter les chances d'obtenir la qualité recherchée en orge de brasserie, ou encore l'introduction de pratiques d'interculture pour réduire le ruissellement érosif ou la lixiviation des nitrates. Souvent, il faut aller plus loin en recherchant des interactions de conduite des cultures entre les différentes parcelles et entre les exploitations ; nous avons abordé de tels cas, et plus précisément la coordination des règles d'assolement entre exploitations voisines pour réduire le ruissellement érosif, ou entre exploitations aux époques de livraison différentes pour assurer la continuité d'approvisionnement en salade d'une structure de collecte.

Traditionnellement, l'agronomie avait comme interlocuteurs privilégiés les agriculteurs et les différents systèmes de conseils qui les entourent. Avec les questions d'environnement et de qualité des produits, nous voyons qu'elle prend une place de plus en plus grande dans la compréhension et la conception de normes de culture pour répondre à des objectifs qui ne se limitent plus à la production de masse. Elle a un rôle à jouer dans les relations des sociétés avec leurs agricultures. En collaborant avec les disciplines écologiques au sens large ou à la technologie des produits, elle a à construire des connaissances qui permettent d'évaluer les performances des systèmes techniques. En collaborant avec les disciplines sociales, elle doit contribuer à la compréhension et à l'élaboration de systèmes techniques ; à tout le moins, elle a à rendre explicites les logiques techniques des agriculteurs, bien souvent ignorées par les autres acteurs. Dans des démarches d'apprentissage collectif du genre de celle que nous avons évoqué dans la qualification des exploitations agricoles, sa spécificité porte sur la mise en évidence et la recherche de cohérences techniques entre les objectifs visés et la diversité des milieux sur le territoire concerné. C'est dans cette perspective qu'elle sera de plus en plus appelée à concevoir des outils d'aide à la concertation entre acteurs.

Pour en savoir plus

Burel et Baudry, 1999 ; Darré, 1994 ; Deffontaines et Brossier, 1997 ; Malézieux *et al.*, 2001 ; Moity-Maïzi *et al.*, 2001 ; Monestiez *et al.*, 2004 ; Paillotin, 2000 ; Prevost, 2005 ; Riou *et al.*, 1997 ; Vaudour E., 2003.

Conclusion générale

Thierry DORÉ, Marianne LE BAIL,
Philippe MARTIN, Bertrand NEY, Jean ROGER-ESTRADE

Cet ouvrage a présenté l'ensemble des acquis récents de l'agronomie, et leur valorisation à travers quelques exemples. Il montre à quel point l'agronomie a un rôle essentiel à jouer dans les débats et les enjeux de société qui concernent la production végétale et l'utilisation des espaces ruraux, à travers les connaissances et les méthodes qu'elle produit. En effet, comment décider d'un degré d'artificialisation des milieux à travers des choix d'agriculture, sans connaître les performances économiques et environnementales des systèmes possibles, et sans savoir à quelles conditions ces systèmes sont susceptibles d'être adoptés par les agriculteurs ? Comment mesurer les risques et les bénéfices liés aux organismes génétiquement modifiés, si les effets des pratiques agricoles sur les flux de graines et de pollen qui contiennent les transgènes ne sont pas connus et quantifiés, et si l'impact de leur introduction sur le reste des systèmes de culture, à savoir les modifications dans les successions de culture, dans le travail du sol, dans la protection des cultures, n'est pas analysé et mesuré ? Comment prévenir les risques sanitaires issus de la consommation des produits végétaux si on ignore la manière dont les modes de conduite des cultures affectent les contaminations, et de quelle façon des systèmes de culture minimisant les risques peuvent être intégrés dans les exploitations agricoles, et plus largement dans les filières d'approvisionnement ? Pour pouvoir contribuer à éclairer les débats issus de ces questions diverses et parfois divergentes, notre discipline devra continuer à évoluer.

Un premier point d'évolution concerne les relations que l'agronomie entretient et entretiendra avec les disciplines plus analytiques. Comme on l'a vu, beaucoup de travaux en agronomie sont menés en collaboration, parfois très étroite, avec d'autres disciplines qui partagent le même objet : les recherches sur la protection intégrée des cultures par exemple, effectuées dans le cadre de programmes communs entre agronomes et spécialistes de la biologie des bioagresseurs, témoignent de cette collaboration. Ces disciplines ont une approche plus fine des mécanismes, mais *a contrario* prennent moins en considération le système de culture que ne le fait l'agronomie. Par ailleurs, les agronomes utilisent des concepts, des

méthodes, des résultats de disciplines plus fondamentales, comme la physique dans les travaux concernant les effets des pratiques agricoles sur les risques de dégradation de la structure du sol, ou encore la géomatique pour la représentation spatialisée de l'effet des systèmes de culture. À l'évidence, ces interfaces ou inter-pénétrations des disciplines sont fécondes et nécessaires pour déboucher sur des résultats scientifiques utilisables dans la pratique. Cependant, les dynamiques des disciplines analytiques et des disciplines davantage tournées vers l'action comme l'agronomie ne sont pas spontanément convergentes, et leur jonction n'est possible qu'à partir d'une attitude volontariste partagée, refusant d'opposer le systémique et l'analytique, et cherchant à incorporer les connaissances les plus récentes sur les processus dans des représentations du fonctionnement de systèmes plus complexes. Cette attitude constitue une voie d'avenir certes étroite et exigeante, mais probablement très fructueuse pour progresser sur des questions comme, par exemple, la préservation des qualités des sols agricoles.

En parallèle, on peut s'interroger sur la manière dont l'agronomie va évoluer dans son approche de systèmes complexes, qui constitue l'une de ses caractéristiques : c'est bien parce que les actions dont se préoccupe l'agronomie portent sur des systèmes complexes¹ que l'agronomie conservera, pour traiter ses différents objets, une approche systémique. Des rapprochements avec d'autres disciplines traitant de tels systèmes, au premier rang desquels l'écologie, pourront apporter des renouvellements méthodologiques fructueux. Au-delà, il y a matière à s'interroger sur la place que l'agronomie prendra dans des mouvements globaux de disciplines comme celui qui se traduit par l'émergence de l'agroécologie². Celle-ci est parfois définie comme la discipline scientifique dont l'objectif est d'évaluer, sur une base objective et fondée sur le plan écologique, la structure et la fonction, selon leurs différentes échelles spatiales et leurs différentes dimensions — écologique, économique, sociale, éthique et légale —, des systèmes alimentaires (Sims *et al.*, 2004 ; voir Dalggaard *et al.*, 2003 pour une présentation de l'histoire de l'agroécologie). À la lecture de l'ouvrage de Rickerl et Francis (2004) ou de l'article de Clements et Shrestha (2004), il s'agit d'un ensemble syncrétique qui repose sur un principe : la nécessité de développer des approches holistiques pour faire face aux problèmes planétaires. Deux convergences fortes avec les évolutions de l'agronomie telles qu'évoquées dans notre ouvrage sont notables : la nécessité de s'ouvrir vers des dimensions autres que productives, et le choix de privilégier une approche systémique. Néanmoins, à ce jour, si l'agroécologie est une source stimulante de questionnements, elle n'est pas présentée à travers des concepts propres à cette discipline qui dépasseraient la juxtaposition pluridisciplinaire classique ; elle ne traite pas non plus de manière complètement satisfaisante la question des échelles pertinentes pour l'action. Il est ainsi difficile d'évaluer si de tels mouvements vont transcender les disciplines classiques ou si, peut-être plus vraisemblablement, ils vont amener les différentes disciplines à s'ouvrir davantage les unes aux autres.

1. Les propriétés d'un système complexe ne sont pas directement déductibles d'une analyse des propriétés des différents constituants de ce système.

2. Ce terme est employé dans les communautés agricole et scientifique avec des acceptions très différentes. Nous écartons ici les significations restreintes d'« écologie appliquée à l'agriculture » et d'« agriculture écologique », pour ne considérer que l'agroécologie comme nouvelle discipline scientifique.

Enfin, le lien de l'agronomie avec l'action, abondamment illustré dans toutes les parties de cet ouvrage, est un autre moteur d'évolution de la discipline. La manière dont ce lien à l'action influence la production et l'utilisation de connaissances agronomiques nécessiterait de longs développements qui ne seront pas menés dans cet ouvrage généraliste ; quelques points importants peuvent toutefois être soulignés. Le type de connaissances produites, c'est-à-dire leur nature (comme la production non seulement de connaissances sur le fonctionnement d'une espèce cultivée sous différents mode de conduite, mais aussi la production d'indicateurs de performance ou de pilotage) et leur forme (par exemple des modèles cognitifs et des modèles pour l'aide à la décision), n'ont cessé d'être interrogés par cette finalisation de la discipline. Dans ce domaine, le compagnonnage avec les disciplines des sciences économiques et sociales a été essentiel et le demeurera, d'autant plus que se diversifient les acteurs de l'aide à la décision auxquels l'agronomie doit apporter des éléments. Par ailleurs, la nécessité de traiter d'objets scientifiques nouveaux comme ceux évoqués dans la partie 4 est le fruit du constat que l'atteinte de différents objectifs de production ou environnementaux liés à l'agriculture passe aujourd'hui par des actions à des échelles différentes de la parcelle agricole impliquant, avec les agriculteurs, d'autres acteurs dans des décisions individuelles ou collectives plus ou moins organisées. À l'avenir, on peut imaginer que d'autres objets pourraient exiger l'attention des agronomes dès lors, par exemple, que ces derniers seraient sollicités pour fournir les connaissances nécessaires à l'élaboration des politiques agricoles ou environnementales à des échelles nationales ou européennes. Enfin, le caractère finalisé de cette discipline confère une responsabilité particulière quant aux usages qui sont faits des connaissances produites. Cette responsabilité existait déjà quand les agriculteurs constituaient l'essentiel des interlocuteurs des agronomes, à chaque fois que le rôle assigné à l'agriculture faisait l'objet de désaccords, et que les connaissances produites étaient associées à un modèle particulier d'agriculture. Elle continuera d'autant plus d'exister que les acteurs auxquels l'agronomie s'adresse se diversifient. De ce point de vue, l'agronomie aura certainement à approfondir la manière dont ses priorités de recherche sont définies en relation avec les attentes de la société, et la manière dont ses résultats sont mis à disposition des individus et des groupes sociaux ou organismes, et appropriables par eux.

Références bibliographiques

A

- Abadin J., Gonzalez-Prieto S.J., Sarmiento L., Villar M.C., Carballas T., 2002.** Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes, *Soil Biol. Biochem.*, 34 (11) : 1739-1748.
- Académie d'agriculture de France, 1988.** Les processus de prise de décision des agriculteurs, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (4) : 42-96.
- Addiscott T.M., Withmore A.P., Powlson D.S., 1991.** *Farming, fertilisers and the nitrate problem*, Wallingford, Cabi, 170 p.
- Adkins S.W., Tanpipat S., Swarbrick J.T., Boersma M., 1998.** The influence of soil moisture content on glyphosate efficacy for the control of annual grasses in fallow land, *Weed Res.*, 38 (2) : 119-127.
- Aertsens F., Michi H., 2004.** *Coniothyrium minitans*, un champignon du sol contre le sclérotinia de nombreuses cultures, *Phytoma – La défense des végétaux*, 571 : 33-35.
- Affholder F., Scopel E., Madeira Neto J., Capillon A., 2003.** Diagnosis of the productivity gap using a crop model. Methodology and case study of small-scale maize production in central Brazil, *Agron.*, 23 : 305-325.
- Afnor, 1992.** *Gérer et assurer la qualité. Tome 1 : Concepts et terminologie. Recueil de normes*, Paris, Afnor, 393 p.
- Agostini D., De Sainte-Marie C., Prost J., Bouffin J., Delprat V., 1996.** Quelle démarche de recherche sur la qualité pour une production locale ? La clémentine de Corse, *Fruits*, 51 : 407-415.
- Agüera F., Villalobos F.J., Orgaz F., 1997.** Evaluation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes differing in early vigour using a simulation model, *Eur. J. of Agron.*, 7 : 109-118.
- Alabouvette C., Couteaudier Y., Louvet J., 1985.** Recherches sur la résistance des sols aux maladies – XII. Activité respiratoire dans un sol résistant et un sol sensible aux fusarioses vasculaires enrichis en glucose, *Agron.*, 5 (1) : 69-72.
- Alen M., Prusinkiewicz P., DeJong T., 2004.** Using L-system for modeling the architecture and physiology of growing trees: the L-Peach model, in Godin C. et al. (eds.), *IV International Workshop on Functional Structural Plant Models (FSMP04)*, June 7-11th 2004, Montpellier, Montpellier, Amap, 220-225.
- Allen W.A., Richardson A.J., 1968.** Interaction of light with a plant canopy, *J. Opt. Soc. Amer.*, 58 : 1023-1028.
- Almekinders C.J.M., Fresco L.O., Struik P.C., 1995.** The need to study and manage variation in agro-ecosystems. *Neth. J. Agric. Sci.*, 43 : 127-142.
- Altieri M.A., 1999.** The Ecological Role of Biodiversity in Agroecosystems, *Agric., Ecosyst. Environ.*, 74 : 19-31.
- Altieri M.A., Glaser D.L., Schmidt L.L., 1990.** Diversification of agroecosystems for insect regulation: experiments with collards, in Gliessman S. (ed.), *Agroecology, researching the ecological basis for sustainable agriculture*, *Ecol. Stud.*, Springer-Verlag, New York, 78 : 70-82.
- Amborabé E., Aziz A., Trotel-Aziz P., Quantinet D., Dhuicq L., Vernet G., 2004.** Stimulation des défenses naturelles de la vigne ; essais d'emploi du chitosan contre *Botrytis cinerea*. *Phytoma – La défense des végétaux*, 571 : 26-29.
- Amézketa E., 1999.** Soil aggregate stability: A review, *J. Sustainable Agric.*, 14 : 83-151.
- Anaya A.L., 1999.** Allelopathy as a tool in the management of biotic resources in agroecosystems, *Crit. Rev. Plant Sci.*, 18 (6) : 697-739.
- Andler D., 1987.** Problème. Une clé universelle ? In Stengers I. (dir.), *D'une science à l'autre. Des concepts nomades*, Paris, Seuil, 119-159.
- Andrade F.H., Uhart S.A., Cirilo A., 1993.** Temperature affects radiation use efficiency in maize, *Field Crop Res.*, 32 : 17-25.
- Andrade D.S., Colozzi-Filho A., Giller K.E., 2003.** The soil microbial community and soil tillage, in El Titi A. (ed.), *Soil Tillage in Agroecosystems*, Boca-Raton, CRC Press, 51-82.

- Angevin F., Colbach N., Meynard J.-M., Roturier C., 2002. Analysis of necessary adjustments of farming practices, in IPTS (ed.), *Scenarios for co-existence of genetically modified, conventional and organic crops in European agriculture*, Brussels, European Commission, p. 128.
- d'Aquino P., Étienne M., Barreteau O., Le Page C., Bousquet F. 2001. Jeux de rôle et simulations multi-agents, in Malézieux et al. (eds.), *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, Paris, Cirad, 373-390.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.-C., Jayet P.-A., Soussana J.-F., Stengel P., 2002. *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* Paris, Inra, 332 p.
- Asseng S., Turner N.C., Ray J.D., Keating B.A., 2002. A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat, *Eur. J. of Agron.*, 17 : 123-141.
- Asteraki E.J., Clements R.O., O'Donovan G., Clifford B.C., Jones A.T., Haggard R.J., Thomas B.J., 1994. Renovation and exploitation of hedges around grassland, in Watt T.A., Buckley G.P. (eds.), *Hedgerow Management and Nature Conservation*, Wye, Wye College Press, 16-24.
- Attonaty J.-M., Chatelin M.-H., Poussin J.-C., 1990a. L'évolution des méthodes et langages de simulation, in Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.-L. (eds.), *Modélisation systémique et système agraire*, St-Maximin, Inra, 119-133.
- Attonaty J.-M., Chatelin M.-H., Poussin J.-C., Soler L.-G., 1990b. Un simulateur à base de connaissance pour raisonner équipement et organisation du travail en agriculture, in Bourguine P., Walliser B. (eds.), *Economics and Artificial Intelligence*, Paris, Afcet, 291-297.
- Aubertot J.N., Pinochet X., Doré T., 2004. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape, *Crop Prot.*, 23 : 635-645.
- Aubry C., 1995. *Gestion de la sole d'une culture dans l'exploitation agricole. Cas du blé d'hiver en grande culture dans la région picarde*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 271 p.
- Aubry C., 2000. Une modélisation de la gestion de production dans l'exploitation agricole, *Rev. Fr. Gestion*, 129 : 32-46.
- Aubry C., Chatelin M.-H., 1997. Farmers's technical decisions representation and decision support, in Ten Berge H.F.M., Stein A. (eds), *Model-based decision support in agriculture*, Proc. of the Inra-KCW workshop on decision support systems, Laon, October 22-23rd, Paris, Inra, 65-71.
- Aubry C., Mousset J., 1998. *Élaboration d'un référentiel de bonnes pratiques*, Inra UMR Sad-APT et Agrotransfert, document de travail.
- Aubry C., Papy F., Capillon A., 1998a. Modeling Decision-making Processes for Annual Crop Management, *Agric. Syst.*, 56 (1) : 45-65.
- Aubry C., Biarnès A., Maxime F., Papy F., 1998b. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole : la constitution des systèmes de culture, *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 31 : 25-43.
- Aubry C., Paillat J.-M., Guerrin F., 2002. Modélisation conceptuelle de la gestion des matières organiques issues des élevages dans les exploitations agricoles. L'exemple de l'île de la Réunion, in *Actes du séminaire « Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité »*, 19-22 juin 2002, Montpellier, Cirad, 121 p.
- Aubry C., Galan M.-B., Mazé A., 2005. Garanties de qualité dans les exploitations agricoles : exemple de l'élaboration du référentiel Quali'Terre® en Picardie, *Cah. Étud. Rech. Fr. Agric.*, 3 (14) : 313-322.
- Aubry C., Latiri-Souki K., Doré T., Griner C., 1994. Diagnostic des facteurs limitants du rendement du blé dur en parcelles d'agriculteurs dans une petite région semi-aride en Tunisie, *Agron.*, 14 : 213-227.
- Aubry C., Chatelin M.-H., Loyce C., Papy F., 2004. Decision support systems for management planning in arable farms, comm. orale au colloque *Biological systems simulation Conference*, March 8-10th, Gainesville, BSSG University of Florida Ed, 8-9.
- Aubry C., Elloumi M., Essamet M., Gana A., Gara M., Gitton C., Khaldi R., Sebillotte M., Soler L.-G., Souki K., 1986. Les systèmes de production dans le semi-aride : première approche de la dynamique des exploitations dans la région de Zaghuan, Tunisie, *Ann. Inrat*, 59 : 230 p.
- Auricoste C., Deffontaines J.-P., Fiorelli J.-L., Langlet A., Osty P.-L., 1985. Points de vue d'agronomes sur l'évaluation des potentialités agricoles des terrains en friches ou en parcours, *Bull. Tech. Inf.*, (399-401) : 301-306.
- Austin R.B., Ford M.A., Edrich J.A., Blackwell R.D., 1977. The nitrogen economy of winter wheat, *J. Agric. Sci.*, 88 : 159-167.
- Autfray P., Oliver R., 2001. *N available for maize (Zea mays) crops on live Chromolaena odorata and Pueraria phaseoloides cover in forest areas of Côte d'Ivoire*, World Congress on Conservation Agriculture, Madrid, October 1-5th 2001, 395-399.

Auzet A.V., 1987. *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agro-nomiques*, Paris, ministère de l'Environnement/ministère de l'Agriculture, Cereg-UA95 CNRS, 60 p.

Ayres P.G., 1991. Growth responses induced by pathogens and other stresses, in *Response of plants to multiple stresses*, Academic Press, 227-248.

Azam-Ali S.N., Squire G.R., 2002. *Principles of tropical agronomy*, Wallingford, Cabi, 236 p.

B

Babu R.M., Sajeena A., Seetharam K., Reddy M.S., 2003. Advances in genetically (transgenic) plants in pest management – an over view, *Crop Prot.*, 22, 1071-1086.

Bachelard G., 1960. *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris, Vrin, 4^e édition, 256 p.

Bajwa W.I., Kogan M., 2004. Cultural practices: springboard to IPM, in Koul O., Dhaliwal G.S., Cuperus G.W. (eds), *Integrated Pest Management: potential, constraints and challenges*, Cabi Publishing, 1-20.

Bajwa W.L., Kogan M., 1996. Compendium of IPM definitions [electronic database], Corvallis, OR: Integrated Plant Protection Center. <http://www.ippc.orst.edu/IPMdefinitions/> (consulté le 02/03/06).

Balabane M., 2005. *Restauration de fonctions et propriétés des sols de grande culture intensive. Effets de systèmes de culture alternatifs sur les matières organiques et la structure des sols limoneux et approche du rôle fonctionnel de la diversité biologique*, rapport final du projet Dmostra/Gessol, coéd. ministère de l'Écologie et du Développement durable-Inra, 119 p.

Balandier P., Lacoite A., Le Roux X., Sinoquet H., Cruiziat P., Le Dizes S., 2000. Simwal: a structural-functional model simulating single walnut tree growth in response to climate and pruning, *Ann. For. Sci.*, 57 : 571-85.

Balandier P., Rapey H., Ruchaud F., de Montard F.X., 2002. Agroforesterie en Europe de l'Ouest : pratiques et expérimentations sylvo-pastorales des montagnes de la zone tempérée, *Cah. Étud. Rech. Fr. Agric.*, 11 : 103-113.

Baldwin J.P., 1976. Competition for plant nutrients in soil: a theoretical approach, Cambridge, *J. Agric. Sci.*, 87 : 321-35.

Balesdent J., 1997. Un point sur les matières organiques des sols. Numéro spécial « le sol, un patrimoine à préserver », *Chambres Agric.*, supplément au n° 856, 17-22.

Ballaré C.L., Casal J.J., 2000. Light signals perceived by crop and weed plants, *Field Crops Res.*, 67 (2), 149-160.

Ballaré C.L., Scopel A.L., Ghera C.M., Sanchez R.A., 1987. The population ecology of *Datura ferox* in soybean crops. A simulation approach incorporating seed dispersal, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 19 : 177-188.

Bancal P., Soltani F., 2002. Source-sink partitioning. Do we need Münch? *J. Exp. Bot.*, 53 (376) : 1919-1928.

Barbeau G., Morlat R., Asselin C., Jacquet A., Pinard C. 1998. Comportement du cépage cabernet franc dans différents terroirs du Val de Loire. Incidence de la précocité sur la composition de la vendange en année climatique normale (exemple de 1988), *J. Int. Sci. Vigne vin.*, 32 : 69-81.

Barber S.A., 1995. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*, New York, John Wiley & Sons, 2nd ed., 414 p.

Bàrberi P., 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Res.*, 42 : 177-193.

Bàrberi P., Lo Cascio B., 2000. Long-term tillage and crop rotation effects on weed seedbank size and composition, *Weed res.*, 41 : 325-340.

Barbier J.-M., Mouret J.-C., 2000. Reconsidérer les formes d'appui aux agriculteurs. Pour une agronomie de l'exploitation agricole. *FaçSade*, 5 : 4 p.

Barbottin A., Lecomte C., Bouchard C., Jeufroy M.-H., 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: genotypic and environmental effects, *Crop Sci.*, 45 : 1141-1150.

Baret F., Fourty T., 1997. Radiometric estimates of nitrogen status of leaves and canopies, in Lemaire G. (ed.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Berlin, Springer, 201-227.

Barralis G., Chadeuf R., 1980. Étude de la dynamique d'une communauté adventice – I. Évolution de la flore adventice au cours du cycle végétatif d'une culture. *Weed Res.*, 20 : 231-237.

Barreteau O., Bousquet F., Millier C., Weber J., 2004. Suitability of Multi-Agent Simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley, *Agric. Syst.*, 80, 255-275.

Barriuso E., Calvet R., Curé B., 1994. Incidence de la simplification du travail du sol sur le

- comportement des produits phytosanitaires : conséquences sur les risques de pollution, in Monnier G., Thévenet G., Lesaffre B. (eds.), *Simplification du travail du sol.*, Paris, Inra, 105-124.
- Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., Soulas G., 1996.** Les pesticides et les polluants organiques des sols – Transformations et dissipation, *Étud. Gestion Sols*, 3 : 179-296.
- Bartholy M.-C., Despin J.-P., Grandpierre G., 1978.** *La science. Épistémologie générale*, Paris, Magnard, 384 p.
- Bassanezi R.B., Amorim L., Filho A.B., Hau B., Berger R.D., 2001.** Accounting for photosynthetic efficiency of bean leaves with rust, angular leaf spot and anthracnose to assess crop damage, *Plant Pathol.*, 50 : 443-452.
- Bastiaans L., 1991.** Ratio between virtual and visual lesion size as a measure to describe reduction in leaf photosynthesis of rice due to leaf blast, *Am. Phytopathol. Soc.*, 81 : 611-615.
- Bastiaans L., 1993a.** Effects of leaf blast on growth on production of a rice crop – I. Determining the mechanism of yield reduction, *Neth. J. Plant Pathol.*, 99 : 323-334.
- Bastiaans L., 1993b.** *Understanding yield reduction in rice due to leaf blast*, thèse PhD, Agricultural University, Wageningen, 127 p.
- Bastiaans L., Kropff M.J., 1993.** Effects of leaf blast on photosynthesis of rice – 2. Canopy photosynthesis. *Neth. J. Plant Pathol.*, 99 : 205-217.
- Baudry J., 1993.** Landscape dynamics and farming systems: problems of relating patterns and predicting ecological changes, in Bunce R.G.H., Ryszkowski L., Paoletti M.G. (eds.), *Landscape Ecol. Agroecosyst.*, London, Lewis, 21-40.
- Baudry J., Papy F., 2001.** The role of landscape heterogeneity in the sustainability of cropping systems, in Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (eds.), *Crop Sci.*, Oxon, Cabi Publishing, 243-259.
- Baudry J., Jouin A. (eds.), 2003.** *De la haie aux bocages : organisation, fonctionnement et gestion*, Paris, Inra Éditions, ministère de l'Écologie et du Développement durable, 474 p.
- Baudry J., Laurent C., Thenail C., Denis D., Burel F., 1999.** Driving factors of land-use diversity and landscape patterns at multiple scales – A case study in Normandy, France, in Krönert R., Baudry J., Bowler I.R., Reenberg A., *Land-use changes and their environmental impact in rural areas in Europe*, "Man and the biosphere" series, Washington, 103-120.
- Bayala J., Boureima Z., Van Der Hoek R., Lamsellek H., Sourou Noutin G., Randriana-
risoa M., Torquebiau E., 2003.** L'arbre dans l'espace agricole du plateau de Vineta (Madagascar), *Cah. Étud. Rech. Fr. Agric.*, 12 : 15-21.
- Bayer C., Mielnizuk J., Mertin-Neto L., Ernani P.R., 2002.** Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil, *Plant and Soil*, 238 : 133-140.
- Beare M.H., Coleman D.C., Crossley D.A., Hendrix P.F., Odum E.P., 1995.** A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling, *Plant and soil*, 170 : 5-22.
- Béasse C., Ney B., Tivoli B., 2000.** A simple model of pea (*Pisum sativum*) growth affected by *Mycosphaerella pinodes*, *Plant Pathol.*, 49 : 187-200.
- Beaudoin N., Parnaudeau V., Mary B., Makowski D., Meynard J.-M. 2004.** Simulation de l'impact de différents scénarios agronomiques sur les pertes de nitrate à l'échelle d'un bassin hydrologique, in Monestiez P., Lardon S., Seguin B. (eds.), *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, Versailles, Inra Éditions, « Science Update », 117-141.
- Becker M., Johnson D.E., 1999.** Rice yield and productivity gaps in irrigated systems of forest zone of Côte d'Ivoire, *Field Crops Res.*, 60 : 201-208.
- Begon M., Harper J.L., Townsend C.R., 1990.** *Ecology: Individuals, populations and communities*, Oxford, Blackwell Scientific Pub., 2nd ed., 945 p.
- Behan-Pelletier V.M., 1999.** Orobatiid mite diversity in agroecosystems: role for bioindication, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 74 : 411-423.
- Bélanger G., Gastal F., Warembourg F., 1994.** Carbon balance on tall fescue: effects of nitrogen fertilisation and growing season. *Ann. Bot.*, 74 : 653-659.
- Belaygue C., Wery J., Cowan A.A., Tardieu F., 1996.** Contribution of leaf expansion, rate of leaf appearance, and stolon branching to growth of plant leaf area under water deficit in white clover, *Crop Sci.*, 36 : 1240-1246.
- Belhaj Fraj M., 2003.** *Évaluation de la stabilité et de la faisabilité des associations variétales de blé tendre d'hiver à destination meunière en conditions agricoles : application aux conditions de culture du Nord de la France*, thèse de docteur de l'Ensar, Rennes, 99 p.
- Belhouchette H., 2004.** *Évaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie. Utilisation conjointe*

d'un modèle de culture (CropSyst), d'un SIG et d'un modèle bio-économique, thèse de docteur de l'Ensam, Montpellier, 150 p.

Bellon S., Girard N., Guérin G., 1999. Caractériser les saisons-pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne de pâturage, *Fourrages*, 158 : 115-132.

Bellon S., Lescourret F., Calmet J.-P., 2001. Characterization of apple orchard management systems in a French Mediterranean vulnerable zone, *Agron.*, 21 : 203-213.

Bellon S., Chatelin M.-H., Guérin G., Havet A., Moreau J.-C., 1995. Analyse de la conduite du pâturage au printemps, *Fourrages*, 141, 33-55.

Benbi D.K., Nieder R., 2003. *Handbook of processes and modelling in the soil-plant system*, New York, The Haworth Press, 762 p.

Benech-Arnold R.L., Sanchez R.A., Forcella F., Kruk B.C., Ghersa C.M., 2000. Environmental control of dormancy in weed seed banks in soil, *Field Crops Res.*, 67 : 105-122.

Benoît M., 1985. *La gestion territoriale des activités agricoles, l'exploitation et le village : deux échelles d'analyse en zone d'élevage. Cas de la Lorraine (région de Neufchâteau)*, thèse de docteur-ingénieur de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 152 p.

Benoît M., Papy F., 1997. Pratiques agricoles et qualité de l'eau sur le territoire alimentant un captage, in Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Neveu A., Papy F. (eds.), *L'eau dans l'espace rural*, Versailles, Inra Éditions, 323-336.

Benoît M., Deffontaines J.-P., Gras F., Bienaimé E., Riela-Cosserat R., 1997. Agriculture et qualité de l'eau. Une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation, *Cah. Agric.*, 6 : 97-105.

Benoît M., Chicoisne G., Deffontaines J.-P., Hervé D., Lardon S., Le Ber F., Mullon C., Papy F., Souchère V., Thinon P., Tichit M., Treuil J.-P., 1998. Coordonner des choix de cultures sous contraintes environnementales : Des jeux de rôle aux modèles multi-agents, in colloque Smaget, 5-8 octobre 1998, Clermont-Ferrand, Cemagref Éditions, 131-141.

Bergez J.E., Debaeke P., Deumier J.M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D., 2001. Moderato: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules, *Ecol. Modell.*, 137 : 43-60.

Berkelmans R., Ferris H., Tenuta M., Van Bruggen A.H.C., 2003. Effects of long-term crop management on nematode trophic levels other than plant feeders disappear after 1 year of disruptive soil management, *Appl. Soil Ecol.*, 23 (3) : 223-235.

Bernard C., 1865. *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, présentation par le Professeur L. Binet, Paris, Nouvel Office d'Éditions, 1963, 365 p.

Berthet-Bondet J., Deffontaines J.-P., Houdard Y., 1986. Espaces, pratiques et potentialités agricoles du territoire de Salmé, in *Les collines du Népal central – Écosystèmes, structures sociales et systèmes agraires*, Paris, Inra, 2 : 121-136.

Bertin N., 1995. Competition for assimilates and fruit position affect fruit set in indeterminate greenhouse tomato, *Ann. Bot.*, 75 : 55-65.

Bertin N., 2005. Analysis of the tomato fruit growth response to temperature and plant fruit load in relation to cell division, cell expansion and DNA endoreduplication, *Ann. Bot.*, 95 : 439-447.

Besse P., Bouquin H., 1991. Identité et légitimité de la fonction contrôle de gestion, *Rev. Franç. Gestion*, 60-71.

Bethenod O., Huber L., Slimi H., 2001. Photosynthetic response of wheat to stress induced by *Puccinia recondita* and post-infection drought, *Photosynth.*, 39 (4) : 581-590.

Biarnès A., 1998. *La conduite du champ cultivé. Points de vue d'agronomes*, Paris, Orstom, 339 p.

Biarnès A., Rio P., Hocheux A., 2004. Analyzing the determinants of spatial distribution of weed control practices in a Languedoc vineyard catchment, *Agron.*, 24 : 187-196.

Bidel L.P.R., Pagès L., Rivière L.M., Pelloux G., Lorendeau J.Y., 2000. MassFlowDyn I: A carbon transport and partitioning model for root system architecture, *Ann. Bot.*, 85, 869-886.

de Bie C.A.J.M., 2004. The yield gap of mango in Phrao, Thailand, as investigated through comparative performance evaluation, *Sci. Hort.*, 102 (1) : 37-52.

Bindraban P.S., Van Keulen H., Kuyvenhoven A., Rabbinge R., Uithol P.W.J., 1999. Food security at different scales: demographic, biophysical and socio-economic considerations, *Quant. Approaches Syst. Anal.*, Wageningen, AB-DLO/PE, 21 : 168 p.

Biswas M.R., 1984. Agricultural Production and the Environment: a Review, *Environ. Conserv.*, 11 : 253-259.

Blackmore S., Godwin R.J., Fountas S., 2003. The analysis of spatial and temporel trends in yield map data over six years. *Biosyst. Eng.*, 84 : 455-466.

Blanc-Pamard C., Milleville P., 1991. Pratiques paysannes, perception du milieu et système agraire, in Blanc-Pamard C., Lericollais A.

- (eds.), *Dynamique des systèmes agraires – À travers Champs Agronomes et Géographes*, Paris, Orstom, 101-139.
- de Blois S., Domon G., Bouchard A., 2002.** Factors affecting plant species distribution in hedgerows of Southern Québec, *Biol. Conserv.*, 105 : 355-367.
- Blum U., Shafer S.R., Lehman M.E., 1999.** Evidence for inhibitory allelopathic interactions involving phenolic acids in field soils: concept vs. an experimental model, *Crit. Rev. in Plant Sci.*, 18 (5) : 673-693.
- Boatman N., 1994.** *Field margins: integrating agriculture and conservation*, BCPC Monograph, Farnham, British Crop Protection Council, 404 p.
- Bockstaller C., Girardin P., 2003.** How to validate environmental indicators, *Agric. Syst.*, 76 : 639-653.
- Bockstaller C., Girardin P., Van der Werf H.M.G., 1997.** Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems, *Eur. J. of Agron.*, 7 : 261-270.
- Bodson B., Meeus P., Moreau J.M., Vancutsem F., Falisse A., 2000.** Protection fongicide intégrée au mode de conduite de la culture. Exemple du blé en Belgique, *Phytoma – La défense des végétaux*, 533 : 22- 26.
- Boiffin J., 1984.** *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, thèse de docteur-ingénieur, Ina P-G, Paris, 320 p. + annexes.
- Boiffin J., Sebillotte M., 1982.** Fertilité ; potentialités et aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronome, *Bull. Tech. Inf. Minist. Agric.*, 37 : 345-352.
- Boiffin J., Stengel P., 1999.** *Réapprendre le sol : nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural*, in *Déméter 2000 – Économie et stratégies agricoles*, Paris, Armand Colin, 147-211.
- Boiffin J., Guérif J., Stengel P., 1990.** Les processus d'évolution de l'état structural du sol, in Boiffin J., Marin-Laflèche A. (eds.), *La structure du sol et son évolution*, Versailles, Inra, « Les colloques », 53, 37-70.
- Boiffin J., Malézieux E., Picard D., 2001.** Cropping systems for the future, in Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (eds.), *Crop Sci.*, New-York, Cabi, Oxon, 261-279.
- Boiffin J., Caneill J., Meynard J.-M., Sebillotte M., 1981.** Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse – I. Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional, *Agron.*, 7 : 549-558.
- Bolan N.S., Saggar S., Luo J., Bhandral R., Singh J., 2004.** Gaseous emission of nitrogen in pastures: processes, measurements and modelling, environmental implications and mitigation, *Adv. in Agron.*, 84 : 37-120.
- Boller E.F., El Titi A., Gendrier J.-P., Avilla J., Jörg E., Malavolta, 1999.** Integrated production: principles and technical guidelines, *IOBC/WPRS Bull.*, 22 : 38 p.
- Bonhomme R., Varlet-Grancher C., 1977.** Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant – I. Établissement des lois et vérifications expérimentales, *Ann. Agron.*, 28 (6) : 567-582.
- Boniface R., Trocmé S., 1988.** Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique – 2. Essais sur la fumure phosphatée, in *Phosphore et Potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation*, Paris, Inra Éditions, 279-402.
- Bonnemaire J., Brossier J., Brun A., Roux M., Teissier J.-H., Deffontaines J.-P., Houdard Y., Osty P.-L., Petit M., 1977.** *Pays, paysans paysans dans les Vosges du Sud*, Inra Éditions, 2^e édition 1995, 192 p.
- Bonny S., 1994.** Les possibilités d'un modèle de développement durable en agriculture : le cas de la France, *Cour. de l'Environ.*, 23 : 5-15.
- Bonny S., 2000.** Les consommateurs, l'agriculture, la qualité et la sécurité des aliments : une analyse du questionnement des consommateurs et des réponses apportées, *Prod. Anim.* 2000, 13 (5) : 287-301.
- Bontemps P., Rotillon G., 1998.** *Économie de l'environnement*, Paris, éditions la Découverte et Syros, « Repères », 118 p.
- Boone M.Y.L., Kikusawa M., Mc Kinion, 1997.** Crop models and precision agriculture, in Kropff et al. (eds.), *Applications of systems approaches at the field level*, London, Kluwer Academic Pub., 189-199.
- Boote K.J., Jones J.W., Pickering N.B., 1996.** Potential Uses and Limitations of Crop Models, *Agron. J.*, 88 : 704-716.
- Boote K.J., Jones J.W., Mishoe, J.W., Berger R.D., 1983.** Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions, *Phytopathol.*, 73 : 1581-1587.
- Boote K.J., Jones J.W., Batchelor W.D., Nafziger E.D., Myers O., 2003.** Genetic coefficients in the Cropgro-Soybean model: links to field performance and genomics, *Agron. J.*, 95 : 32-51.
- Bosma R.H., Bos M., Kante S., Kebe D., Quak W., 1999.** The promising impact of ley

introduction and herd expansion on soil organic matter content in southern Mali, *Agric. Syst.*, 62 (1) : 1-15.

Bostick W.M., Koo J.W., Walen V.K., Jones J.W., Hoogenboom G., 2004. A web-based data exchange system for crop model applications, *Agron. J.*, 96 (3) : 853-856.

Boström U., 1995. Earthworm populations (Lumbricidae) in ploughed and undisturbed leys, *Soil Till. Res.*, 35 : 125-133.

Boulaine J., 1992. *Histoire de l'agronomie en France*, Paris, Tec et Doc Lavoisier, 392 p.

Bouma J., Verhagen J., Brouwer J., Powell J.M., 1997. Using systems approaches for targeting site-specific management on field level, in Kropff et al. (eds), *Applications of systems approaches at the field level*, London, Kluwer Academic Pub., 25-36.

Bousquet V., Legros M., 2002. *Analyse des déterminants agronomiques et sociaux du changement technique et de sa diffusion. Cas de la culture du sorgho de contre-saison (muskwaari) au Nord Cameroun*, thèse de master of science, Montpellier, Cnearc, 136 p. + annexes.

Bousquet F., Barreteau O., d'Aquino P., Étienne M., Boissau S., Aubert S., Le Page C., Babin D., Castella J.-C., 2002. Multi-agent systems and role games: an approach for ecosystem co-management, in Janssen M. (ed.), *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-Agent Approaches*, Cheltenham, Edward Elgar, 248-285.

Boyer J., Michellon R., Chabanne A., Reverzat G., Tibere R., 1999. Effects of trefoil cover crop and earthworm introduction on maize crop and soil organisms in Reunion Island, *Biol. Fertil. Soils*, 28 : 364-370.

Bragagnolo N., Mielniczuk J., 1990. Mulch from eight crop sequences and its effects on soil temperature, moisture, emergence and initial growth of corn, *R. Bras. Cienc. Solo*, 14 (1) : 91-98.

Brain P., Cousens R., 1990. The effect of weed distribution on predictions of yield loss, *J. of Appl. Ecol.*, 27 : 735-742.

Brancourt-Hulmel M., Biarnès-Dumoulin V., Denis J.-B., 1997. Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype-milieu en amélioration des plantes, *Agron.*, 17 : 219-246.

Bräuer I., 2003. Money as an indicator: to make use of economic evaluation for biodiversity conservation? *Agric. Ecosyst. Environ.*, 98 : 483-491.

Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plénet D., Jeuffroy M.-H.,

Bouthier A., Ripoché D., Mary B., Justes E., 2002. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance – II. Model validation for wheat and maize, *Agron.*, 22 : 69-92.

Brisson N., Mary B., Ripoché D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antoniolletti R., Dürr C., Nicoullaud B., Richard G., Beaudouin N., Recous S., Tayot X., Plénet D., Cellier P., Machet J.-M., Meynard J.-M., Delécolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance – I. Theory and parameterization applied to wheat and corn, *Agron.*, 18 : 311-346.

Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.-L., 1990. Modélisation systémique et système agricole. Décision et organisation, Paris, Inra, 365 p.

Brossier J., Chia E., Marshall E., Petit M., 1997. *Gestion de l'exploitation agricole familiale. Éléments théoriques et méthodologiques*, Dijon, Enesad/Cnerta, 221 p.

Brun G., Garcia M., Dedieu F., Laffargue F., 1996. Optimisation de la fertilisation du Cot sur le Causse de l'appellation d'Origine Contrôlée Cahors, in Inra, *Les terroirs viticoles*, Angers, Inra (ed.), 201-206.

Brunet R. 1980. La composition des modèles dans l'analyse spatiale, *Espace Géogr.*, 4 : 253-265.

Büchs W., 2003. Biodiversity and agri-environmental indicators-general scopes and skills with special reference to the habitat level, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 98 : 35-78.

Buck-Sorlin G.H., Bachmann K., 2000. Simulating the morphology of barley spike phenotypes using genotype information, *Agron.*, 20 : 691-702.

Buck-Sorlin G.H., Kniemeyer O., Kurth W., 2005. Barley morphology, genetics and hormonal regulation of internode elongation modelled by a relational growth grammar, *New Phytol.*, 166 (3) : 859-867.

Bugaret Y., Bernard J.-L., Maurin G., Molot B., La Rocque (de) B., 2002. Des outils pour la protection raisonnée ou intégrée du vignoble. Les mesures de lutte indirecte envisageables, *Phytoma – La Défense des végétaux*, 554 : 18-22.

Bullock D.G., 1992. Crop rotation, *Crit. Rev. Plant Sci.*, 11 (4) : 309-326.

Bullock D.G., 1997. Agro-ecological characterisation, food production and security, in Van Ittersum M.K., Van de Geijn S.C. (eds.), *Perspectives for agronomy. Adopting ecological principles and managing resource use*, Dev. Crop Sci., Amsterdam, Elsevier, 25 : 29-37.

Burel F., Baudry J., 1999. *Écologie du Paysage : concepts, méthodes et applications*, Paris, Lavoisier, 359 p.

Bussière F., Solmon F., Fouéré A., 2002. Implementation and evaluation of DROP, a model for the simulation of rainfall distribution below plants described in 3D, *Agron.*, 22 : 91-103.

Byerlee D., Triomphe B., Sebillotte M., 1991. Integrating agronomic and economic perspectives into the diagnostic stage of on-farm research, "Farming systems series", *Exp. Agric.*, 27 (28) : 95-114.

C

Caldiz D.O., Haverkort A.J., Struik P.C., 2002. Analysis of a complex crop production system in independent agro-ecological zones: a methodological approach for potatoes in Argentina, *Agric. Syst.*, 73 : 297-311.

Calegari A., 2001. Cover crop management, in García-Torres L., Benites J., Martínez-Vilela A. (eds.), *World Congress on Conservation Agriculture – I. Keynote contributions*, Madrid, Xul, 171-179.

Caloin M., Yu O., 1984. Analysis of the time course change in nitrogen content of *Dactylis glomerata* L. using a model of plant growth, *Ann. of Bot.*, 54 : 69-76.

Callon M., Lascoumes P., Barthe Y., 2001. *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Paris, Seuil, 357 p.

Calvet R., 2003a. *Le sol, propriétés et fonctions. Tome 1 – Constitution et structure, phénomènes aux interfaces*, Paris, Éditions France Agricole, 455 p.

Calvet R., 2003b. *Le sol, propriétés et fonctions. Tome 2 – Phénomènes physiques et chimiques ; applications agronomiques et environnementales*, Paris, Éditions France Agricole, 505 p.

Calviño P., Sadras V., 2002. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas, *Field Crops Res.*, 74 : 1-11.

Caneill J., 1993. *Du champ cultivé au bassin d'approvisionnement : contributions méthodologiques à une ingénierie agronomique*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 460 p.

Caneill J., Capillon A., 1988. *Destination des déjections animales en Moyenne Maurienne et Moyenne Tarentaise*, rapport d'étude Ina P-G/ chambre d'agriculture de Savoie, 55 p. + annexes.

Caneill J., Capillon A., 1990. La destination des déjections animales en montagne : un

enjeu pour les relations entre activité agricole et préservation de l'environnement, *Fourrages*, 123 : 313-328.

Caneill J., Le Bail M., 1995. Contribution de l'agronome à la gestion d'un bassin d'approvisionnement, in Nicolas F., Valceschini E. (eds.), *Agroalimentaire : une économie de la qualité*, Paris, Inra-Economica, 391-399.

Cans R., 1994. *La bataille de l'eau*, Paris, Le monde éditions, 219 p.

Capillon A., 1992. Unité et spécificité de l'approche de l'environnement par l'agronome, *Cah. Agric.*, 1 : 113-122.

Capillon A., 1993. *Typologie des exploitations agricoles. Contribution à l'étude régionale des problèmes techniques*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, tomes I et II, 48 et 301 p.

Capillon A., Valceschini E., 1998. La coordination entre exploitations agricoles et entreprises agro-alimentaires : un exemple dans le secteur des légumes transformés, *Étud. Rech. Syst. Agraires*, 31 : 259-275.

Capillon A., Séguy L., 2002. Écosystèmes cultivés et stockage du carbone : cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 88 (5) : 63-70.

Capitaine M., Benoît M., 2001. Territoires des exploitations et finages : mutations lorraines, *Mappemonde*, 62 : 6-9.

Carberry P.S., Hochman Z., Mc Cown R.L., Dalglish N.P., Foale M.A., Poulton P.L., Hargreaves J.N.G., Hargreaves D.M.G., Cawthray S., Hillcoat N., Robertson M.J., 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation, *Agric. Syst.*, 74 (1) : 141-177.

Carson R., 1962. *Silent Spring*, Boston, Houghton Mifflin, 304 p.

Carter M.R. (ed), 1994. *Conservation tillage in temperate agrosystems. Development and Adaptation to Soil, Climatic, and Biological Constraints*, Boca Raton, CRC press, 400 p.

Cartier S., 2002. *Chronique d'un déluge annoncé. Crise de la solidarité face aux risques naturels*, Paris, coéd. Grasset-Fasquelle, 373 p.

Casanova D., Goudriaan J., Bouma J., Epema G.F., 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice, *Geoderma*, 91 : 191-216.

Cassman K.G., 2001. Crop science research to assure food security, in Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (eds.), *Crop Science*, New-York, Cabi, Oxon, 33-51.

- Castella J.-C., 2005.** Mise au point d'une méthode d'analyse multi-échelle des transitions agraires. Application aux dynamiques des espaces ruraux de montagne au nord du Vietnam, *Espace Géogr.*, 4 : 351-366.
- Castella J.-C., Trebuil G., Crozat Y., 1997.** Diagnosis on Thai agrarian systems for research prioritization to improve the sustainability and competitiveness of cotton production, *Kasetsart J. Nat. Sci.*, 31: 1-15.
- Castella J.-C., Jourdain D., Trebuil G., Napompeth B., 1999.** A systems approach to understanding obstacles to effective implementation of IPM in Thailand: key issues for the cotton industry, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 72 : 17-34.
- Castella J.-C., Hoa T.Q., Husson O., Nam V.H., Quang D.D., 2004.** Appartenance ethnique, accès aux ressources foncières et stratégies paysannes dans une zone de montagne au Vietnam. *Cah. Agric.*, 13 : 403-411.
- Castro Coelho J., Aguiar Pinto P., Mira da Silva L., 2001.** A systems approach for the estimation of the effects of land consolidation projects (LCPs): a model and its application, *Agric. Syst.*, 179-195.
- Cavero J., Zaragoza C., Bastiaans L., Suso M.L., Pardo A., 2000.** The relevance of morphological plasticity in the simulation of competition between maize and *Datura stramonium*. *Weed Res.*, 40 : 163-180.
- Celette F., Wery J., Chantelot E., Celette J., Gary C., 2005.** Belowground Interactions in a Vine (*Vitis vinifera* L.)-tall Fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) Intercropping System: Water Relations and Growth, *Plant and Soil*, 276 (1-2) : 205-217.
- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y., 2002.** Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management), *Catena*, 46 : 189-205.
- Cerf M., 1996.** Approche cognitive de pratiques agricoles : intérêts et limites pour les agronomes. *Nat. Sci. Soc.*, 4 : 327-339.
- Cerf M., Sebillotte M., 1988.** Le concept de modèle général et la prise de décision dans la conduite d'une culture. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (4) : 71-80.
- Chabert A., 1996.** *Les lombriciens des sols cultivés. Effets de quelques pratiques culturales sur les peuplements*, Acta Point, 4 : 27 p.
- Chamayou H., 2000.** *Éléments de bioclimatologie*, Paris, Cifl Éditeur, 283 p.
- Chan K.Y., 2001.** An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity – Implications for functioning in soils. *Soil Tillage Res.*, 57 : 179-191.
- Changeux J.-P., Ricoeur P., 1998.** *Ce qui nous fait penser. La nature et la règle*, Paris, O. Jacob, 350 p.
- Chapman S.C., Cooper M., Hammer G.L., 2002.** Using crop simulation to generate genotype by environment interaction effects for sorghum in water-limited environments, *Aust. J. Agric. Res.*, 53 : 379-389.
- Chapman S.C., Cooper M., Poldich D.W., Hammer G.L., 2003.** Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects, *Agron. J.*, 95 : 99-113.
- Chartier P., 1966.** Étude théorique de l'assimilation brute de la feuille, *Ann. Physiol. Vég.*, 8 (3) : 167-195.
- Chatelin M.-H., Mousset J., 1997.** Decision support for work organization and choice of equipment, in Ten Berge H.F.M., Stein A. (eds.), Model-based decision support in agriculture, Wageningen, *Quantitative Approaches in System Analysis*, 15 : 59-64.
- Chatelin M.-H., Mousset J., Papy F., 1994.** Taking account of Decision-Making behaviour in giving advice. A real life experiment in Picardie, in Jacobsen B.H., Pedersen D.E., Christensen J., Rasmussen S. (eds), Farmer's decision making, a descriptive approach, *Proc. of the 38th EAAE Seminar*, Institute of Economics and The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, 369-381.
- Chatelin M.-H., Aubry C., Leroy P., Papy F., Poussin J.-C., 1993.** Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. Le cas des exploitations en grande culture, *Cah. Écon. Soc. Rurales*, 28 : 120-138.
- Chatelin M.-H., Aubry C., Poussin J.-C., Meynard J.-M., Massé J., Verjux N., Gate Ph., Le Bris X., 2005.** Déciblé, a software package for wheat crop management simulation, *Agric. Syst.*, 83 (1) : 77-99.
- Chaussod R., 1996.** La qualité biologique des sols : évaluation et implications, *Étude et gestion des sols*, 3 (4) : 261-278.
- Chaussod R., Houot S., 1993.** La biomasse microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols, in Decroux J., Ignazi J.-C. (eds.), *Matières organiques et agri-cultures*, Blois, Gemas-Comifer, 17-26.
- Chauvel B., Guillemain J.-P., Colbach N., Gasquez J., 2001.** Evaluation of cropping systems

for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.), *Crop Prot.*, 19 : 127-137.

Cheeroo-Nayamutha F.C., Robertson M.J., Wegener M.K., Nayamuth A.R.H., 2000. Using a simulation model to assess potential and attainable sugar cane yield in Mauritius. *Field Crops Res.*, 3 (66) : 225-243.

Chelle M., 2005. Phylloclimate or the climate perceived by individual plant organs: What is it? How to model it? What for? *New Phytol.*, 166 (3) : 1-10.

Chevassus-au-Louis B., 2001. *OGM et agriculture : options pour l'action publique*, rapport pour le Commissariat général au plan, 339 p.

Chia E., Barbier M., 1999. Gestion de la qualité de l'eau : apprentissage collectif et rôle des prescripteurs. *Cah. Agric.*, 8 (2) : 109-117.

Citepa, 2003. Émissions dans l'air – données annuelles nationales, [en ligne], format .pdf, disponible sur http://www.citepa.org/emissions/nationale/Aep/Emissions_FRmt_AEPavr05.pdf (consulté le 17/01/06).

Cirad/Inra, 1997. *L'agroforesterie pour un développement durable*, Montpellier, coéd. Cirad-Inra, 452 p.

Clausen J.C., Jokela W.E., Potter F.I., Williams J.W., 1996. Paired watershed comparison of tillage effects on runoff, sediment and pesticide losses, *J. Environ. Qual.*, 25 : 1000-1007.

Clements D.R., Shrestha A., 2004. New dimensions in agroecology for developing a biological approach to crop production, *J. Crop Improv.*, 11 (1/2) : 1-20.

Clermont-Dauphin C., Meynard J.-M., Cabidoche Y.-M., 2003. Devising fertiliser recommendations for diverse cropping systems: the case of low-input bean/maize intercropping in a tropical highland of Haiti, *Agron.*, 23 : 673-681.

Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.M., Meynard J.M., 2004. Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies, *Soil use and management*, 20 : 1-20.

Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.-M., Meynard J.-M., 2005. Diagnosis on the sustainability of an upland cropping system of southern Haiti, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 105 (1-2) : 221-234.

Cluzeau D., Peres G., Decaens T., Bureau F., Grandin V., Giteau J.-L., 2003. Caractérisation microbiologique des sols agricoles tempérés : évaluation des lombriciens et de leurs activités, in Thévenet G., Faedy L. (eds.), *Les fertilités du*

sol et les systèmes de culture, Paris, Comifer, 117-126.

CNA, 2002. *Avis sur la notion de qualité*, avis n° 36, Paris, ministère de l'Agriculture et de la Pêche, ministère chargé de la Santé, secrétariat d'État chargé des PME, du Commerce, de l'Artisanat et de la Consommation, Paris, 36 p.

Cochet H., 2001. *Crises et révolutions agricoles au Burundi*, Paris, Ina P-G/Karthala, 468 p.

Cochran V.L., Sparrow S.D., Sparrow E.D., 1994. Residue effects on soil micro and macroorganisms, in Unger P.W. (ed.), *Managing agricultural residues*, Boca-Raton, CRC Press, 389 p.

Cognée M., 1968. Considérations sur l'abscission des organes fructifères du cotonnier, *Coton Fibres Trop.*, 23 : 315-336.

Colbach N., Debaeke P., 1998. Integrating crop management and crop rotation effects into models of weed population dynamics: a review, *Weed Sci.*, 46 : 717-728.

Colbach N., Dürr C., 2003. Effects of seed production and storage conditions on blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and shoot elongation with time, *Weed Sci.* 51 : 708-717.

Colbach N., Forcella F., Johnson G. A., 2000a. Temporal trends in spatial variability of weed populations in continuous no-till soybean. *Weed Sci.*, 48 : 366-377.

Colbach N., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J., 2000b. Modelling vertical and lateral seed bank movements during mouldboard ploughing, *Eur. J. Agron.*, 13 : 111-124.

Colbach N., Clermont-Dauphin C., Meynard J.-M., 2001. GeneSys: a model of the influence of cropping systems on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers. II – Exchanges among volunteer and cropped populations in a small region, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 83 : 255-270.

Colbach N., Dürr C., Roger-Estrade J., Caneill J., 2005. How to model the effects of farming practices on weed emergence, *Weed Res.*, 45 (1) : 2-17.

Coleno F.C., 1999. Le pâturage des troupeaux laitiers en question. Contribution d'une analyse des décisions des éleveurs, *Fourrages*, 157 : 63-76.

Collectif, 2000. *Fongiscope blé tendre. Observez vos parcelles pour ajuster votre programme fongicide*, Paris, Éditions ITCF, 32 p.

Collectif, 2001. *Diagnostic des accidents du blé tendre*, Paris, Éditions ITCF, 160 p.

- Collectif, 2002.** *Pesticides et protection phytosanitaire dans une agriculture en mouvement*, Paris, coéd. Acta-ministère de l'Écologie et du Développement durable, 976 p.
- Collectif, 2003.** *Choisir. Traitements et interventions de printemps des céréales*, Paris, Éditions Arvalis-Institut du végétal, 98 p.
- Collectif, 2004a.** Résistances aux fongicides des maladies des céréales à paille. État des lieux et recommandations pour 2004, *Phytoma – La Défense des végétaux*, 571 : 16-18.
- Collectif, 2004b.** *Hernie des crucifères : les moyens de lutte s'étoffent*, Documentation technique Cetiom.
- Collins K.L., Boatman N.D., Wilcox A., Holland J.M., Chaney K., 2002.** Influence of beetle banks on cereal, aphid predation in winter wheat, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 93 : 337-350.
- Colnenne C., Meynard J.-M., Reau R., Justes E., Merrien A., 1998.** Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape, *Ann. Bot.*, 81 : 311-317.
- Combe L., Picard D., 1990.** *Les systèmes de culture*, Paris, Inra, 196 p.
- Comifer, 1993.** *Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures*, Paris, Comifer, 28 p.
- Commoner B., 1971.** *The closing circle: Nature, Man, and Technology*, New York, Knopf, 336 p. Traduit en français en 1972, « L'encerclement. Problèmes de survie en milieu terrestre », Paris, Seuil, 300 p.
- Connor D.J., 2001.** Optimizing crop diversification, in Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (eds), *Crop Science*, New-York, Cabi, Oxon, 191-211.
- Cooke G.W., 1968.** *The control of soil fertility*, London, Crosby Lockwood & Son LTD ed., 526 p.
- Coppenet M., Golven J., Simon J.-C., Le Corre L., Le Roy M., 1993.** Évolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère, *Agron.*, 13 : 77-83.
- Corpen, 1999.** *Désherbage. Éléments de raisonnement pour une maîtrise des adventices limitant les risques de pollution des eaux par les produits phytosanitaires*, Groupe Phytopratt, ministère de l'Agriculture et de la Pêche, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, 161 p.
- Corpen, 2004.** *Techniques culturales sans labour : impacts économiques et environnementaux*, Paris, Corpen, 81 p.
- Corry R.C., Nassauer J.I., 2002.** Managing for small-patch patterns in human-dominated landscapes: cultural factors in Corn Belt Agriculture, in Liu J., Taylor W.W. (eds.), *Integrating Landscape Ecology into Natural Resource Management*, Cambridge, Cambridge University Press, 92-113.
- Courtois V., 2003.** *Les systèmes de culture à base de cotonnier en Côte d'Ivoire : quelle évolution dans un contexte de réorganisation de la filière coton ? Cas d'un village de la zone des savanes de Korhogo*, thèse de master of science, Cnearc, Montpellier, 160 p. + annexes.
- Cousens R., Moss S.R., 1990.** A model of the effects of cultivation on the vertical distribution of weed seeds within the soil, *Weed Res.*, 30 : 61-70.
- Cox P.G., 1996.** Some issues in the design of agricultural decision support system, *Agric. Syst.*, 52 : 355-381.
- Cramb R.A., Nelson R.A., 1998.** Investigating constraints to the adoption of recommended soil conservation technology in the Philippines, in Penning de Vries F.W.T., Agus F., Kerr J. (eds.), *Soil erosion at multiple scales*, Wallingford, Cabi, 99-120.
- Cristofini B., 1985.** La petite région vue à travers le tissu de ses exploitations : un outil pour l'aménagement et le développement rural, *B.T.I.*, 399-401, 483-493.
- Crookston R.K., O'Toole J., Lee R., Ozbun J.L., Wallace D.H., 1974.** Photosynthetic depression in beans after exposure to cold for one night, *Crop Sci.*, 14 : 457-464.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R., 2004.** Simulating management strategies: the rotational grazing example, *Agric. Syst.*, 80 : 23-42.
- Cruz P., Soussana J.-F., 1997.** Mixed crops, in Lemaire G. (ed.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag Pub., 131-142.
- Cuny H., Wery J., Gaufres F., 1998.** A simple indicator for diagnosing nitrate leaching risk under the root zone using the tensionic-tensionometers, *Agron.*, 18 : 521-535.
- Curé B., 1991.** Simplification du travail du sol et évolution du parasitisme, *Perspect. Agric.*, 161 : 47-53.
- Cuthbertson P.S., Jepson P.C., 1988.** Reducing pesticide drift into the hedgerow by inclusion of an unsprayed field margin, in *Brighton Crop Protection Conference. Pests and diseases*, Brighton, 747-751.

D

- Dalal R.C., Henderson P.A., Glasby J.M., 1991.** Organic matter and microbial biomass in a Vertisol after 20 years of zero-tillage, *Soil Biol. Biochem.*, 23 : 435-441.
- Dalgaard T., Hutchings N.J., Porter J.R., 2003.** Agroecology, scaling and interdisciplinarity, *Agric. Ecosyst. Environ.* 100 (1) : 39-51.
- Darré J.-P., 1994.** *Pairs et experts dans l'agriculture, dialogues et production de connaissances pour l'action*, Aix-en-Provence, Éditions Eres, « TIP », 227 p.
- Darré J.-P., Mathieu A., Lasseur J., 2004.** *Le sens des pratiques. Conceptions d'agriculteurs, modèles d'agronomes*, Versailles, Inra Éditions, « Science Update », 320 p.
- Daudet F.A., Lacoite A., Gaudillere J.-P., Cruiziat P., 2002.** Generalized Munch Coupling between Sugar and Water Fluxes for Modelling Carbon Allocation as Affected by Water Status, *J. Theor. Biol.*, 214 (3) : 481-498.
- Davet P., 1996.** *Vie microbienne du sol et production végétale*, Versailles, Inra Éditions, 384 p.
- David C., 2004.** *Le blé en agriculture biologique. Diagnostic agronomique et raisonnement de la fertilisation au printemps*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Ina P-G, Paris, 145 p.
- David C., Jeuffroy M.-H., Recous S., Dorsainvil F., 2004.** Adaptation and assessment of Azodyn model to manage nitrogen fertilization in organic winter wheat, *Eur. J. Agr.*, 21 : 249-266.
- David C., Jeuffroy M.-H., Henning J., Meynard J.-M., 2005a.** Yield variation in organic winter wheat: A diagnostic study in the South-east of France, *Agron. Sustainable Dev.*, 25 (2) : 213-223.
- David C., Jeuffroy M.-H., Laurent F., Mangin M., Meynard J.-M., 2005b.** The assessment of Azodyn-Org model for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat, *Eur. J. Agron.*, 23 (3) : 225-242.
- Davidonis G.H., Johnson A.S., Landivar J.A., Fernandez C.J., 2004.** Cotton fiber quality is related to boll location and planting date, *Agron. J.*, 96 : 42-47.
- Davidson J.A., Ramsey M.D., 2000.** Pea yield decline syndrome in South Australia: the role of diseases and the impact of agronomic practices, *Aust. J. Agric. Res.*, 51 : 347-354.
- Dayan E., Van Keulen H., Jones J.W., Zipori I., Shmuel D., Challa H., 1993.** Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model – II. Field calibration and Validation, *Agric. Sys.*, 45 : 165-183.
- De Guiran G., 1983.** Les nématodes parasites des cultures en pays tempérés, in *Nématodes, les ennemis invisibles*, Béziers, Éditions la Littorale, 42 p.
- De Terssac G., Dubois P. (dir.), 1992.** *Les nouvelles rationalisations de la production*, Toulouse, Éditions Cépadués, 336 p.
- De Tourdonnet S., Carof M., Saulas P., 2003.** A contribution to the development of cropping systems with permanent cover crops in France, in Garcia-Torres L., Benites J., Martinez-Vilela A. (eds), *Proc. of the 2nd World Congress on Conservation Agriculture*, Ecaf/FAO, August 10-15th, Iguassu, Cordoba, XUL, 262-265.
- De Tourdonnet S., Meynard J.-M., Lafolie F., Roger-Estrade J., Lagier J., Sebillotte M., 2001.** Non uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of N pollution and lower product quality, *Agron.*, 21 (4) : 297-309.
- Debaeke P., 1997.** Le désherbage intégré en grande culture : bases de raisonnement et perspectives d'application, *Cah. Agric.*, 6 : 185-194.
- Debaeke P., 2003.** *Évaluation et conception de systèmes de culture à bas niveaux d'intrants ou contraints par la disponibilité en eau : couplage expérimentation-modélisation*, mémoire d'HDR, INP Toulouse, 77 p.
- Debaeke P., Estragnat A., 2003.** A simple model to interpret the effects of sunflower crop management on the occurrence and severity of a major fungal disease: *Phomopsis* stem canker. *Field Crops Res.*, 83 : 139-155.
- Debaeke P., Nolot J.-M., 2003.** Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture, *Cah. Agric.*, 12 : 387-400.
- Decroux J., Ignazi J.-C. (eds), 1993.** *Actes du colloque « Matières organiques et agriculture »* Comifer-Gemas, 16-18 novembre 1993, Blois, 178 p.
- Dedieu B., Laurent C., Mundler P., 1999.** Organisation du travail dans les systèmes d'activités complexes. Intérêt et limites de la méthode Bilan Travail, *Écon. Rurale*, 253 : 28-35.
- Deffontaines J.-P., 1991.** L'agronomie, science du champ. Le champ, lieu d'interdisciplinarité : de l'écophysiologie aux sciences humaines, *Agron.*, 11 : 581-591.
- Deffontaines J.-P., Brossier J., 1997.** Agriculture et qualité de l'eau. L'exemple de Vittel, *Dossier de l'environnement de l'Inra*, Paris, Inra, 14 : 78 p.

- Défossez P., Richard G., 2002.** Models of soil compaction due to traffic and their field evaluation, *Soil Tillage Res.*, 67 : 41-64.
- Degens B.P., Harris J.A., 1997.** Development of a physiological approach to measuring the catabolic diversity of soil microbial communities, *Soil Biol. Biochem.*, 29 (9/10) : 1309-1320.
- Dejoux J.-F., Meynard J.-M., Reau R., Roche R., Saulas P., 2003.** Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France, *Agron.*, 23 : 725-736.
- Delos M., Caron D., Penaud A., Naibo B., Faure A., 2002.** La lutte prophylactique, approche transversale des moyens de lutte permettant de réduire ou d'éviter le recours à la lutte chimique contre les ravageurs et les maladies des grandes cultures : un nouveau regard sur des méthodes anciennes, *Actes de la 2^e conférence internationale sur les moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux*, 4-7 mars, Lille, 14-22.
- Delos M., Eychenne N., Folcher L., Debaeke P., Laporte F., Raulic I., Maumené C., Naibo B., Pinochet X., 2004.** Les méthodes alternatives pour lutter contre les maladies en grandes cultures, *Phytoma – La défense des végétaux*, 567 : 14-18.
- Denoroy P., Dubrulle P., Vilette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser M., Marin-Lafliche A., Pellerin F., Pellerin S., Boiffin J., 2004.** *Regifert, interpréter les résultats des analyses de terre*, Versailles, Inra Éditions, « Techniques et pratiques », 132 p.
- Dent J.B., Mc Gregor M.J., 1994.** *Rural and farming systems analysis : European perspectives*, Wallingford, Cabi, 361 p.
- Denuit J.-P., Olivier M., Goffaux M.-J., Herman J.-L., Goffart J.-P., Destain J.-P., Franckinet M., 2002.** Management of nitrogen fertilization of winter wheat and potato crop using the chlorophyll meter for crop nitrogen status assessment, *Agron.*, 22 : 847-853.
- Derpsch R., Benites J.R., 2003.** Situation of conservation agriculture in the world. *Proc. of the 2nd World congress on conservation agriculture*, 11-15 août 2003, Iguassu, Cordoba, XUL, 125-135.
- Desgagné S., 2005.** *Récits exemplaires de pratique enseignante. Analyse typologique*, Saint-Nicolas, Presses de l'Université du Québec, 248 p.
- Desmarescaux P., 1998.** *Situation et perspectives de développement des productions agricoles à usage non alimentaire*, rapport au ministre de l'Agriculture et de la Pêche, 36 p., [en ligne] http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/rapp_desmarescaux-0.pdf (consulté le 03/03/06).
- Deverre C., 2005.** Les dispositifs réglementaires et institutionnels pour la gestion des usages agricoles du territoire, in Laurent C. et Thimon P., *Agricultures et Territoires*, Paris, Hermès, 302 p.
- Devienne-Barret F., Justes E., Machet J.-M., Mary B., 2000.** Integrated control of nitrate uptake by crop growth rate and soil nitrate availability under field conditions, *Ann. Bot.*, 86 : 995-1005.
- Dexter A.R., 1988.** Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11 : 199-238.
- Dhaliwal G.S., Koul O., Arora R., 2004.** Integrated Pest Management: retrospect and prospect, in Koul O., Dhaliwal G.S., Cuperus G.W. (eds.), *Integrated Pest Management: potential, constraints and challenges*, Wallingford, Cabi Publishing : 21-38.
- Di Méo G., 1998.** *Géographie sociale et territoires*, Paris, Nathan Université, 317 p.
- Di Pietro F., 2001.** Assessing ecologically sustainable agricultural land-use in the Central Pyrénées at the field and landscape level, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 86 : 93-103.
- Diaz-Zorita M., Perfect E., Grove J.H., 2002.** Disruptive methods for assessing soil structure, *Soil Tillage Res.*, 64 (1/2) : 3-22.
- Dogliotti S., Rossing W.A.H., Van Ittersum M.K., 2004.** Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay, *Agric. Syst.*, 277-302.
- Dogliotti S., Van Ittersum M.K., Rossing W.A.H., 2005.** A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay, *Agric. Syst.*, 86 (1) : 29-51.
- Domsch K.H., 1985.** Interactions with microflora, in *Fungicides for crop protection*, Colloque commémoratif du centenaire de la bouillie bordelaise, édité par I.M. Smith, 3-21.
- Donald C.M., 1963.** Competition among crop and pasture plants, *Adv. Agron.*, 15 : 1-118.
- Donaldson G., Hughes J., Leake A.R., 1996.** The influence of cropping sequences and rotational management on energy use for machinery operations and crop production, *Aspect Appl. Biol.*, 47 : 383-386.
- Doré T., 2000.** *Contribution à la recherche sur les systèmes de culture : diagnostic agronomique*

régional et maîtrise des effets précédents, mémoire d'HDR, INPL, université de Nancy-Metz, 104 p.

Doré T., Meynard J.-M., 1995. On-farm analysis of attacks by the pea weevil (*Sitona lineatus* L.; Col., Curculionidae) and the resulting damage to pea (*Pisum sativum* L.) crops. *J. Appl. Entom.*, 119 : 49-54.

Doré T., Sebillotte M., Meynard J.-M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield, *Agric. Syst.*, 54 (2) : 169-188.

Doré T., Meynard J.-M., Sebillotte M., 1998. The role of grain number, nitrogen nutrition and stem number in limiting pea crop (*Pisum sativum*) yields under agricultural conditions, *Eur. J. Agron.*, 8 : 29-37.

Doré T., Le Bail M., Verger P., 2002a. Pratiques agricoles et sécurité sanitaire des aliments en production végétale, *Cah. Agric.*, 11 : 177-185.

Doré T., Le Bail M., Martin P., Papy F., 2002b. Exploitation agricole et gestion des territoires, in J.-P. Billaud (ed.), *Environnement et gestion des territoires : l'expérience agri-environnementale française*, Paris, Mate, 135-159.

Dosio G.A.A., Rey H., Lecœur J., Izquierdo N.G., Aguirrezabal L.A.N., Tardieu F., Turc O., 2003. A whole-plant analysis of the dynamics of expansion of individual leaves of two sunflower hybrids, *J. Exp. Bot.*, 54 (392) : 2541-2552.

Dounias I., 1998. *Modèle d'action et organisation du travail pour la culture cotonnière : cas des exploitations agricoles du bassin de la Bénoué au Nord Cameroun*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 200 p. + annexes.

Dounias I., Aubry C., Capillon A., 2002. Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon, *Agric. Syst.*, 73 : 233-260.

Doussan C., Pages L., Pierret A., 2003. Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view, *Agron.*, 23 (5-6) : 419-431.

Dron D., 2003. Atepe : Agriculture, territoire, environnement dans les politiques européennes, *Dossiers Environ.*, Paris, Inra, 23, 182 p.

Drouet J.L., Pagès L., 2003. GRAAL: a model of GRowth, Architecture and carbon ALlocation during the vegetative phase of the whole maize plant: Model description and parameterisation, *Ecol. Modelling*, 165 (2-3) : 147-173.

Duckham A.N., Masfield G.B., 1969. *Farming Systems of the world*, New York, Praeger Publisher, 542 p.

Duelli P., Obrist M.K., 2003. Biodiversity indicators: the choice of values and measures, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 98 : 87-98.

Duhamel du Monceau, 1750-1761. *Traité de la culture des terres, suivant les principes de Monsieur Tull, anglais*, Paris, 6 tomes.

Duke S.O., Dayan F.E., Rimando A.M., Schraeder K.K., Aliotta G., Oliva A., Romagni J.G., 2002. Chemicals from nature for weed management, *Weed Sci.*, 50 : 138-151.

Dumont R., 1960. *Agriculture*. Grand Larousse encyclopédique en dix volumes, Paris, Librairie Larousse.

Duplessy J.C., 2001. État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 333 : 765-773.

Durand J.-L., Lemaire G., Gosse G., Chartier M., 1989. Analyse de la conversion de l'énergie solaire en matière sèche par un peuplement de luzerne soumis à un déficit hydrique, *Agron.*, 9 : 599-607.

Durand J.-L., Schäufele R., Gastal F., 1999. Grass leaf elongation rate as a function of developmental stage and temperature: morphological analysis, *Ann. Bot.*, 83 : 577-88.

Dürr C., Aubertot J.-N., Richard G., Dubrulle P., Duval Y., Boiffin J., 2001. SIMPLE: A model for SIMulation of PLant Emergence prediction the effects of soil tillage and sowing operations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65 : 414-442.

Duru M., Papy F., Soler L.G., 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 : 81-91.

Duru M., Delabry L., 2003. The use of herbage nitrogen status to optimize herbage composition and intake and to minimize nitrogen excretion: an assessment of grazing management flexibility for dairy cows, *Grass Forage Sci.*, 58 : 350-361.

E

Eck H.V., Jones O.R., 1992. Soil nitrogen status as affected by tillage, crops, and crop sequences, *Agron. J.*, 84 : 660-668.

Edwards C.A. (Ed), 1998. *Earthworm ecology*, Boca Raton, CRC Press, 389 p.

Edwards C.A., Loftly J.R., 1977. *Biology of earthworms*, London, Chapman and Hall, 2nd ed., 300 p.

- Ehler L.E., Bottrel D.G., 2000.** The illusion of Integrated Pest Management, *Issues Sci. Technol.* : 61-64.
- El Titi A., 2003a.** *Soil Tillage in Agroecosystems*, Boca Raton, CRC Press, 384 p.
- El Titi A., 2003b.** Effects of Tillage on Invertebrates in Soil Ecosystems, in El Titi A. (ed.), *Soil Tillage in Agroecosystems*, Boca-Raton (USA), CRC Press : 261-287.
- Elzen G.W., Hardee D.D., 2003.** United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service research on managing insect resistance to insecticides, *Pest Manage. Sci.*, 59 : 770-776.
- Erout A., Castella J.-C., 2004.** Riz d'en bas, riz d'en haut : éléments structurants des systèmes de production agricole d'une province de montagne du nord du Vietnam, *Cah. Agric.*, 13 : 413-420.
- Erschler J., Thuriot C., 1992.** Approche par contraintes pour l'aide aux décisions d'ordonnement, in G. de Terssac et P. Dubois (dir.), *Les nouvelles rationalisations de la production*, Toulouse, Éditions Cépadués : 249-266.
- Esquirol P., Lopez P., 1999.** *L'ordonnement*, Paris, Éditions Economica, « Gestion », 133 p.
- Brossier J., Dent B. (eds.), 1998.** Gestion des exploitations et des ressources rurales. Entreprendre, négociier, évaluer (Farm and Rural Management. New context, new constraints, new opportunities), *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 31 : 436 p.
- European Environment Agency, 2005.** *The European environment – State and outlook 2005*, Copenhagen, EEA, 582 p.
- Evans J., Mc Neill A.M., Unkovich M.J., Fettel N.A., Heenan D.P., 2001.** Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review, *Aust. J. Exp. Agric.*, 41 : 347-359.
- Evans L.T., Wardlaw I.F., 1976.** Aspects of the comparative physiology of grain yield in the cereals, *Adv. Agron.*, Academic Press, 28: 301-359.
- FAO, 2003a.** *L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde*, rapport 2003, Rome, FAO, 38 p.
- FAO, 2003b.** Élaboration d'un cadre de bonnes pratiques agricoles, *Comité de l'agriculture*, 17^e session, Rome, 31 mars-4 avril 2003, [en ligne] disponible sur <http://www.fao.org/docrep/meeting/006/y8704f.htm> (lien consulté le 03/03/06).
- Fardeau J.C., 2000.** Estimation de la biodisponibilité des éléments nutritifs contenus dans les produits résiduels organiques, *Ing.*, 21 : 15-28.
- Farquhar G.D., von Caemener S., Berry J.A., 1980.** A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species, *Planta*, 149 : 78-90.
- Farquhar G.D., Richards R.A., 1984.** Isotopic composition of plant carbon correlates with water use efficiency of wheat genotypes, *Aust. J. Plant Physiol.*, 11 : 539-552.
- Félix I., 2002.** Chaulage, fertilisation phosphatée et choix de la rotation. Douze ans d'essai en terres de Brande, *Perspect. Agric.*, 284 : 65-81.
- Félix I., Loyce C., Bouchard C., Meynard J.-M., Bernicot M.-H., Rolland B., Haslé H., 2002.** Associer des variétés rustiques à des niveaux d'intrants réduits. Intérêts économiques et perspectives agronomiques, *Perspect. Agric.*, 279 : 30-35.
- Ferrandino F.J., 1989.** Spatial and temporal variation of a defoliating plant disease and reduction in yield, *Agric. For. Meteorol.*, 47 : 273-289.
- Ferron P. 1999.** Protection intégrée des cultures : évolution du concept et de son application, *Cah. Agric.*, 8 : 389-396.
- Ferron P., 2000.** La lutte biologique : définition, concept et stratégie, *Dossiers Environ. Inra*, 19 : 7-18.
- Filippi M. 2002.** Les sociétés coopératives agricoles entre ancrage territorial et intégration économique, *Étud. Rech. Syst. Agraires*, 33 : 79-94.
- Finckh M.R., Gacek E.S., Goyeau H., Lannou C., Merz U., Mundt C.C., Munk L., Nadziak J., Newton A.C., de Vallavieille-Pope C., Wolfe M.S., 2000.** Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance, *Agron.*, 20 : 813-837.
- Findeling A., 2001.** *Étude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial du Mexique*, thèse de doctorat de l'Engref, Paris, 387 p.

F

- Faivre R., Leenhardt D., Voltz M., Benoît M., Papy F., Dedieu G., Wallach D. 2004.** Spatialising crop models, *Agron.*, 24 : 205-217.
- FAO/OMS, 1999.** *Understanding the codex alimentarius*, Rome, FAO/OMS, 40 p.

- Fisher, R.A., 1924.** *The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted*, *Philos. Trans. R. Soc. London*, B 213 : 89-142.
- Fisher, R.A., 1935.** *The Design of Experiments*, Edinburgh, Oliver & Boyd ; la 8^e édition (1966) est reprise dans : *Statistical Methods, Experimental Design and Scientific Inference*, Oxford, Oxford University Press, 1990 p.
- Flint M.L., Gouveia P., 2001.** *IPM in practice: principles and methods of integrated pest management*, Davis (USA), University of California, 296 p.
- Fog K., 1988.** The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter, *Biol. Rev.*, 63 : 433-462.
- Foissy D., Revest C., Blouet A., 2004.** Démarche d'utilisation des engrais de ferme à l'échelle de l'exploitation agricole, *Fourrages*, 180 : 563-567.
- Forde B.G., 2002.** The role of long distance signalling in plant response to nitrate and other nutrients, *J. Exp. Bot.*, 53 : 39-43.
- Fosket D.E. (ed.), 1994.** *Plant Growth and Development*, London, Academic Press, 580 p.
- Fournier C., Andrieu B., 1999.** ADEL-maize: an L-system based model for the integration of growth processes from the organ to the canopy. Application to regulation of morphogenesis by light availability, *Agron.*, 19 : 313-27.
- Fournier C., Durand J.-L., Ljutovac S., Schäufele R., Gastal F., Andrieu B., 2005.** A functional-structural model of the elongation of the grass leaf and its relationships to the phyllochron, *New Phytol.*, 166 (3) : 881-894.
- Frame J., Newbould P., 1986.** Agronomy of white clover, *Adv. Agron.*, 40 : 1-88.
- Fraser E.D.G., 2004.** Land tenure and agricultural management: soil conservation on rented and owned fields in southwest British Columbia, *Agric. Hum. Values*, 21 : 73-79.
- Fraval A., Silvy C (dir.), 1999.** La lutte biologique (II), *Dossiers Environ. Inra*, 19, 274 p.
- Frémont A., 2005.** *Aimez-vous la géographie ?* Paris, Flammarion, 358 p.
- Fresco L.O., 1984.** Issues in farming systems research. *Neth. J. Agric. Sci.*, 32 : 253-261.
- Fresco L.O., 2001.** Crop science: scientific and ethical challenges to meet human needs, in Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (eds.), *Crop Science*, New-York, Oxon, Cabi, 369-380.
- Fresco L.O., Sroosnidjer L., Bouma J., Van Keulen H., 1994.** *The future of the land. Mobilizing and integrating knowledge for land use options*, Chichester, John Wiley Ed., 430 p.
- Froud-Williams R.J., 1997.** Varietal selection for weed suppression, *Aspects App. Biol.*, 50 : 355-360.

G

- Gabrielle B., Denoroy P., Gosse G., Justes E., Andersen M.N., 1998.** Development and evaluation of CERES-type model for winter oilseed rape, *Field Crop Res.*, 57 : 95-111.
- Gabrielle B., Huet P., Gilliot J.-M., Boissard P., Boffety D., Zwaenepoel P., 2001.** Prediction of wheat crop yield map using post-anthesis radiometrical data. 3rd ECPA, june18-20th, Montpellier, 187-192.
- Gallager R.S., Cardina J., 1997.** Soil water thresholds for photoinduction of redroot pigweed germination, *Weed Sci.*, 45 : 414-418.
- Gallagher J.N., Biscoe P.V., 1978.** Radiation absorption, growth and yield of cereals, *J. Agric. Sci. Cambridge*, 91 : 47-60.
- Gardner R.H., O'Neill V.O., 1991.** Pattern, Process, and predictability: the use of neutral models for landscape analysis, in Turner M.G., Gardner R.H. (eds.), *Quantitative methods in Landscape Ecology*, New-York, Springer-Verlag : 289-308.
- Garnier P., Neel C., Aita C., Recous S., Lafolie F., Mary B., 2003.** Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *Eur. J. Soil Sci.*, 54 (3) : 555-568.
- Gary C., Barczy J.-F., Bertin N., 1995.** Simulation of individual organ growth development on a tomato plant, *Acta Hort.*, 399 : 199-205.
- de Gasparin A., 1843.** *Cours d'Agriculture*, Paris, Maison Rustique, 5 tomes.
- Gastal F., Bélanger G., 1993.** The effects of nitrogen-fertilization and the growing season on photosynthesis of field grown tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) canopies, *Ann. Bot.*, 72 (5) : 401-408.
- Gatel F., Ruch O., Hébrard J.-P., 2004.** Fusarioses. Identifier les facteurs favorables à la maladie, *Perspect. Agric.*, 300 : 30-32.
- Gaucher S., Le Gal P.-Y., Soler G. 2003.** Modelling supply chain management in the sugar industry, in *Proceedings of the Annual Congress, S. Afr. Sugar Technol. Assoc.*, 7 : 542-554.
- Gautier H., Mech R., Prusinkiewicz P., Varlet-Grancher C., 2000.** 3D Architectural modelling of aerial photomorphogenesis in White clover

(*Trifolium repens* L.) using L-systems, *Ann. Bot.*, 85 : 359-370.

Gautronneau Y., Manichon H., 1987. *Guide méthodique du profil cultural*, Lyon, Ceref Isara, 70 p.

Gauvrit C., 1996. *Efficacité et sélectivité des herbicides*, Versailles, Inra Éditions, 168 p.

Gay F., 2002. *Élaboration d'un outil de diagnostic des risques de stress hydrique et de lixiviation du nitrate en parcelles agricoles : application à la laitue sous abris*, thèse de docteur de l'Ensam, Montpellier, 238 p.

Gaynor J.D., Findlay W.I., 1995. Soil and phosphorous loss from conservation and conventional tillage in corn, *J. Environ. Qual.*, 24 : 734-741.

Geist H.J., Lambin E.F., 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation, *Biosci.*, 52 (2) : 143-150.

Génard M., Reich M., Lobit P., Besset J., 1999. Correlations between sugar and acid content and peach growth, *J. Hort. Sci. Biotechnol.*, 746 : 772-6.

Génard M., Lescouret F., Gomez L., Habib R., 2003. Changes in fruit sugar concentration in response to assimilate supply, metabolism and dilution: a modeling approach applied to peach fruit *Prunus persica*, *Tree Physiol.*, 23 : 373-385.

Germon J.-C., Taureau J.-C., Thomas J.-M., 1994. Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates, in Monnier G., Thévenet G., Lesaffre B. (eds.), *Simplification du travail du sol*, Paris, Inra, 125-154.

Germon J.-C., Henault C., Garrido F., Reau R., 1999. Mécanismes de production, régulation et possibilités de limitation des émissions de N_2O à l'échelle agronomique, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (6) : 148-162.

Giampetro M., Bukkens S.G.F., Pimentel D., 1999. General trends of technological changes in agriculture, *Crit. Rev. Plant Sci.*, 18 (3) : 261-282.

Giard V., 1988. *Gestion de la production*, Paris, Éditions Economica, « Gestion », 1068 p.

Giller K.E., Beare M.H., Lavelle P., Izac A.-M.N., Swift M.J., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function, *Appl. Soil Ecol.*, 6 : 3-16.

Gillet M., Lemaire G., Gosse G., 1984. Essai d'élaboration d'un schéma global de la croissance des graminées fourragères, *Agron.*, 4 : 75-82.

Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L., 2005. *Sols et environnement*, Paris, Éditions Dunod, 816 p.

Girard M.-L., 1997. *Modélisation de l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains de blé tendre d'hiver : simulation de la teneur en protéines à la récolte*, thèse de doctorat de l'INA P-G, Paris, Ina P-G96 p.

Girard N., Hubert B., 1999. Modelling expert knowledge with knowledge based systems to design decision aids. The example of a knowledge based model on grazing management, *Agric. Syst.*, 59 : 123-144.

Girard N., Bellon S., Hubert B., Lardon S., Moulin C.-H., Osty P.-L., 2001. Categorising combinations of farmers' land use practices: an approach based on examples of sheep farms in the south of France, *Agron.*, 21 (5), 435-459.

Girardin P., Bockstaller C., 1997. Les indicateurs agro-écologiques, outils pour évaluer les systèmes de culture, *Ol. Corps Gras Lipides*, 4 (6) : 418-426.

Glass A.D.M., Britto D.T., Kaiser B.N., Kinghorn J.R., Kronzucker H.J., Kumar A., Okamoto M., Rawat S., Siddiqi M.Y., Unkles S.E., Vidmar J., 2002. *J. Exp. Bot.*, 53 (370) : 855-864.

Gliessman S., 1990. *Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture*, New York, Springer-Verlag, "Ecological Studies", 78, 3-10.

Godard O., Hubert B., 2002. *Le développement durable et la recherche scientifique à l'Inra*, Paris, Inra, 58 p.

Godin C., 2000. Representing and encoding plant architecture: A review, *Ann. For. Sci.*, 57 : 413-438.

Goldbach R.W., Jacobsen E., de Wit P.J.G.M., Vlak J.M., Gommers F.J., Bakker J., Visser L., Zadoks J.C., 1993. Biotechnology in crop protection, in Zadoks J.C. (ed.), *Modern crop protection: development and perspectives*, Wageningen (Netherlands), Wageningen Pers, 69-160.

Gonzalez-Andujar J.L., Perry J.N., Moss S.R., 2000. Modelling effects of spatial patterns on the seed bank dynamics of *Alopecurus myosoides*, *Weed Sci.*, 47 : 697-705.

Gosse G., Chartier M., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., 1982. Interception du rayonnement utile à la photosynthèse chez la luzerne : variations et modélisation, *Agron.*, 2 (6) : 583-588.

Gosse G., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Allirand J.M., Lemaire G., 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement

solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 6 : 47-56.

Gouyon P.H., Meynard J.-M., Klein E., Angevin F., Lavigne C., 2001. Modéliser l'impact des OGM : Pourquoi et comment ? *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 87 (5) : 21-30.

Goyne P.J., Meinke H., Milroy S.P., Hammer G.L., Hare J.M., 1996. Development and use of a barley crop simulation model to evaluate production management strategies in north-eastern Australia, *Aust. J. Agric. Res.*, 47 : 997-1015.

Grace J.B., 1991. A clarification of the debate between Grime and Tilman, *Funct. Ecol.*, 5 : 583-587.

Gras R., Benoît M., Deffontaines J.-P., Duru M., Lafarge M., Langlet A., Osty P.-L., 1989. *Le fait technique en agronomie. Activité agricole, concepts et méthodes d'étude*, Paris, coéd. Inra-L'Harmattan, 183 p.

Greenwood D.J., Lemaire G., Gosse G., Cruz P., Draycott A., Neeteson J.J., 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass, *Ann. Bot.*, 66 : 425-436.

Greenwood D.J., Gastal F., Lemaire G., Draycott A., Millard P., Neeteson J.J., 1991. Growth rate and %N of field grown crops: theory and experiments. *Ann. Bot.*, 67, 181-190.

del Grosso S.J., Parton W.J., Mosier A.R., Ojima D.S., Kulmala A.E., Phongpan S., 2000. General model for N₂O and N₂ gas emissions from soils due to denitrification, *Global Biogeochem. Cycles*, 14 (4) : 1045-1060.

Grundy A.C., Mead A., 1998. Modelling the effect of seed depth on weed seedling emergence, *Aspects Appl. Biol.*, 51 : 75-82.

Grundy A.C., Mead A., Burston S., 1999. Modelling the effect of cultivation on seed movement with application to the prediction of weed seedling emergence, *J. Appl. Ecol.* 36 : 663-678.

Guehl J.M., Picon C., Sénéquier C., 1993. Discrimination isotopique du carbone et efficacité d'utilisation de l'eau chez les arbres forestiers, in Maillard P., Bonhomme R. (eds.), *Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes*, Versailles, Inra Éditions, 83-100.

Guérif J., 1991. Simplification du travail du sol et évolution du milieu physique et chimique, *Perspect. Agric.*, 161 : 39-46.

Guérif J., 1994. Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface : conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements

mécaniques, in Monnier G., Thévenet G., Lesaffre B. (eds.), *Simplification du travail du sol*, Paris, Inra, 13-33.

Guérif M., Duke C., 1998. Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugar beet using optical remote sensing data assimilation, *Eur. J. Agron.*, 9 (2-3) : 127-136.

Guerrin F., 2001. Magma: a model to help manage animal wastes at the farm level, *Comput. Electron. Agric.*, 33 (1) : 35-54.

Guerrin F., Paillat J.M., 2003. *Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité*, Actes du séminaire, 19-20 juin 2002 [CD-ROM], Montpellier, Cirad.

Guillebeau P., 2004. The pesticide paradox in IPM: risk-benefit analysis, in Koul O., Dhaliwal G.S., Cuperus G.W. (eds.), *Integrated Pest Management: potential, constraints and challenges*, Wallingford, Cabi Publishing, 169-184.

H

Habib R., Lescourret F., Legay J.-M., 2001a. Quels modèles pour la gestion des vergers ? In Malézieux et al., *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, Montpellier, coéd. Cirad-Inra, 173-185.

Habib R., Bellon S., Codron J.-M., Gendrier J.-P., Jacquet F., Lescourret F., Lauri P.-É., Lespinasse Y., Navarrete M., Plenet D., Pluvinage J., de Sainte-Marie C., Sauphanor B., Simon S., Toubon J.-F., Sterns J. 2001b. Integrated fruit production in France: a new challenge for horticultural research, *Bull. OILB/SROP*, 24 p.

Haefele S.M., Wopereis M.S.C., Donovan C., Maubuisson J., 2001. Improving the productivity and profitability of irrigated rice production in Mauritania, *Eur. J. Agron.*, 14 : 181-196.

Hallaire V., Curmi P., Widiatmaka, 1997. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain, *Étud. Gestion Sols*, 4 : 115-126.

Hallé F., 1999. *Éloge de la plante. Pour une nouvelle biologie*, Paris, éditions du Seuil, 340 p.

Hammer G.L., Butler D.G., Muchow R.C., Meinke H., 1996. Integrating physiological understanding and plant breeding via crop modelling and optimization, in Cooper M., Hammer G.L. (eds.), *Plant Adapt. Crop Improvement*, Wallingford (UK) Cabi, 419-441.

Hammer G.L., Kropff M.J., Sinclair T.R., Porter J.R., 2002. Future contributions of crop

modelling – from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement, *Eur. J. Agron.*, 18 : 15-31.

Hansen A.C., Barnes A.J., Lyne P.W.L., 2002. Simulation modeling of sugarcane harvest-to-mill delivery systems, *Trans. Asae*, 45 : 531-538.

Harper J.L., 1977. *Population biology of plants*, London, Academic Press, 892 p.

Harrier L.A., Watson C.A., 2003. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable cropping systems, *Adv. Agron.*, 20 : 185-225.

Harris F., Yusuf M.A., 2001. Manure management by smallholder farmers in the Kano close-settled zone, Nigeria, *Exp. Agric.*, 37 : 319-332.

Harrison K.M., 2003. World trends driving horticulture expansion in emerging economies, *Acta Hortic.*, 621 : 115-125.

Hartkamp A.D., White J.W., Hoogenboom G., 1999. Interfacing geographic information systems with agronomic modeling: a review, *Agron. J.*, 91 (5) : 761-772.

Hatcher P.E., Melander B., 2003. Combining physical, cultural and biological methods: prospects for integrated non-chemical weed management strategies, *Weed Res.*, 43 : 303-322.

Hatchuel A., 2000. Intervention research and the production of knowledge, Symposium « Recherches pour et sur le développement territorial », 11-12 janvier 2000, Montpellier, in Cerf M., Gibbon D., Hubert B., Ison R., Jiggins J., Paine M., Proost J., Röling N., 2000, *Cow up a tree. Knowing and learning for change in agriculture. Case studies from industrialised countries*, Paris, Inra Éditions, 55-68.

Havet A., Pons Y., Kerneis E., 2004. Évaluer les contraintes spatiales à l'utilisation des prairies et les marges de manœuvre des exploitations face à des demandes environnementales. un exemple d'OLAE en Vendée, in Lardon S., Dobremez L., Josien E. (eds.), *Les cahiers de la multifonctionnalité*, Paris, Cemagref, 43-55.

Heal O.W., Anderson J.M., Swift M.J., 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical review, in Cadish G., Giller K.E. (eds.), *Driven by nature: plant litter quality and decomposition*, Wallingford (UK), Cabi, 47-66.

Heilig G.K., 1999. World population trends: how do their affect global food security? In Bindraban P.S., Van Keulen H., Kuyvenhoven A., Rabbinge R., Uithol P.W.J. (eds.), *Food security at different scales: demographic, biophysical and socio-economic considerations*, *Quant. Approaches Syst. Anal.*, Wageningen, AB-DLO/PE, 21 : 25-53.

Heintz W., 1994. L'évolution des modes de gestion de la qualité du blé par les entreprises de collecte stockage, *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 28 : 83-100.

Helps M.B., 1994. Field margin – an agricultural perspective, in Boatman N. (ed.), *Field margins: integrating agriculture and conservation*, Farnham, British Crop Protection Council, 58 : 21-30.

Hémidy L., Maxime F., Soler L.-G., 1993. Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole, *Cah. Econ. Sociol. Rurales*, 28 : 91-118.

Hénin S., 1980. *Rapport du groupe de travail Activités Agricoles et Qualité des Eaux*, Rapport préparé pour le ministère de l'Agriculture et le ministère de l'Environnement, Paris, 2 tomes.

Hénin S., 1999. *De la méthode en agronomie*, Paris, L'Harmattan, 191 p.

Hénin S., Féodoroff A., Gras R., Monnier G., 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol*, Paris, SEIA, 320 p.

Hénin S., Féodoroff F., Monnier G., 1969. *Le profil cultural : l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques*, Paris, Masson, 2^e édition, 332 p.

Hervé D., Paz-Bétancourt B., Migueis J., Treuil J.-P., 2003. Introduction de la modélisation dans une recherche interdisciplinaire : état et gestion des jachères dans les Andes, *Nat. Sci. Soc.*, 11 : 243-254.

Hésiode. *Les travaux et les jours*, Les Belles Lettres, Paris, Édition bilingue, 1928, 150 p. ; voir aussi la belle traduction de L. Dallinges, Paris, Édition de l'Aire, 1979.

Heuzé G., 1862. *Les assolements et les systèmes de culture*, Paris, Hachette, 534 p.

Higgins A.J., Haynes M.A., Muchow R.C., Prestwidge D.B., 2004. Developing and implementing optimised sugarcane harvest schedules through participatory research, *Aust. J. Agric. Res.*, 55 : 297-306.

Hillel D., 1998. *Environmental Soil Physics*, San Diego (USA) Academic Press, 771 p.

Hillel D., Rosenzweig C., 2005. The role of biodiversity in agronomy, *Adv. Agron.*, 88 : 1-34.

Hinsinger P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review, *Plant and Soil*, 237 : 173-195.

Hinsley S.A., Bellamy P.E., 2000. The influence of hedge structure, management and landscape context on the value of hedgerows to birds: A review, *J. Environ. Manage.*, 60 : 33-49.

Hirose T., Werger M.J.A., 1987. Maximising daily canopy photosynthesis with respect to the leaf nitrogen allocation pattern in the canopy, *Oecol.*, 72 : 520-547.

Hochman Z., Carberry P.S., Mc Cown R.L., Dalglish N.P., Foale M.A., Brennan L.E., 2001. APSIM in the marketplace: a tale of Kitchen Tables, Boardrooms and Courtrooms, *Acta Hortic.*, 566 : 21-33.

Hochmuth G., Hanlon E., Hochmuth B., Kidder G., Hensel D., 1993. Field fertility research with P and K for vegetables. Interpretations and recommendations, *Soil and Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, 52 : 95-101.

Hole S.J.W., Powles S.B., 1997. Reduced efficacy and enhanced degradation of carbetamide after repeated application in Australia, *Weed Res.*, 37 : 165-170.

Holland J.M., 2004. The Environmental Consequences of Adopting Conservation Tillage in Europe: reviewing the evidence, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 103 : 1-25.

Holt J., Chancellor T.C.B., 1999. Modelling the spatio-temporal deployment of resistant varieties to reduce the incidence of rice tungro disease in a dynamic cropping system. *Plant Pathology*, 48, 453-461.

Holton, G., 1981. *L'imagination scientifique*, Paris, Gallimard, 487 p.

Hommay G., 1995. Les limaces nuisibles aux cultures, *Rev. Suisse Agric.*, 27 (5) : 267-286.

Hoogenboom G., White J.W., Acosta-Gallegos J., Gaudiel R.G., Myers J.R., Silbernagel M.J., 1997. Evaluation of a crop simulation model that incorporates gene action, *Agron. J.*, 89 : 613-620.

Hook J.E., 1994. Using crop models to plan water withdrawals for irrigation in drought years, *Agric. Syst.*, 45 : 271-289.

Horn R., Van den Akker J.J.H. (Eds), 2000. Subsoil Compaction. *Adv. Agroecol.*, 32, 462 p.

Horst W.J., Kamh M., Jibrin J.M., Chude V.O., 2001. Agronomic measures for increasing P availability to crops, *Plant and Soil*, 237 : 211-223.

Houdart M., Bonin M., Saudubray F., 2004. Typologie de fonctionnement spatial d'exploitations agricoles : application au bassin versant de la rivière Capot en Martinique, *Cah. Multifonctionnalité*, 5 : 57-69.

Hsiao T.C., 1973. Plant responses to water stress, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 24 : 519-570.

Huang M.B., Shao M.A. Zhang L., Li Y.S., 2003. Water use efficiency and sustainability of

different long-term crop rotation systems in the Loess Plateau of China, *Soil Tillage Res.*, 72 (1) : 95-104.

Hubert B., 2004. Pour une écologie de l'action. Éditions Arguments, Paris, 430 p.

Hughes G., 1996. Incorporating spatial pattern of harmful organisms into crop loss models, *Crop prot.*, 15 (6) : 407-421.

I

Ifen, 2002. *L'état de l'environnement en France*, Paris, coéd. Ifen-Orléans/La Découverte, 606 p.

Ingrand S., Dedieu B., Chassaing C., Josien E., 1993. Étude des pratiques d'allotement dans les exploitations d'élevage, in Landais E. (ed.), *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, numéro spécial « Pratiques d'élevage extensif : identifier, modéliser, évaluer », Paris, 27 : 53-71.

Inra, 1976. Les bocages : Histoire, Écologie, Économie, in *Table ronde CNRS : les écosystèmes bocagers*, compte rendu de la table ronde CNRS « Aspects physiques, biologiques et humains des écosystèmes bocagers des régions tempérées humides », 5-7 juillet 1976, Rennes, Inra, 586 p.

Monnier G., Thévenet G., Lesaffre B. (eds), 1994. *Simplification du travail du sol*, Paris, Inra, « Les colloques », 65 : 172 p.

Inra, 2001. *Du labour au semis direct : enjeux agronomiques*, [en ligne] [http://www.inra.fr/actualites/DOSSIERS/sol/\(consulté le 24/01/06\)](http://www.inra.fr/actualites/DOSSIERS/sol/(consulté le 24/01/06)).

Inra, 2002. *Stocker du carbone dans les sols agricole de France ? Expertise scientifique collective*, [en ligne] [http://www.inra.fr/actualites/rapport-carbone.html \(consulté le 24/01/06\)](http://www.inra.fr/actualites/rapport-carbone.html (consulté le 24/01/06)).

ITCF, 1976. *Simplification du travail du sol en production céréalière*, Paris, ITCF, 305 p.

J

Jacob F., 1997. *La souris, la mouche et l'homme*, Paris, O. Jacob, 220 p.

Jacques P., Delfosse P., Ongena M., Lepoivre P., Cornélis P., Koedam N., Neirinx L., Thonart P., 1993. Les mécanismes biochimiques développés par les *Pseudomonas* fluorescents dans la lutte biologique contre les maladies des plantes transmises par le sol, *Cah. Agric.*, 2 : 301-307.

Jacquin C., Deumier J.-M., Leroy P., 1993. LORA et la gestion de l'eau dans l'exploitation agricole, *Perspect. Agric.*, 184 : 73-82.

- Jaillard B., Schneider A., Mollier A., Pellerin S., 2000.** Modélisation du prélèvement minéral par les plantes fondée sur le fonctionnement bio-physico-chimique de la rhizosphère, in Maillard P., Bonhomme R. (eds.), *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, Versailles, Inra, « Les colloques », 93 : 253-287.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.-C., Mori A., 1977.** Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols, *Bull. Tech. Inf.*, 324-325, 627-641.
- James W.C., 1974.** Assessment of plant diseases and losses, *Ann. Rev. Phytopathol.*, 12 : 27-48
- James W.C. Shih C.S., Hodgson W.A., Callbeck L.C., 1972.** The quantitative relationship between late blight of potato and loss in tuber yield, *Phytopathol.*, 62 : 92-96.
- Jankauskas B., Jankauskiene G., 2003.** Erosion-preventive crop rotations for landscape ecological stability in upland regions of Lithuania, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 95 (1) : 129-142.
- Jarvis S.C., Stockdale E.A., Shepherd M.A., Powlson D.S., 1996.** Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement, *Adv. Agron.*, 57 : 187-235.
- Jensen E.S., Hauggaard-Nielsen H., 2003.** How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and soil*, 252 : 177-186.
- Jesus Junior W.C., Vale F.X.R., Coelho R.R., Paul P.A., Hau B., Bergamin Filho A., Zambolim L., Berger R.D., 2003.** Relationships between angular leaf spot, healthy leaf area, effective leaf area and yield of *Phaseolus vulgaris*, *Eur. J. Plant Pathol.*, 109 : 625-632.
- Jeuffroy M.-H., Bouchard C., 1999.** Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number, *Crop Sci.*, 39 : 1385-1393.
- Jeuffroy M.-H., Recous S., 1999.** Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilisation, *Eur. J. Agr.*, 10 : 129-144.
- Jeuffroy M.-H., Girard M.-L., Barré C., 2000a.** Qualité du blé tendre : comprendre et prévoir la teneur en protéines des grains, *Perspect. Agr.*, 261 : 24-31.
- Jeuffroy M.-H., Barré C., Bouchard C., Demotes-Mainard S., Devienne-Barret F., Girard M.-L., Recous S., 2000b.** Fonctionnement d'un peuplement de blé en conditions de nutrition azotée sub-optimale, in Bonhomme R., Maillard P. (eds.), *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, Paris, Inra, « Les colloques », 93 : 289-304.
- Jiang P., Thelen K.D., 2004.** Effects of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn-soybean cropping system, *Agron. J.*, 96 (1) : 252-258.
- Joannon A., 2004.** *Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques. Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 230 p. + annexes.
- Joannon A., Souchère V., Tichit M. 2005.** Analyse de la gestion spatialisée de l'exploitation agricole à partir de l'utilisation du parcellaire, in Laurent C., Thion P., *Agricultures et territoires*, Paris, Hermès, 302 p.
- Johnson K.B., 1987.** Defoliation, disease, and growth: a reply, *Phytopathol.*, 77 : 1495-1497.
- Johnson K.B., 1992.** Evaluation of a mechanistic model that describes Potato Crop Losses caused by multiple pests, *Phytopathol.*, 82 (3) : 363-369.
- Johnson K.B., Teng P.S., 1990.** Coupling a disease progress model for early blight to a model of potato growth, *Phytopathol.*, 80 : 416-425.
- Johnson R., Jellis G.J. (eds.), 1992.** *Breeding for disease resistance*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 210 p.
- Johnson W.C., Mullinix B.G., 1995.** Weed management in peanut using stale seedbed techniques, *Weed Sci.*, 43 : 293-297.
- Jones H.G., 1992.** *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*, Cambridge, Cambridge University Press, 2nd ed., 428 p.
- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor L., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ricthie J.T., 2003.** The DSSAT cropping system model, *Eur. J. Agron.*, 18 (3-4) : 235-265.
- Jordan V.W., Leake A.R. Ogilvy S.E., 2000.** Agronomic and Environmental Implications of Soil Management Practices in Integrated Farming Systems. *Aspect Appl. Biol.*, 62 : 61-66.
- Josien E., Dedieu B., Chassaing C., 1994.** Étude de l'utilisation du territoire en élevage herbager. L'exemple du réseau extensif bovin Limousin, *Fourrages*, 138 : 115-134.
- Jouve P., à paraître.** Périodes et ruptures dans l'évolution des savoirs agronomiques et de leur enseignement, in *Histoire et Agronomie : entre ruptures et durée*, Robin P., Aeschlimann J.-P., Feller C. (eds.), « Colloques et Séminaires », Paris, IRD.

Julien J.-L., 1989. Détermination de normes d'interprétation d'analyse de terre en vue de la fertilisation potassique. L'exemple de la Basse-Normandie, *Sci. Sol.*, 27 : 131-144.

Jullien A., Malézieux É., Michaux-Ferrière N., Chillet M., Ney B., 2001a. Within-bunch variability in banana fruit weight: importance of developmental lag between fruits, *Ann. Bot.*, 87 (1) : 101-108.

Jullien A., Munier-Jolain N.G., Malézieux É., Chillet M., Ney B., 2001b. Effect of pulp cell number and assimilate availability on dry matter accumulation rate in a banana fruit (*Musa* sp. AAA group 'Grande Naine' Cavendish subgroup), *Ann. Bot.*, 88 (2) : 321-330.

Jungk A., Claassen N., 1997. Ion diffusion in the soil-root system, *Adv. Agron.*, 61 : 53-110.

Justes E., Meynard J.-M., Mary B., Plénet D., 1997. Use of nitrate concentration in stem base extract of wheat and maize crops to manage nitrogen fertilization: the JUBIL[®] method, in Lemaire G. (ed.), *Diagnosis of the Nitrogen status in crops*, Berlin, Springer-Verlag, 163-187.

Justes E., Mary B., Meynard J.-M., Machet J.-M., Thelier-Huche L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crop, *Ann. Bot.*, 74 : 397-407.

K

Karlen D.L., Andrews S.S., Doran J.W., 2001. Soil quality: current concepts and applications, *Adv. Agron.*, San Diego, Academic press, 74 : 1-40.

Karlen D.L., Varvel G.E., Bullock D.G., Cruse R.M., 1994. Crop Rotations for the 21st Century, *Adv. Agron.*, 53 : 1-45.

Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation, *Soil Sci. Am. J.*, 61 : 4-10.

Katerji N., 1977. Contribution à l'étude de l'évapotranspiration réelle du blé tendre d'hiver. Application à la résistance du couvert en relation avec certains facteurs du milieu, thèse de docteur-ingénieur, Paris, Ina P-G, 119 p.

Kay B.D., da Silva A.P., Baldock J.A., 1997. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedo-transfer functions, *Can. J. Soil Sci.*, 77 : 655-667.

Keating B.A., Gaydon D., Huth N.I., Probert M.E., Verburg K., Smith C.J., Bond W., 2002. Use of

modelling to explore the water balance of dryland farming systems in the Murray-Darling basin, Australia, *Eur. J. Agron.*, 18 : 159-169.

Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L., Probert M.E., Robertson M.J., Holzworth D., Huth N.I., Hargreaves J.N.G., Meinke H., Hochman Z., Mc Lean G., Verburg K., Snow V., Dimes J.P., Silburn M., Wang E., Brown S., Bristow K.L., Asseng S., Chapman S., McCown R.L., Freebairn D.M., Smith J.C., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming system simulation, *Eur. J. Agron.*, 18 (3-4) : 267-288.

Kendall D.A., 2003. Soil tillage and epigeal predatory arthropods, in El Titi A. (ed.), *Soil Tillage in Agroecosystems*, Boca-Raton (USA), CRC Press, 297-342.

Khaity M., Lemaire G., 1992. Dynamics of shoot and root growth of Lucerne after seeding and after cutting, *Eur. J. Agron.*, 1 : 241-247.

Kik R., 1990. A method for reallotment research in land development projects in the Netherlands, *Agric. Syst.*, 127-138.

Kiniry J.R., Williams J.R., Gassman P.W., Debaeke P., 1992. A general, process oriented model for two competing plant species, *Trans. Asae*, 35 (3) : 801-810.

Kladivko E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology, *Soil Tillage Res.*, 61 : 61-76.

Klatzmann J., 1955. *La localisation des cultures et des productions animales en France*, Paris, Imprimerie nationale, 477 p.

Kniemeyer O., Buck-Sorlin G.H., Kurth W., 2004. A graph grammar approach to artificial life, *Artif. Life*, 10 : 413-31.

Köller K., 2003. Techniques of soil tillage, in El Titi A. (ed.), *Soil tillage in agroecosystems*, Boca Raton, CRC Press, 1-26.

de Koning G.H.J., Verburg P.H., Veldkamp A., Fresco L.O., 1999. Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador, *Agric. Sys.*, 61 : 77-93.

Koul O., Dhaliwal G.S., Cuperus G.W. (eds.), 2004. *Integrated Pest Management: Potential, Constraints and Challenges*, Wallingford, Cabi Publishing, 336 p.

Koulbaly B., Dakouo D., Vognan G., 1998. Contraintes au désherbage des cultures en zone cotonnière ouest du Burkina Faso, *17^e Conférence du Columa*, Dijon (France). 9-11/12/98., ANPP, 1259-1266.

Kreiter P., Graille G., Thaon M., Lanza R., Tamonte M., Germain C., Germain J.-F., Hantzberg H., 2004. Premiers résultats de protection biologique contre deux cochenilles

pseudococcines, *Phytoma – La défense des végétaux*, 568 : 38-40.

Kromp B., 1999. Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 74 : 187-228.

Kropff M.J., 1988. Modelling the effects of weeds on crop production, *Weed Res.*, 28 : 465-471.

Kropff M.J., Teng P.S., Rabbinge R., 1995. The Challenge of Linking Pest and Crop Models, *Agric. Syst.*, 49 : 413-434.

Kropff M.J., Spitters C.J.T., Schnieders B.J., de Joenje W., Groot W., 1992. An ecophysiological model for interspecific competition, applied to the influence of *Chenopodium album* L. on sugar beet – II. Model evaluation. *Weed Res.*, 32 : 451-463.

Kumar K., Goh K.M., 2000. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yields and nitrogen recovery, *Adv. Agron.*, 68 : 197-319.

Kurstjens D.A.G., Kropff M.J., 2001. The impact of uprooting and soil-covering on the effectiveness of weed harrowing, *Weed Res.*, 41 : 211-228.

Kwaad F.J.P.M., Van Der Zijp M., Van Dijk P.M. (1998). Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess soils in the Netherlands, *Soil Tillage Res.*, 46 : 13-21.

L

Lacape M., 1998. *Analyse écophysologique de la réponse de variétés de cotonnier au déficit hydrique*, thèse de docteur de l'Ensam, Montpellier, 120 p.

Lake J.V., Bock G.R., Goode J.A., 1997. *Precision Agriculture: Spatial and Temporal Variability of Environmental Quality*, Chichester, Wiley, 251 p.

Lal R., 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality, *Crit. Rev. Plant Sci.*, 17 (4) : 319-464.

Lal R., 1999. Long-term tillage and wheel traffic effects on soil quality for two central Ohio soils, *J. Sustain. Agric.*, 14 : 67-84.

Lal R., 2000. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century, *Soil Sci.*, 165 : 191-207.

Lal R., 2001. Managing world soils for food security and environmental quality, *Adv. Agron.*, 74 : 155-192.

Lal R., 2002. The potential of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect, *Adv. Agron.*, 76 : 1-30.

Lançon J., Wery J., Rapidel B., Gaborel C., Gerardeaux E., Ballo D., Brevault T., Fadenon B., 2004. Prototyping integrated cotton crop management systems for specific ecological and socio-economic constraints in Western Africa, in *Proceedings of the VIIIth ESA Congress*, Copenhagen, July 11-15th 2004, Taastrup, Royal Veterinary and Agricultural University, 966 p.

Landais E., Deffontaines J.-P., 1990. Les pratiques de l'agriculteur : point de vue sur un courant nouveau de la recherche agronomique, in Brossier et al. (eds.), *Modélisation systémique et Systèmes agraires, Décision et organisation*, Paris, Inra, 31-64.

Lanquetuit D., Sebillotte M., 1997. *Protection de l'eau. Le guide Ferti-Mieux pour évaluer les modifications de pratiques des agriculteurs*, Paris, Anda, 179 p.

Lardon S., Capitaine M., Benoît M., 2000. Les modèles graphiques pour représenter l'organisation spatiale des activités agricoles, in *Journées de Rochebrune : rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*, Paris, ENST, 127-150.

Lardon S., Deffontaines J.-P., Osty P.-L., 2001. Pour une agronomie du territoire : prendre en compte l'espace pour accompagner le changement technique, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 87 : 187-198.

Latiri-Souki K., Aubry C., Doré T., Sebillotte M., 1992. Élaboration du rendement du blé dur en conditions semi-arides en Tunisie : relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique, *Agron.*, 12 : 31-43.

Latour B., 1987. *La science en action*, Paris, La Découverte, 450 p.

Latour B., 1995. *Le métier de chercheur. Le regard d'un anthropologue*, Paris, Inra Éditions, « Sciences en questions », 106 p.

Lattaud C., 2004. Co-evolution in artificial ecosystems: Competition and cooperation using allelopathy, *Artif. Evol. Lect. Notes Comput. Sci.*, 2936 : 319-330.

Laurent C., Thion P., 2005. *Agricultures et territoires*, Paris, Hermès, 302 p.

Laurent F., Eschenbrenner G., 1995. Dynamique de l'azote : l'effet des résidus de culture et du travail du sol, *Perspect. Agric.*, 206 : 20-29.

Lavelle P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptative strategies that determine

- ecosystem function, in Begon M., Fitter A.H. (ed.), *Adv. Ecol. Res.*, New-York, Academic Press, 93-132.
- Lavelle P., Spain A.V., 2001.** *Soil ecology*. Dordrecht (NL), Kluwer Academic Publishers, 654 p.
- Lea P.J., Morot-Gaudry J.-F. (eds), 2001.** *Plant nitrogen*, coéd. Inra Éditions-Springer, 407 p.
- Le Bail M., 1997.** Maîtrise de la qualité des céréales à l'échelle du bassin d'approvisionnement d'une entreprise de collecte-stockage. Approche agronomique, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 236 p.
- Le Bail M., 2000.** Qualité des produits végétaux et territoire : contribution de l'agronomie, *OCL*, 7 : 499-503.
- Le Bail M., 2001.** Spécificité locale pour un produit banal. Le blé dur destiné à la fabrication de pâtes alimentaires, in Moity-Maïzi P., de Sainte-Marie C., Geslin P., Muchnik J., Sautier D. (eds), *Terroirs, savoir-faire, innovations, Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 32, Paris, Inra, 37-50.
- Le Bail M., 2002.** Le bassin d'approvisionnement : territoire de la gestion agronomique de la qualité des productions végétales, in Prévost P. (ed.), *Agronomes et territoires – Deuxième édition des Entretiens du Pradel*, Paris, L'Harmattan, 213-228.
- Le Bail M., 2003.** GMO/non GMO segregation in the supply zone of country elevators, in Boelte B. (ed.), *The 1st european conference on the co-existence of genetically modified crops with conventional and organic crops*, Copenhagen, Danish Institute of Agricultural Sciences, 125-27.
- Le Bail M., Meynard J.-M., 2003.** Yield and protein concentration of spring barley: the effects of cropping systems in the Paris basin (France), *Agron.* 23 : 13-27.
- Le Bail M., Makowski D., 2004.** A model-based approach for optimizing segregation of soft wheat in country elevators, *Eur. J. Agron.*, 21 : 171-180.
- Le Bail M., Jeuffroy M.-H., Bouchard C., Barbottin A., 2005.** Is it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements? *Eur. J. Agron.*, 23 (4) : 379-391.
- Le Ber F., 1995.** A prototype model-based expert system for agricultural landscape analysis, *AI Appl.*, 9 : 91-101.
- Le Ber F., Benoît M., 1998.** Modelling the spatial organization of land use in a farming territory. Example of a village in the Plateau Lorrain, *Agron.*, 18 : 103-115.
- Le Bissonnais Y., 1996.** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility – I. Theory and methodology, *Eur. J. Soil Sci.*, 47 : 425-437.
- Le Cœur D., Baudry J., Burel F., Thenail C., 2002.** Why and how we should study field boundaries biodiversity in an agrarian landscape context, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 89 (1-2) : 23-40.
- Le Corre G., Ferret M., Dupont S., Carof S., Maisonneuve J.C., 2004.** Protection biologique intégrée contre la mouche du chou *Delia radicum*, *Phytoma – La défense des végétaux*, 571 : 30-32
- Lecouteux E., 1855.** *Principes économiques de la culture améliorante*, Paris, Maison Rustique, 340 p.
- Le Gal P.-Y., Papy F., 1998.** Co-ordination processes in a collectively managed cropping system: Double cropping of irrigated rice in Senegal, *Agric. Syst.*, 57 (2) : 135-159.
- Le Gal P.-Y., Lejars C. 2004.** Espace et gestion des bassins d'approvisionnement : cas des sucreries de canne, *Cah. Agric.*, 13 (6) : 554-562.
- Le Gouis J., Béghin D., Heumez E., Pluchard P., 2000.** Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiency in winter wheat, *Eur. J. Agron.*, 12 : 163-173.
- Le Hénaff G., Micoud A., Courbet E., Labre V., Magny B., 2000.** Blé, raisonner le risque piétin verse, *Phytoma – La défense des végétaux*, 532 : 51-54.
- Le Houérou B., 1994.** Transfert du fumier des cultures vers les prairies en Lorraine. Outils et méthodes pour changer de pratiques, *Fourrages*, 140 : 471-488.
- von Liebig J., 1840.** *Chimie organique appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture*, Paris, CTHS, 392 p.
- Le May C., Schoeny A., Tivoli B., Ney B., 2005.** Improvement and validation of a pea crop growth model to simulate the growth of cultivars infected with ascochyta. *Eur. J. Plant Pathol.*, 112 (1) : 1-12.
- Lebreton J.-D., Sabatier R., Banco G., Bacou A.-M., 1991.** Principal component and correspondance analyses with respect to instrumental variables: an overview of their role in studies of structure – activity and species – environment relationships, in Devillers J., Karcher W. (eds), *Applied multivariate analysis in SAR environmental studies*, Brussels et Luxembourg, ECSC, EEC, EAEC, 85-114.

- Lecœur J., Sinclair T.R., 1996.** Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits, *Crop Sci.*, 36 : 331-335.
- Lecœur J., Ney B., 2003.** Change with time in potential radiation use efficiency in field pea, *Eur. J. Agron.*, 19 : 91-105.
- Lecœur J., Wery J., Turc O., Tardieu F., 1995.** Expansion of pea leaves subjected to short water deficit: cell number and cell size are sensitive to stress at different periods of leaf development, *J. Exp. Bot.*, 46 (290) : 1093-1101.
- Lee K.E., 1985.** *Earthworms. Their ecology and relationships with soil and land use*, Sydney, Academic Press, 411 p.
- Leenhardt D., Trouvat J.-L., Gonzalès G., Pérarnaud V., Prats S., Bergez J.E., 2004a.** Estimating irrigation demand for water management on a regional scale – I. ADEAUMIS, a simulation platform based on bio-decisional modelling and spatial information, *Agric. Water Manage.* 68 : 207-232.
- Leenhardt D., Trouvat J.-L., Gonzalès G., Pérarnaud V., Prats S., Bergez J.E., 2004b.** Estimating irrigation demand for water management on a regional scale – II. Validation of ADEAUMIS, *Agric. Water Manage.*, 68 : 233-250.
- Leitch M.H., Jenkins P.D., 1995.** Influence of nitrogen on the development of *Septoria* epidemics in winter wheat, *J. Agric. Sci.*, 124 : 361-368.
- Lejay L., Tillard P., Lepetit M., Olive F.D., Filleur S., Daniel-Vedele F., Gojon A., 1999.** Molecular and functional regulation of two nitrate uptake systems by N and C status of *Arabidopsis* plants. *Plant J.*, 18 : 509-519.
- Lemaire G. (ed.), 1997.** *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Berlin, Springer, 239 p.
- Lemaire G., Salette J., 1984.** Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères – II. Étude de la variabilité entre génotypes, *Agron.*, 4 : 431-436.
- Lemaire G., Gastal F., 1997.** N uptake and distribution in plant canopies, in Lemaire G. (ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*, Heidelberg, Springer Verlag, 3-44.
- Lemaire G., Nicolardot B. (eds), 1997.** *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Versailles, Inra Éditions, 333 p.
- Lemaire G., Millard P., 1999.** An ecophysiological approach to modelling resource fluxes in competing plants, *J. Exp. Bot.*, 50 : 15-28.
- Lemaire G., Recous S., Mary B., 2004.** Managing residues and nitrogen in intensive cropping systems. New understanding for efficient recovery by crops, *Proceedings IVth Crop Science Congress*, Brisbane, Gosford, The Regional Institute Ltd, 19 p.
- Lemaire G., Avice J.C., Kim T.H., Ourry A., 2005.** Developmental changes in shoot N dynamics of lucerne (*Medicago sativa* L.) in relation to leaf growth dynamics as a function of plant density and hierarchical position within the canopy, *J. Exp. Bot.*, 56 : 935-943.
- Lemaire G., Onillon B., Gosse G., Chartier M., Allirand J.-M., 1991.** Nitrogen distribution within a lucerne canopy during regrowth: relation with light distribution, *Ann. Bot.*, 68 : 483-488.
- Lemaire J.-M., Doussinault G., Cavalier N., Perraton B., Tivoli B., 1981.** Le piétin échaudage, *Perspect. Agric.*, 53 : 34-39.
- Lepoivre P., 2003.** L'amélioration génétique de la résistance aux agents phytopathogènes, in *Phytopathologie*, Bruxelles, De Boeck, 428 p.
- Leroy P., Deumier J.-M., Jacquin C., 1997.** IRMA : un simulateur de l'organisation des chantiers d'irrigation sur l'ensemble de la sole irriguée, *Perspect. Agric.*, 228 : 76-83.
- Lescourret F., Génard M., Habib R., Fishman S., 2001.** Variation in surface conductance to water vapour diffusion in peach fruit and its effects on fruit growth assessed by a simulation model, *Tree Physiol.*, 21 : 735-741.
- Lescourret F., Blecher N., Habib R., Chadoeuf J., Agostini D., Pailly O., Vaissière B., Poggi I., 1999.** Development of a simulation model for studying kiwi fruit orchard management, *Agric. Syst.*, 59 : 215-239.
- Lheureux K., Libeau-Dulos M., Nilsagård H., Rodriguez-Cerezo E., Menrad K., Menrad M., Vorgrimler D., 2003.** Review of GMOs under research and development and in the pipeline in Europe, *European Commission. Joint Research Centre*, 127 p.
- Limaux F., Meynard J.-M., Recous S., 2001.** Le témoin double-densité pour déclencher la fertilisation azotée du blé : bases théoriques et principes généraux, *Perspect. Agric.*, 273 : 62-70.
- Limaux F., Recous S., Meynard J.-M., Gückert A., 1999.** Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat, *Plant and Soil*, 214 : 49-59.
- Liu J., Taylor W.W., eds., 2002.** *Integrating Landscape Ecology into Natural Resources Management*, Cambridge, Cambridge University Press, 480 p.
- Llorens J.M., 2001.** La méthode de raisonnement de la fertilisation PK, un outil pour

l'agriculture, in Thévenet G., Joubert A. (eds.), *Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée*, Blois, Comifer-Gemas, 129-140.

Lockeretz W., Anderson M.D., 1993. *Agricultural research alternatives*, Lincoln and London, University of Nebraska Press, 239 p.

Lockhart J.A., 1965. An analysis of irreversible plant cell elongation, *J. Theor. Biol.*, 8 : 264-275.

Lombard K., 2003. *Statut organique et fertilité des sols dans les systèmes de culture bananiers en Guadeloupe*, mémoire de DAA production végétale durable, Ensar, 50 p.

Lonchamp J.-P., Barralis G., 1983. Effets de faibles potentiels hydriques sur les possibilités de germination des semences d'*Alopecurus myosuroides* Huds. et de *Matricaria perforata* Mérat, *Agron.*, 3 : 435-441.

Lonchamp J.-P., Barralis G., 1988. Caractéristiques et dynamique des mauvaises herbes en région de grande culture : le Noyonnais (Oise), *Agron.*, 8 : 757-766.

Lopes D.B., Berger R.D., 2001. The effects of rust and anthracnose on the photosynthetic competence of diseased bean leaves, *Phytopathol.*, 91 : 212-220.

Lotka A.J., 1925. *Elements of physical biology*, Baltimore, Williams and Wilkins, 460 p.

Loyce C., 1998. *Mise au point d'itinéraires techniques pour un cahier des charges multicritère : le cas de la production de blé éthanol en Champagne crayeuse* thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 196 p.

Loyce C., Bouchard C., Meynard J.-M., Roland B., Doussinault G., Bernicot M.-H., Haslé H., 2001. Les variétés tolérantes aux maladies : une innovation majeure à valoriser par des itinéraires techniques économes, *Perspect. Agric.*, 268 : 50-56.

Loyce C., Rellier J.-P., Meynard J.-M., 2002a. Management planning for winter wheat with multiple objectives – I. The BETHA system, *Agric. Syst.*, 72 : 9-31.

Loyce C., Rellier J.-P., Meynard J.-M., 2002b. Management planning for winter wheat with multiple objectives – II. Ethanol-wheat production, *Agric. Syst.*, 72 : 33-57.

Lozet J., Mathieu C., 1990. *Dictionnaire de science du sol*, Paris, Lavoisier, 384 p.

Lucas J.A., 1998. Disease management by host resistance, in *Plant pathology and plant pathogens*, Oxford, Blackwell Science, 274 p.

Ludwig B., Le Bissonnais Y., Souchère V., Cerdan O., Jetten V., 2004. Intégration des pra-

tiques agricoles dans la modélisation du ruissellement et de l'érosion : les modèles LISEM et STREAM, in Monestiez P., Lardon S., Seguin B. (eds.), *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, Versailles, Inra Édition, « Science Update », 43-62.

Luneau C., 2004. *Analyse des stratégies de lutte contre le mildiou pour l'optimisation de l'utilisation du cuivre en viticulture biologique en réponse à la nouvelle réglementation européenne*, mémoire d'ingénieur de l'Esitpa, 32 p. + annexes.

Lupwayi N.Z., Arshad M.A., Rice W.A., Clayton G.W., 2001. Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils under conventional and zero tillage management, *Appl. Soil. Ecol.*, 16 : 251-261.

Luxmoore R.J., 1981. Micro-, meso-, macroporosity in soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 671-673.

Lybecker D.W., Schweizer E.E., King R.P., 1991. Weed management decisions in corn based on bioeconomic modeling, *Weed Sci.*, 39 : 124-129.

M

Machet J.-M., Recous S., 1995. La gestion de l'interculture : une nécessité pour limiter le lessivage des nitrates, *Persp. Agric.*, 206 : 4-8.

Machet J.-M., Dubrulle P., Louis P., 1990. AZOBIL: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method, in *Proc. of 1st Congress of the European Society of Agronomy*, session 2, Colmar, ESA, 21.

Madden L.V., Nutter F.W., 1995. Modeling crop losses at the field scale, *Can. J. plant Pathol.*, 17 : 124-137.

Mäder P., Fließbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P., Niggli U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming, *Sci.*, 296 : 1694-1697.

Maigrot J.-L., de Sède M.-H., Érard R., Defontaine J.-P., 2004. Fonctionnement et dynamique des formes ligneuses au sein d'une exploitation agricole. Un raisonnement géo-agronomique, *Cah. Agric.*, 13 : 321-329.

Maillard P., Bonhomme R. (eds), 1998. *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, Versailles, Inra Éditions, 566 p.

Mainguy P., 1989. *La qualité dans le domaine agro-alimentaire*, rapport de mission, ministère

de l'Agriculture et de la Forêt, secrétariat d'État chargé de la Consommation.

Makowski D., Wallach D., Meynard J.-M., 2001a. Statistical methods for predicting responses to applied nitrogen and calculating optimal nitrogen rates, *Agron. J.*, 93 (3) : 531-539.

Makowski D., Hendrix E.M.T., Van Ittersum M.K., Rossing W.A.H., 2001b. Generation and presentation of nearly optimal solutions for mixed-integer linear programming, applied to a case in farming system design, *Eur. J. Oper. Res.*, 132 : 425-438.

Makowski D., Jeuffroy M.-H., Guérif M., 2004. Bayesian methods for updating crop model predictions, applications for predicting biomass and grain protein content, in Van Boekel M.A.J.S., Stein A., Van Bruggen A.H.C. (eds.), *Bayesian statistics and Quality Modelling in the Agro-Food Production Chain*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 57-68.

Makowski D., Naud C., Monod H., Jeuffroy M.-H., Barbottin A., 2006. Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model predictions, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, sous presse.

Malézieux E., Trébuil G., Jaeger M., 2001. *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, Montpellier, Paris, coéd. Cirad-Inra, 447 p.

Malkina-Pykh I.G., Pykh Y.A., 2003. *Sustainable food and agriculture*, Southampton, Boston, WIT Press, 376 p.

Manhoudt A.G.E., de Snoo G.R., 2003. A quantitative survey of semi-natural habitats on Dutch arable farms, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 97 : 235-240.

Manhoudt A.G.E., Van de Ven G.W.J., Udo de Haes H.A., de Snoo G.R., 2002. Environmental labelling in the Netherlands: a framework for integrated farming, *J. Environ. Manage.*, 65 : 269-283.

Manichon H., 1982. *Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique*, thèse de docteur-ingénieur, Ina P-G, Paris, 214 p.

Manichon H., 1987. Observation de l'état structural et mise en évidence de l'effet de compactage des horizons travaillés, in Monnier G., Goss M.-J. (eds.), *Soil compaction and Regeneration*, Rotterdam/Boston, Balkema, 39-52.

Manichon H., Sebillotte M., 1973. *Étude de la monoculture du maïs. Résultats d'une enquête agronomique dans les régions de Garlin et de*

Navarrenx (Pyrénées-Atlantiques), Ina P-G, Paris, 140 p.

Manichon H., Caneill J., 1987. Approche agroeconomique de la maîtrise des coûts de la culture betteravière, *Sucr. Fr.*, 118 : 323-331.

Manichon H., Roger-Estrade J., 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture, in Combe L., Picard D. (eds.), *Les systèmes de culture*, Paris, Inra, 27-55.

Maquart D., Gras R., Mamy J., Deffontaines J.-P., Turc L., 1971. Essai de programmation de la recherche. Département d'Agronomie. *Ann. Agron.*, hors série, Inra, Paris, 70 p. + 1 graphe.

Marchoux G., Gebre Selassie K., Palloix A., Daubeze A.-M., 1997. Stratégies de lutte contre les virus des cultures maraichères. Exemple des solanacées, in *Annales de l'ANPP, V^e conférence sur les maladies des plantes*, Tours, 959-965.

Mari J.-F., Le Ber F., Benoît M., 2002. Segmentation temporelle et spatiale de données agricoles, *Rev. Int. Géomat.*, 12 (4) : 439-460.

Marschner H., 1995. *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd ed., London, Academic press, 889 p.

Marshall E.J.P., Moonen A.C., 2002. Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 89 : 5-21.

Marshall E.J.P., Brown V.K., Boatman N.D., Lutman P.J.W., Squire G.R., Ward L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields, *Weed Res.*, 43 : 77-89.

Martin P., 2000. Maîtrise des flux de polluants sur les territoires agricoles, *OCL*, 7 (6) : 512-515.

Martin P., Meynard J.-M., 1997. Systèmes de culture, érosion et pollution des eaux par l'ion nitrate, *IN*, Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Neveu A., Papy F. (eds.), *L'eau dans les agrosystèmes : production végétale et qualité de l'eau*, Paris, Inra Éditions, 303-322.

Martin P., Joannon A., Souchère V., Papy F., 2004. Management of soil surface characteristics for soil and water conservation, case of a silty loam region: the Pays de Caux, *Earth Surf. Processes Landform*, 29 : 1105-1115.

Mary B., Recous S., 1994. Measurement of nitrogen mineralization and immobilization fluxes in soil as a means of predicting net mineralization, *Eur. J. Agron.*, 3 : 291-300.

Mary B., Beaudouin N., Benoit M., 1997. Prévention de la pollution nitrrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau, in Lemaire G.,

- Nicolardot B. (eds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Paris, Inra Éditions, « Les colloques », 83, 289-312.
- Mary B., Laurent F., Beaudoin N., 2002. La gestion durable de la fertilisation azotée, *Proc. of the 65th IIRB Congress*, February 2002, Bruxelles, Tirlémont, Irbab, 59-65.
- Mary B., Recous S., Darwis D., Robin D., 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil, *Plant and Soil*, 181 : 71-82.
- Masle J., Sebillotte M., 1981. Étude de l'hétérogénéité d'un peuplement de blé : origine des différentes catégories d'individus du peuplement, éléments de description de sa structure, *Agron.* 1 : 217-223.
- Massai I., 1995. Diagnostic agronomique sur des cultures de haricot lingot dans le Lauragais, mémoire de DAA génie agronomique, Ensam, 43 p. + annexes.
- Masson P., Morel C., Martin E., Oberson A., Friesen D., 2001. Comparison of soluble P in soil water extracts determined by ion chromatography, colorimetric and induced coupled plasma techniques in ppb range, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 33 : 2241-2253.
- Matalon B., 1996. *La construction de la science. De l'épistémologie à la sociologie de la connaissance scientifique*, Lausanne-Paris, Delachaux-Niestlé, 230 p.
- Mathews G.A., 1993. Developments in the application of pesticides, in Zadoks J.C. (ed.), *Modern crop protection: development and perspectives*, Wageningen, Wageningen Pers, 61-68.
- Mathieu A., 2001. L'invention des pratiques en agronomie. Réflexions sur l'intérêt de la connaissance des formes de connaissance des agriculteurs. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 87 (4) : 199-208.
- Mathieu B., 2005. *Une démarche agronomique pour accompagner le changement technique. Cas de l'emploi du traitement herbicide dans les systèmes de culture à sorgho repiqué au Nord-Cameroun*, thèse de doctorat de l'Ina-PG, Paris, Ina P-G, 232 p. + annexes.
- Matthews R.B., Stephens W., 2002. *Crop-soil Simulation Models: Applications in Developing Countries*, Wallingford, Cabi Publishing, 277 p.
- Mavromatis T., Boote K.J., Jones J.W., Irmak A., Shinde D., Hoogenboom G., 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials, *Crop Sci.*, 41 : 40-51.
- Maxime F., Mollet J.-M., Papy F., 1995. Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture, *Cah. Agric.*, 4 : 351-362.
- Maxime F., Nicoletti J.-P., Leroy P., Papy F., 1997. Donner de la souplesse au choix d'assolement par rotations-cadres, in *Actes du colloque « Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles »*, 10-11 décembre 1997, Laon, 85-99.
- Maxwell B.D., Roush M.L., Radosevich S.R., 1990. Predicting the evolution and dynamics of herbicide resistance in weed populations, *Weed Technol.*, 4 : 2-13.
- Mazé A., Aubry C., Papy F., 2000. La certification des exploitations agricoles, note de recherche, *Écon. Rurale*, 258 : 30-41.
- Mazé A., Cerf M., Le Bail M., Papy F. 2004a. Entre mémoire et preuve : le rôle de l'écrit dans les exploitations agricoles, *Nat. Sci. Soc.*, 12 : 18-29.
- Mazé A., Maxime F., Hopquin J.-P., Galan M.-B. 2004b. La mise en place d'un dispositif d'assurance qualité : enjeux organisationnels pour le développement agricole, (ed.). *Agronomes et innovations – Troisième édition des Entretiens du Pradel*, Paris, Académie d'Agriculture de France, 12 p.
- Mc Cown R.L., 2002a. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects, *Agric. Syst.*, 74 (1) : 179-220.
- Mc Cown R.L., 2002b. Locating agricultural decision support systems in the troubled past and socio-technical complexity of 'models for management', *Agric. Syst.*, 74 : 11-25.
- Mc Cown R.L., Hammer G.L., Hargreaves J.N.G., Holzworth D., Freebairn D.M., 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research, *Agric. Syst.*, 50 : 255-271.
- Mc Donald B.A., Linde C., 2002. The population genetics of plant pathogens and breeding strategies for durable resistance, *Euphytica*, 124 : 163-180.
- Mc Gechan M.B., Wu L. 2001. A review of carbon and nitrogen processes in European soil nitrogendynamics models, in Schaffer M.J., Ma L., Hansen S. (eds.), *Modelling carbon and nitrogen dynamics for soil management*, Boca Raton, Lewis Publishers, 103-171.
- Mc Rae R.J., Hill S.B., Henning J., Mehuys G.R., 1989. Agricultural Science and Sustainable Agriculture: a Review of the Existing Barriers to Sustainable Food Production and Potential, *Biol. Agric. Hortic.*, 6 : 173-219.

- Mc Roberts N., Hughes G., Savary S., 2003.** Integrated approaches to understanding and control of disease and pests in field crops, *Australas. Plant Pathol.*, 32 : 167-180.
- Mead A., Grundy A.C., Burston S., 1998.** Predicting the movement of seeds following cultivation. *Aspects Appl. Biol.*, 51 : 91-98.
- Meinke H., Baethgen W.E., Carberry P.S., Donatelli M., Hammer G.L., Selvaraju R., Stöckle C.O., 2001.** Increasing profits and reducing risks on crop production using participatory systems simulation approaches, *Agric. Syst.*, 70 : 493-513.
- Meisinger J.J., Hargrove W.L., Mikkelsen R.L., Williams J.R., Benson V.W., 1991.** Effects of cover crops on groundwater quality, in Hargrove et al. (eds.), *Cover crops for clean water. Soil and Water*, Ankeny, Soil and Water Conservation Society, 57-68.
- Mercau J.L., Sadras V.O., Satorre E.H., Messina C., Balbi C., Uribelarrea M., Hall A.J., 2001.** On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina, *Agric. Syst.* 67 : 83-103.
- Metral R., Wery J., 2001.** Evaluation of limiting factors of food legumes yield in farmer's field: development of a diagnosis methodology and first results in three french regions. in *4th European Conference on Grain Legumes*, July 8-12th 2001, Cracovie, Paris, AEP Editions, 48-49.
- Meynard J.-M., 1985.** *Construction d'itinéraires techniques pour la culture du blé d'hiver* thèse de docteur-ingénieur, Paris, Ina P-G, 236 p.
- Meynard J.-M., 1997.** Which crop models for decision support in crop management? In Ten Berge H.F.M., Stein A. (eds), *Model-based decision support in agriculture*, AB-DLO, Laon, Inra, 107-112.
- Meynard J.-M., 2003.** Agronomie et développement durable, in Thévenet G., Faedy L. (eds.), *Les fertilités du sol et les systèmes de culture*, Paris, Comifer/Gemas, 19-31.
- Meynard J.-M., Sebillotte M., 1983.** Diagnostic sur les causes de variation du rendement du blé dans une petite région, in *La fatigue des sols*, Paris, Inra Éditions, « Les colloques », 17, 157-168.
- Meynard J.-M., Girardin P., 1991.** Produire autrement, in *Quelles fertilisations demain ?* Strasbourg, 26-27 septembre 1991, Comifer, 10-28.
- Meynard J.-M., Le Bail M., 2001.** *Isolement des collectes et maîtrise des disséminations au champ*, Paris, Inra, INP, FNSEA, Acta, 56 p.
- Meynard J.-M., Jeuffroy M.-H., 2002.** Progrès génétique et agriculture durable, *Sél. Fr.*, 53 : 69-82.
- Meynard J.-M., Doré T., Habib R., 2001.** L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 87 (4) : 223-236.
- Meynard J.-M., Doré T., Lucas P., 2003.** Agonomic approach: cropping systems and plant diseases, *C.R. Biol.*, 326 : 37-46.
- Meynard J.-M., Reau R., Robert D., Saulas P., 1996.** Évaluation expérimentale des itinéraires techniques, in *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*, Paris, Acta, ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (DERF), 63-72.
- Meynard J.-M., Justes E., Machet J.-M., Recous S., 1997a.** Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ, in Lemaire G., Nicolardot B. (eds), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Paris, Inra Éditions, 183-200.
- Meynard J.-M., Aubry C., Justes E., Le Bail M., 1997b.** Nitrogen diagnosis and decision support, in Lemaire G. (ed), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Berlin, Springer, 147-161.
- Meynard J.-M., Cerf M., Guichard L., Jeuffroy M.-H., Makowski D., 2002.** Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agron.*, 22 : 817-829.
- Mignolet C., Schott C., Benoît M., 2004.** Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory: a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. The case of the Seine basin, *Agron.*, 24 : 219-236.
- Milaire H., 1995.** À propos de quelques définitions, *Phytoma - La défense des végétaux*, 474 : 7-9.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005.** *Millenium Ecosystem Assessment synthesis report*, [en ligne] disponible sur <http://www.millenniumassessment.org/en/Products.Synthesis.aspx> (consulté le 06/03/06), 219 p.
- Milleville P., 1972.** Approche agronomique de la notion de parcelle en milieu traditionnel africain : la parcelle d'arachide en moyenne Casamance, *Cah. Orstom*, « Biologie », 17 : 213-237.
- Milleville M., 1987.** Recherches sur les pratiques des agriculteurs, *Cah. Rech.-Dév.*, 16 : 3-7.
- Milthorpe F.L., Moorby J., 1974.** *An introduction to crop physiology*, Cambridge, Cambridge University Press, 212 p.

- Minchin P.E.H., Thorpe M.R., 1993.** Sink strength. A misnomer and best forgotten, in Farrar J.F. (ed.), *Sink strength. What is new and how to measure it?* *Plant Cell. Environ.*, 16 : 1039-1040.
- Minchin P.E.H., Thorpe M.R., Farrar J.F., 1993.** A Simple Mechanistic Model of Phloem Transport which Explains Sink Priority, *J. Exp. Bot.*, 44 : 947-955.
- Moity-Maïzi P., de Sainte-Marie C., Geslin P., Muchnik J., Sautier D., (eds.) 2001.** Systèmes agroalimentaires localisés. Terroirs, savoir-faire, innovations, *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 32 : 216 p.
- Monestiez P., Lardon S., Seguin B. (eds.), 2004.** *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, Versailles, Inra Éditions, « Science Update », 117-141.
- Monnier G., Stengel P., Fiès J.C., 1973.** Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agrégats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol, *Ann. Agron.*, 24 : 533-545.
- Monsi M., Saeki T., 1953.** Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion, *Jap. J. Bot.*, 14 : 22-52.
- Monteith J.L., 1972.** Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, *J. Appl. Ecol.*, 9 : 747-766.
- Monteith J.L., 1973.** *Principles of environmental physics*, London, Arnold, 241 p.
- Monteith J.L., 1977.** Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. London*, B 281 : 277-294.
- Morel C., 2002.** *Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution*, mémoire d'HDR, Institut polytechnique de Lorraine, 80 p.
- Morel C., Plenchette C., Fardeau J.C., 1992.** La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture du blé, *Agron.*, 12 : 565-579.
- Morel C., Linères M., Guivarch A., Kvarnström E., Parnaudeau V., Nicolardot B., Morel J.-L., 2003.** Phytodisponibilité et valeur fertilisante du phosphore de déchets urbains, in Agriculture et épandage de déchets urbains et agro-industriels, *Dossiers Environ. Inra*, 25 : 154 p.
- Morlat R., 1996.** *Les terroirs viticoles : concept produit valorisation*, Chaintré, Oenoplurimedia, 120 p.
- Morlon P., Benoît M., 1990.** Étude méthodologique d'un parcellaire d'exploitation agricole en tant que système, *Agron.*, Elsevier-Inra, 6 : 499-508.
- Morlon P. 2005.** La dimension spatiale des pratiques agricoles : une approche agronomique, in Laurent C. et Thion P., Hermès, *Agricultures et territoires*, 302 p.
- Morse Meyer D., Garnett L., Guthrie J.C., 1997.** A survey of dairy manure management practices in California, *J. Dairy Sci.*, 80 : 1841-1845.
- Moss S.R., 1980.** Some effects of burning cereal straw on seed viability, seedling establishment and control of *Alopecurus myosuroides* Huds., *Weed Res.*, 20 : 271-276.
- Mousset J., 1997.** *Mécagro : conseil en agro-équipement dans l'exploitation de grande culture*, Amiens, Le Biopôle Végétal, 338 p.
- Muller J.-C., Decroux J., Schvartz C., 2005.** Guide de la fertilisation raisonnée, Comifer, Paris, Éditions La France Agricole, 414 p.
- Mundt C.C., Cowger C., Garrett K., 2002.** Relevance of integrated management to disease durability, *Euphytica*, 124 : 245-252.
- Munier-Jolain N.G., Munier-Jolain N.M., Ney B., Roche R., Duthion C., 1998.** Analysis of seed growth rate for different species of grain legumes – I. Effect of modification of assimilates availability, *J. Exp. Bot.*, 49 : 1963-1969.
- Munier-Jolain N.M., Ney B., 1998.** Analysis of seed growth rate for different species of grain legumes – II. Cotyledon cell number and seed growth rate in Pea (*Pisum sativum* L.), *J. Exp. Bot.*, 49 : 1971-1976.
- Munier-Jolain N.M., Chauvel B., Gasquez J., 2002.** Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold bases options for weed species with contrasted competitive abilities, *Weed Res.*, 42 : 107-122.
- Munns D.N., 1977.** Mineral nutrition and the legume symbiosis, in Hardy R.W.F., Gibson A.H. (eds.), *A treatise on dinitrogen fixation*, New York, John Wiley and Sons, 353-371.
- Murphy D.V., Recous S., Stockdale E.A., Fillery I.R.P., Jensen L.S., Hatch D.J., Goulding W.T., 2003.** Gross nitrogen fluxes in soil: theory, measurement and application of ¹⁵N pool dilution techniques, *Adv. Agron.*, 79 : 69-119.
- Mutsaers H.J.W., Weber G.K., Walker P., Fisher N.M., 1997.** Design and conduct of on-farm trials, in Mutsaers H.J.W., Weber G.K., Walket P., Fisher N.M. (eds), *A field guide for on-farm experimentation*, Ibadan, IITA, CTA, Isnar, 101-133.

N

- Naïtho M., 2002.** Les modèles spatiaux dans l'enseignement agricole. L'environnement dans le diagnostic global d'exploitation, *Mappemonde*, 68 : 15-19.
- Nalewaja J.D., 2001.** Weeds and conservation agriculture, in García-Torres L., Benites J., Martínez-Vilela A. (eds.), *Ist World Congress on Conservation Agriculture*, Madrid, XUL, 191-200.
- Nario A., Pino I., Parada A.M., Rouanet J.L., Barrientos L., Montenegro A., 2001.** Effect of the crop rotation in the use of nitrogen (^{15}N), under conservation tillage, in García-Torres L., Benites J., Martínez-Vilela A. (eds.), *Ist World Congress on Conservation Agriculture*, Madrid, XUL, 359-364.
- Nasr J., Padilla M., 2004.** *Interfaces : agricultures et villes à l'Est et au Sud de la Méditerranée*, Beyrouth, Delta/Ifpo, 429 p.
- Navarrete M., Tordjman S., Roubay A., 2003.** La planification des plantations par les structures de première mise en marché dans la filière fruits et légumes. Comparaison des cas de la salade et de la pêche dans le Sud-Est de la France, *Fruits*, 58 : 261-274.
- Navarrete M., Maxime F., Bressoud F., Tordjman S., Papy F., 1999.** Planification des conduites culturales et différenciation des produits dans des exploitations maraîchères, *Cah. Agric.*, 8 : 171-179.
- N'Diènor M., 2001.** Coordination de différents niveaux de décisions et gestion technique d'une culture : cas de la tomate industrielle dans les périmètres irrigués de la Vallée du Fleuve Sénégal, thèse de master of science, Cnearc, Montpellier, 113 p. + annexes.
- Nesme T., 2004.** Utilisation des modèles agromonomiques pour analyser les pratiques des agriculteurs. Application à l'irrigation et à la fertilisation azotée en vergers de pommiers au sein d'une petite région. thèse de docteur de l'Ensam, Montpellier, 174 p.
- Nesme T., Lescourret F., Bellon S., Plénet D., Habib R., 2003.** Relevance of orchard design issued from growers planting chices to study fruit tree cropping systems, *Agron.*, 23 (7) : 651-660.
- Neve P., Diggle A.J., Smith F.P., Powels S.B., 2003.** Simulating evolution of glyphosate resistance in *Lolium rigidum* – II. Past, present and future glyphosate use in Australian cropping, *Weed Res.*, 43 (6) : 418-427.
- Ney B., Lemaire G., 2001.** Agronomie, génétique et physiologie végétale : quels intérêts partagés ? *C.R. Acad. Fr.*, 87 (4) : 175-186.
- Ney B., Doré T., Sagan M., 1997.** N dilution curves: Grain legumes, in Lemaire G. (ed) *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Heidelberg, Springer Verlag, 113-118.
- N'Guyen C., Todorovic C., Robin C., Christophe A., Guckert A., 1999.** Continuous monitoring of rhizosphere respiration after labelling of plant shoots with $^{14}\text{CO}_2$. *Plant and Soil*, 212 : 191-201.
- Nicholson F.A., Chambers B.J., Mills A.R., Stachan P.J., 1997.** Effects of repeated straw addition on crop fertiliser requirements, soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses, *Soil Use Manage.*, 13 : 136-142.
- Nicolardot B., Recous S., 2001.** Décomposition des résidus : une affaire d'histoire culturelle et de travail du sol, in Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés, *Perspect. Agric.*, 272 : 49-53.
- Noiriel G., 1996.** *Sur la « crise » de l'histoire*, Paris, Belin, 476 p.
- Nolot J.-M., Debaeke P., 2003.** Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture, *Cah. Agric.*, 12, (6) : 387-400.
- Nordlund D.A., 1996.** Biological control, integrated pest management and conceptual models. *Biocontrol News Inf.*, 17 (2) : 35-44.
- Norris R.F., Caswell-Chen E.P., Kogan M., 2003.** *Concepts in Integrated Pest Management*, Speen, CPL Press, 586 p.

O

- OCDE, 2001.** *Multifonctionnalité. Élaboration d'un cadre analytique*, Paris, OCDE, 177 p.
- Odum E.P., 1953.** *Fundamentals of Ecology*, Philadelphia, W. B. Saunders, 384 p.
- Oerke E.C., Dehne H.W., Schonbeack F., Weber A., 1994.** *Crop production and Crop Protection*, Amsterdam, Elsevier Science, 808 p.
- Oikeh S.O., Carsky R.J., Kling J.G., Chude V.O., Horst W.J., 2003.** Differential N uptake by maize cultivars and soil nitrate dynamics under N fertilisation in West Africa, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 100 : 181-191.
- OILB-Srop, 1973.** Statuts, *Bull. Srop*, (1), 25 p.
- O'Leary G.J., 1996.** The effects of conservation tillage on potential groundwater recharge, *Agric. Water Manage.*, 31 : 65-73.
- Olesen J.E., Petersen B.M., Berntsen J., Hansen S., Jamieson P.D., Thomsen A.G., 2002.**

Comparison of methods for simulating effects of nitrogen on green area index and dry matter growth in winter wheat, *Field Crops Res.* 74 (2/3) : 131-149.

Olofsdotter M., Valverde B.E., Madsen K.H., 2000. Herbicide-resistant rice (*Oryza sativa* L.): global implications for weedy rice and weed management, *Ann. Appl. Biol.*, 137 : 279-295.

OMS, 2001. *Rapport sur la santé dans le monde 1998. La vie au XXI^e siècle : une perspective pour tous*, Genève, OMS, 265 p.

Orlikowski L.B., Skrzypczak Cz., Niekraszewicz A., 1997. Effectiveness of chitosan in the control of fusarium wilt of carnation, in *Annales de l'ANPP, cinquième conférence sur les maladies des plantes*, Tours, 1015-1020.

Osty P.-L., 1978. L'exploitation agricole vue comme un système : diffusion de l'innovation et contribution au développement, *Bull. Tech. Inf.*, 326 : 43-49.

Osty P.-L., Lardon S., de Sainte-Marie C., 1998. Comment analyser les transformations de l'activité productrice des agriculteurs ? proposition à partir des systèmes techniques de production, in Brossier J., Dent B. (eds), *Gestion des exploitations et des ressources rurales, Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 31 : 397-413.

Oweis T., Hachum A., 2004. Water Harvesting and Supplemental Irrigation for Improved Water Productivity of Dry Farming Systems in West Asia and North Africa, in Fischer T *et al.*, *New directions for a diverse planet, Proceedings for the 4th International Crop Science Congress*, September 26th-October 1st 2004, Brisbane, [en ligne] <http://www.cropscience.org.au/icsc2004/> (consulté le 06/03/06).

Oyarzun P., Gerlagh M., Hoogland A.E., 1993. Relation between cropping frequency of peas and other legumes and foot and root rot in peas, *Neth. J. Plant Pathol.*, 99 (1) : 35-44.

Ozier-Lafontaine H., Bruckler L., Lafolie F., Tournebise R., Mollier A., 1998. Modélisation de la compétition pour l'eau dans une association culturale : influence de la distribution des racines, des propriétés physiques du sol et de la répartition de la demande climatique, in Maillard P., Bonhomme R. (eds.), *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, Paris, Inra, 459-480.

P

Pagès L., 2000. How to include organ interactions in models of the root system architecture?

The concept of endogenous environment, *Ann. For. Sci.*, 57, 535-541.

Paillotin G., 1998. *European agricultural research in the 21st century*, Paris/Berlin, Inra Éditions/Springer, 333 p.

Paillotin G. 2000. *Rapport sur l'agriculture raisonnée*, mission auprès du ministère de l'Agriculture.

Palti J., 1981. *Cultural Practices and Infectious Crop Diseases*, Berlin, Springer-Verlag, 243 p.

Palz W., 1998. Non-food production: technological and scientific bottlenecks, in Paillotin G. (ed.), *European agricultural research in the 21st century*, Paris/Berlin, Inra Éditions/Springer, 146-164.

Panneton B., Vincent C., Fleurat-Lessard F., 2000a. Place de la lutte physique en phytoprotection, in Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F. (eds.), *La lutte physique en phytoprotection*, Versailles, Inra Éditions, 347 p.

Panneton B., Vincent C., Fleurat-Lessard F., 2000b. Bilan et perspectives pour la lutte physique en phytoprotection, in Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F. (eds.), *La lutte physique en phytoprotection*, Versailles, Inra Éditions, 347 p.

Paoletti M.G., 1999. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators, *Agric. Ecosyst. Environ.* 74 : 137-155.

Papy F., 1994. Working knowledge concerning technical systems and decision support, in Dent J.B., Mc Gregor M.J. (eds), *Rural and Farming Systems Analysis, European Perspectives*, Edinburgh, Cabi, 222-235.

Papy F., 1998. Savoir pratique sur les systèmes techniques et aide à la décision, in Biarnès A., (ed.), *La conduite du champ cultivé : points de vue d'agronomes*, Paris, Orstom, 30-54.

Papy F., 1999. Agriculture et organisation du territoire par les exploitations agricoles : enjeux, concepts, questions de recherche, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 : 233-244.

Papy F., 2000. Farm models and decision support: a summary review, in Colin J.P., Crawford E.W. (eds.), *Research on agricultural systems: accomplishment, perspectives and issues*, Huntington, Nova Science Pub., 89-107.

Papy F., 2001a. Pour une théorie du ménage des champs : l'agronomie des territoires, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 87 (4) : 139-149.

Papy F., 2001b. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation agricole, in Malézieux É., Trébuil G., Jaeger M. (Eds), *Modélisation des agro-éco-systèmes et aide à la*

décision, Montpellier/Versailles, Cirad-Inra Éditions, « Repères », 51-74.

Papy F., Boiffin J., 1989. The use of farming systems for the control of runoff and erosion (Example from a given country with thalweg erosion), in Schwertmann U., Rickson R.J., Auerswald K. (Eds), *Soil erosion protection measures in Europe*, "Soil Technology" series n° 1, Cremlingen-Destedt, Catena-Verlag, 29-38.

Papy F., Souchère V., 1993. Control of overland runoff and thalweg erosion. A land management approach, in *Systems studies in agriculture and rural development. A selection of papers published by researchers in the agrarian Systems and development Department of INRA (1990-1994)*, Paris, Inra Éditions, 87-98.

Papy F., Torre A., 2002. Quelles organisations territoriales pour concilier production agricole et gestion des ressources naturelles ? *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 33 : 151-169.

Papy F., Martin P., Bruno J.-F., 1996. Comment réduire les risques d'érosion par les pratiques agricoles ? S'adapter aux systèmes érosifs et au contexte économique, in *Sécheresse, pollution, inondation, érosion ; que fait la recherche ?* Forum 29 septembre-1^{er} octobre 1996, Poitiers, 11 p.

Papy F., Attonaty J.-M., Laporte C., Soler L.-G., 1988. Work organization simulation as a basis for farm management advice, *Agric. Syst.*, 27 : 295-314.

Pareja M.R., Staniforth D.W., Pareja G.P., 1985. Distribution of weed seed among soil structural units, *Weed Sci.*, 33 : 182-189.

Parlevliet J.E., 2002. Durability of resistance against fungal, bacterial and viral pathogens: present situation, *Euphytica*, 124 : 147-156.

Passioura J.B., 1994. The yield of crops in relation to drought, in Boote K.J. et al. (eds.), *Physiology and Determination of Crop Yield*, Madison, Asa-CSSA-SSSA, 343-359.

Passioura J.B., 1996. Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering?, *Agron. J.*, 88 (5) : 690-694.

Passioura J.B., 2004. Increasing crop productivity when water is scarce – From breeding to field management? In Fischer T. et al., New directions for a diverse planet, *Proceedings for the 4th International Crop Science Congress*, September 26th-October 1st 2004, Brisbane, [en ligne] disponible sur <http://www.crops-science.org.au/iscs2004/> (consulté le 06/03/06).

Patrick J.W., 1993. Sink strength. Whole plant considerations, in Farrar J.F. (ed.), *Sink strength.*

What is new and how to measure it? Plant Cell. Env., 16 : 1019-1020.

Pekrun C., Lutman P.J.W., 1998. The influence of post-harvest cultivation on the persistence of volunteer oilseed rape, *Aspects Appl. Biol.*, 51 : 113-118.

Pellegrino A., Wery J., Lebon E., 2002. A water balance model can be used to evaluate the water stress experienced by a crop in farmer's fields: a case study in vineyards in south-eastern France, In *Proceedings of the VIIIth ESA Congress*, 15-18 juillet 2002, Cordoba, Séville, Consejería de Agricultura y Pesca, 845 p.

Pellegrino A., Lebon E., Voltz M., Wery J., 2004. Relationships between plant and soilwater status in vine (*Vitis vinifera* L.), *Plant and Soil*, 266 (1-2) : 129-142.

Pellerin F., Pellerin S., Vilette C., Boiffin J., 2000. Évolution du raisonnement de la fertilisation phosphatée des grandes cultures. Étude par simulation de l'évolution des préconisations de fumure sur un échantillon test représentatif des sols et successions de culture du Nord du Bassin Parisien, *Étud. Gestion Sols* 7 : 53-71.

Pellerin S., Mollier A., 2002. Lessons learned from modelling plant uptake of P and other nutrients, *International Workshop on Rhizosphere, preferential flow and bio-availability: a holistic view of soil-to-plant transfer*, September 21-26th 2002, Ascona, Zurich, ETH, 94-95.

Pellerin S., Dorioz J.-M., Morel C., 2005. Bilan environnemental du phosphore, in Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L., *Sols et environnement*, Paris, Dunod, 628-649.

Penman H.L., 1963. *Vegetation and hydrology*, tech. comm. n° 53, Farnham Royal, Commonwealth Agricultural Bureau, 124 p.

Penning de Vries F., 2001. Food security? We are losing ground fast! In Nösberger J., Geiger H.H., Struik P.C. (eds.), *Crop Sci.*, New-York, Cabi, 1-14.

Perrot C., 1990. Typologie d'exploitations construite par agrégation autour de pôles définis à dire d'experts. Proposition méthodologique et premiers résultats obtenus en Haute-Marne, *Prod. Anim.*, Paris, Inra, 3 (1) : 51-66.

Peterson T.A., Shapiro C.A., Flowerday A.D., 1990. Rainfall and previous crop effects on crop yields, *Am. J. Altern. Agric.*, 5 (1) : 33-37.

Pic E., Teyssendier de la Serve B., Tardieu F., Turc O., 2002. Leaf senescence induced by mild water deficit follows the same sequence of macroscopic, biochemical and molecular events as monocarpic senescence in pea (*Pisum sativum* L.), *Plant Physiol.*, 28 : 236-246.

- Pierce F.J., Nowak P., 1999. Aspects of Precision Agriculture, *Adv. Agron.*, 67 : 1-85.
- Pinchemel P., Pinchemel G., 1988. *La face de la terre. Éléments de géographie*, Paris, Colin, 519 p.
- Pinnschmidt H.O., Batchelor W.D., Teng P.S., 1995. Simulation of multiple species pest damage in rice using Ceres-rice, *Agric. Syst.*, 48 : 193-222.
- Plenchette C., 1991. Utilisation des micorhizes en agriculture et horticulture, in Strullu D.G. (ed.), *Les micorhizes des arbres et des plantes cultivées*, Paris, Lavoisier, 131-196.
- Plénet D., Cruz P., 1997. N dilution curves: Grain legumes, in Lemaire G. (ed.) *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Heidelberg, Springer Verlag, 113-118.
- Plénet D., Lemaire G., 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of a critical N concentration, *Plant and Soil*, 216 : 65-82.
- Plénet D., Mollier A., Pellerin S., 2000a. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency – II. Radiation use efficiency, biomass accumulation and yield components, *Plant and Soil*, 224 : 259-272.
- Plénet D., Etchebest S., Mollier A., Pellerin S., 2000b. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency – I. Leaf growth, *Plant and Soil*, 223 : 117-130.
- Plentinger M.C., Penning de Vries F., 1997. Rotation models for ecological farming, *Camase/PE workshop report, Quantitative Approaches Systems, Analysis n° 10*, Wageningen, PE/AB-DLO, 138 p.
- PNUE, 2002. *GEO-3, troisième rapport sur l'avenir de l'environnement mondial*, Stevenage, Earthprint.
- PNUE, 2004. *Global Environment Outlook (GEO) year 2003*, Stevenage, Earthprint, 80 p.
- Poitrat E., 1994. Bilans énergétiques de l'éthanol et de l'ETBE : références européennes et perspectives d'amélioration en France, in Mauguin P., Bonfils C., Nacfaire H. (eds). *Biocarburants en Europe. Développement, applications, perspectives 1994-2004*, 68-75.
- Polya G., 1965. *Comment poser et résoudre un problème ?* Paris, Dunod, réimpression éditions J. Gabay, Sceaux, 93 p.
- Porter P.M., Lauer J.G., Lueschen W.E., Harlan Ford J., Hoverstad T.R., Oplinger E.S., Crookston R.K., 1997. Environment affects the corn and soybean rotation effect, *Agron. J.*, 89 : 441-448.
- Poussin J.-C., Wopereis M.S.C., Debouzie D., Maeght J.L., 2003. Determinants of irrigated rice yield in the Senegal River valley, *Eur. J. Agron.*, 19 : 341-356.
- Powles S.B., Preston C., Bryan I.B., Jutsum A.R., 1997. Herbicide resistance: impact and management, *Adv. agron.*, 58 : 57-93.
- Powlson D.S., Hart P.B.S., Johnston A.E., Poulton P.R., Jenkinson D.S., 1992. Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of ¹⁵N-labelled fertiliser applied to winter wheat in spring, *J. Agric. Sci., Cambridge*, 118 : 83-100.
- Pradhan K.C., Sahu S.K., 2004. Direct and residual effects of fly ash integrated with FYM and chemical fertilizers on growth, yield and nutrient (major) uptake by crop son rice-groundnut cropping system in acid soils of Orissa, *Environ. Ecol.*, 2 : 332-336.
- Prévost P., 2005. *Agronomes et territoires, deuxième édition des Entretiens du Pradel*, Paris, l'Harmattan, 502 p.
- Prochiantz A., 1990. *Claude Bernard. La révolution physiologique*, Paris, PUF, 128 p.
- Prudencio C.Y., 1993. Ring management of soils and crops in the West African semi-arid tropics: the case of the mossi farming system in Burkina Faso, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 47 : 237-264.
- Prusinkiewicz P., 2004. Modeling plant growth and development, *Curr. Opin. Plant Biol.*, 7 (1) : 79-83.
- Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1990. *The algorithmic beauty of plants*, New-York, Springer Verlag, 228 p., [en ligne] disponible sur <http://algorithmicbotany.org/papers/> (consulté le 07/03/06).
- Prusinkiewicz P., Karwowski R., Mech R., Hanan J., 1999. L-studio/cpfg: A software system for modeling plants, in Nagl M., Schürr A., Münch M. (eds), *Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance*, proceedings, London, Springer Verlag, 1779 : 457-464.
- Puricelli E., Orioli G., Sabbatini M.R., 2002. Demography of *Anoda cristata* in wide- and narrow-row soyabean, *Weed Res.*, 42 : 456-463.

Q

Quilot B., 2003. *Vers une démarche de sélection variétale assistée par des modèles écophysiologiques et génétiques*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 125 p.

Quilot B., Génard M., Kervella J., Lescourret F., 2002. Ecophysiological analysis of genotype variation in peach fruit growth, *J. Exp. Bot.*, 53 : 1613-1625.

Quilot B., Génard M., Kervella J., 2004a. Leaf light-saturated photosynthesis for wild and cultivated peach genotypes and their hybrids: a simple mathematical modelling analysis, *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 79 (4) : 546-553.

Quilot B., Génard M., Kervella J., Lescourret F., 2004b. Analysis of genotypic variations in flesh total sugar content via a modelling approach applied to peach, *Theor. Appl. Genet.*, 109 (2) : 440-449.

R

Rabbinge R., Bastiaans L., 1989. *Combination models, crop growth and pests and diseases*, in Rabbinge R., Ward S.A., Van Laar H.H. (eds.), *Simulation Monographs 32* Wageningen, Pudoc, 217-239.

Rabeharisoa L., 2004. *Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes de terres de Madagascar*, thèse de doctorat d'État ès sciences naturelles de l'université d'Antananarivo, 202 p.

Radcliffe D.E., Tollner E.W., Hergrove W.L., Clark R.L., Golabi M.H., 1998. Effect of tillage practices on infiltration and soil strength of a Typic Hapludult soil after ten years, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52 : 798-804.

Rajin Anwar M., Mc Kenzie B.A., Hill G.D., 2003a. Phenology and growth response to irrigation and sowing date of Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a cool-temperate subhumid climate, *J. Agric. Sci.*, 141 : 273-284.

Rajin Anwar M., Mc Kenzie B.A., Hill G.D., 2003b. Water-use efficiency and the effect of water deficits on crop growth and yield of Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a cool-temperate subhumid climate, *J. Agric. Sci.*, 141 : 285-301.

Rapidel B., Defêche C., Traoré B., Lançon J., Wery J., 2004. *In field development of a conceptual model for crop functioning and management: a case study on Cotton in Southern Mali*, VIIIth European Society for Agronomy Congress, July 11-15th 2004, Copenhagen, 953-954.

Rapilly F., 1991. *L'épidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes*, Paris, Inra, 240-261.

Rasse D.P., Rumpel C., Dignac M.F., 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation, *Plant and Soil*, 269: 341-356.

Reau R., Meynard J.-M., Robert D., Gitton C., 1996. Des essais factoriels aux essais « conduite de culture », in *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*, Acta, ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation (Derf), Paris, 52-62.

Recous S., Darwis D., Robin D., Machet J.-M., 1993. Décomposition des résidus de récolte. Interactions avec la dynamique de l'azote, in Decroux J., Ignazi J.-C. (eds.), *Matières organiques et agriculture*, Blois, Comifer-Gemas, 3-15.

Recous S., Loiseau P., Machet J.-M., Mary B., 1997. Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies, in Lemaire G., Nicolardot B. (eds.), *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Paris, Inra Éditions, 105-120.

Reddy K.R., Hodges H.F., 2000. *Climate change and global crop productivity*, Wallingford, Cabi Publishing, 488 p.

Reddy K.R., Hodges H.F., Mc Kinion J.M., 1997. Crop modelling and applications: a cotton example, *Adv. Agron.*, 59 : 225-290.

de Reffye P., Edelin C., Françon J., Jaeger M., Puech C., 1988. Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development, *Actes de SIGGRAPH '88*, août 1988, Atlanta, Computer Graphics, 22 (4) : 151-158.

Reganold J.P., Glover J.D., Andrews P.K., Hinman H.R., 2001. Sustainability of three apple production systems, *Nat.*, 6831 : 926-930.

Rémy J.-C., Marin-Lafèche A., 1974a. L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique, *Ann. Agron.* 25 : 607-632.

Rémy J.-C., Hébert J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 63 (11) : 700-710.

Renault P., Stengel P., 1994. Modelling oxygen diffusion in aggregated soils – I. Anareobiosis inside the aggregates, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58 : 1017-1023.

Rengel Z., 1993. Mechanistic simulation models of nutrient uptake: A review, *Plant and Soil*, 152 : 161-173.

Reus J., Leendertse P., Bockstaller C., Fomsgaard I., Gutsche V., Lewis K., Nilsson C., Pussemier L., Trevisan M., Van der Werf H., Alfaro F., Blümel S., Isart J., Mc Grath D., Seppälä T., 2002. Comparison and evaluation

of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 90 : 177-187.

Reymond M., Muller B., Leonardi A., Charcosset A., Tardieu F., 2003. Combining quantitative trait loci Analysis and an ecophysiological model to analyze the genetic variability of the responses of maize leaf growth to temperature and water deficit, *Plant Physiol.*, 131 : 664-675.

Reynard R. 1995. Statistiques et découpages territoriaux, *Rev. Géog. Lyon*, 70 (2) : 125-128.

Rickerl D.C., Francis C., 2004. *Agroecosystems analysis*, in Rickerl D., Francis C. (eds.), *Agro-nomy Monograph Number 43*, Madison, ASA, CSSA, SSSA Pub., 207 p.

Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Neveu A., Papy F. (éd.), 1997. *L'eau dans l'espace rural*, Paris, Inra Éditions, 411 p.

Ritchie J.T., 1981. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system, *Plant and Soil*, 58 (1/3) : 81-96.

Robert C., Bancal M.-O., Lannou C., 2002. Wheat leaf rust uredospore production and carbon and nitrogen export in relation to lesion size and density, *Phytopathol.*, 92 : 762-768.

Robert C., 2003. Étude et modélisation du fonctionnement d'un couvert de blé attaqué par le complexe parasitaire *Puccinia tritici*-*Mycosphaerella graminicola*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 135 p.

Robert C., Bancal M.-O., Lannou C., 2004a. Wheat leaf rust uredospore production on adult plants: influence of leaf nitrogen content and *Septoria tritici* blotch, *Phytopathol.*, 92 : 762-768.

Robert M., Capillon A., Raunet M., 2004b. Les techniques culturales sans labour : historique et enjeux, in *Techniques culturales sans labour ; impacts économiques et environnementaux*, colloque du Corpen, 31 mars 2004, Paris, 4-13.

Robert C., Bancal M.-O., Nicolas P., Lannou C., Ney B., 2004c. Analysis and modelling of effects of leaf rust and *Septoria tritici* blotch on wheat growth, *J. Exp. Bot.*, 55 (399) : 1-16.

Robert C., Bancal M.-O., Ney B., Lannou C., 2005. Wheat leaf photosynthesis loss due to leaf rust, with respect to lesion development and leaf nitrogen status, *New Phytol.*, 165 (1) : 227-241.

Robert M., 1996. *Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement*, Paris, éd. Masson, 244 p.

Robin P., Aeschlimann J.-P., Feller C., à paraître. *Histoire et Agronomie : entre ruptures et durée*, « Colloques et Séminaires », Paris, IRD.

Robinson R.A., Sutherland W.J., 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain, *J. Appl. Ecol.*, 39 : 157-176.

Robson M.C., Fowler S.M., Lampkin N.H., Leifert C., Leitch M., Robinson D., Watson C.A., Litterick A.M., 2002. The agronomic and economic potential of break crops for ley/arable rotations in temperate organic agriculture, *Adv. Agron.*, 77 : 369-427.

Roger C., Tivoli B., 1996. Spatio-temporal development of pycnidia and perithecia and dissemination of spores of *Mycosphaerella pinodes* on pea (*Pisum sativum*), *Plant Pathol.*, 45 : 518-528.

Roger-Estrade J., 1991. Effet du travail du sol sur la localisation et l'accessibilité des éléments minéraux ; conséquences sur l'élaboration du rendement du maïs (*Zea mays* L.), *Sci. Sol*, 29 : 159-173.

Roger-Estrade J., Colbach N., Leterme P., Richard G., Caneill J., 2001. Modelling vertical and lateral weed seed movements during mouldboard ploughing with a skim-coulter, *Soil Tillage Res.*, 63 : 35-49.

Roger-Estrade J., Hallaire V., Boizard H., Cluzeau D., Défossez P., Pérès G., Richard G., 2005. Sol, fertilisation et environnement, in Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L. (eds.), *Sol et Environnement*, Paris, Dunod, 540-562.

Röhrig R., Langmaack M., Schrader S., Larink O., 1998. Tillage systems and soil compaction – Their impact on abundance and vertical distribution of Enchytraeidae, *Soil Tillage Res.*, 46 : 117-127.

Ronce D., 1999. Un indicateur agri-environnemental pour les systèmes de production des grandes cultures ? Les micro-arthropodes, Dossier ITCF, 29 p. + annexes.

Room P., Hanan J., Prusinkiewicz P., 1996. Virtual plants: new perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists, *Trends Plant Sci.*, 1 : 33-8.

Rose S.C., Carter A.D., 2003. Agrochemical leaching and water contamination, in Garcia-Torres L., Benites J., Martinez-Vilela A., Holgado-Cabrera A. (eds), *Conservation agriculture: environment, farmers experiences, innovations, socio-economy, policy*, Dordrecht, Kluwer Academic, 417-424.

- Rosegrant M.W., Cline S.A., 2003.** Global food security: challenges and policies, *Sci.*, 302 (5652) : 1917-1919.
- Rosenzweig C., Parry M.L., 1994.** Potential impact of climate change on world food supply, *Nat.*, 367 : 133-137.
- Rossi V., Racca P., 1997.** A simulation model for the development of brown rust epidemics in winter wheat, *Eur. J. Plant Pathol.*, 103 : 453-465.
- Rossing W.A.H., 1993.** *On damage, Uncertainty and Risk in Supervised Control*, Wageningen, Wageningen Agricultural University, 200 p.
- Rossing W.A.H., Jansma E.J., De Ruijter F.J., Schans J., 1997.** Operationalizing sustainability: exploring options for environmentally friendly flower bulb production systems, *Eur. J. Plant Pathol.* 103 : 217-234.
- Rothacker D., Frauenstein K., Oertel K., 1988.** Studies on the occurrence of ergot, *Claviceps purpurea*, in winter rye multiplication crops, *Nachrichtenbl. Pflanzenschutz DDR*, 42 (11) : 220-222.
- Roudal C., Rouillé B., Cazal M., 2004.** Carpo-capse des pommes et des poires : où en est-on en agriculture biologique ? *Phytoma - La défense des végétaux*, 568 : 22-25.
- Rouzet J., Foulon C., Jacquin D., 2003.** Avertissements agricoles®, systèmes d'aide à la décision et modélisation, *Phytoma - La défense des végétaux*, 566 : 28-32.
- The Royal Society, 2003.** *Phil. Trans. Biol. Sci. Lond. B.*, 358 (1439) : 1773-1913.
- Rusanov V., Parshin W., 1997.** Promotion of fusarium resistance of cucumber grown without employment of pesticide technique, in *Annales de l'ANPP, cinquième conférence sur les maladies des plantes*, ANPP, Tours, 819-820.
- Russel E.W., 1973.** *Soils conditions and plant growth*, London, Longman, 10th ed., 849 p.
- Ruthenberg, H., 1971.** *Farming systems in the tropics*, Oxford, Oxford Science Publications (3^e édition 1980), 424 p.
- Rypstra A.L., 1983.** The importance of food and space in limiting webspider density, a test using field enclosure, *Oecol.*, 59 : 312.
- Ryszkowski L., Szajdak L., Karg J., 1998.** Effects of continuous cropping of rye on soil biota and biochemistry, *Crit. Rev. Plant Sci.*, 17 (2) : 225-244.
- Sadras V.O., Milroy S.P., 1996.** Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review, *Field Crop Res.*, 47 : 253-266.
- Sagory P., Brun C., Charetteur C., Cozzoli A., Duverneix C., Di Giovanni R., Riffard D., 2000.** *Qualité du travail, qualité de l'emploi en agriculture*, Artigues-près-Bordeaux, conseil régional d'Aquitaine-conseil général de la Gironde-Arct Aquitaine, 128 p.
- Saint-Jean S., Chelle M., Huber L., 2004.** Modelling water transfer by rain-splash in a 3D canopy using Monte Carlo integration, *Agric. For. Meteorol.*, 121 : 183-196.
- Sala O.E., Chapin III F.S., Armesto J.A., Berlow E., Blommield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke L.F., Jackson R.B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D.M., Mooney H.A., Oesterheld M., Leroy Poff N., Sykes M.T., Walker B.H., Walker M., Wall D.H., 2000.** Global biodiversity scenarios for the year 2100, *Sci.*, 287 : 1770-1774.
- Salmon S.C., Mathews O.R., Leukel R.W., 1953.** A half-century of wheat improvement in the United States, *Adv. Agron.*, Academic Press, 5 : 1-151.
- Samson M.F., Bonicel J., Abécassis J., Morel M.-H., 2004.** Grain protein content and composition of durum wheat: changes during grain filling and relation with crop quality, in *Modelling quality traits and their genetic variability for wheat*, international workshop, 18-21 juillet 2004, Clermont-Ferrand, Inra.
- Samu F., Sunderland K.D., Szinetáret C., 1999.** Scale-dependant dispersal and distribution patterns of spiders in agricultural systems: a review, *J. Arachnol.*, 27 : 325-332.
- Sarniguet A., Lucas P., 1992a.** Evaluation of populations of fluorescent pseudomonas related to decline of take-all patch on turfgrass, *Plant and soil*, 145 : 11-15.
- Sarniguet A., Lucas P., 1992b.** Relationships between take-all, soil conductiveness to the disease, populations of fluorescent pseudomonas and nitrogen fertilizers, *Plant and soil*, 145 : 17-27.
- Sautter G., 1993.** À propos de quelques terroirs d'Afrique occidentale. Essai comparatif, in *Parcours d'un géographe. Des paysages aux ethnies. De la brousse à la ville. De l'Afrique au monde*, Paris, Éditions Arguments, 2 : 445-498.
- Sauvée L., Valceschini E., 2004.** Agro-alimentaire : la qualité au cœur des relations entre agriculteurs, industriels et distributeurs, *Démeter : Econ. Strat. Agric.*, 181-226.
- Savary S., Zadoks J.C., 1992.** Analysis of crop loss in the multiple pathosystem groundnut

S

- rust-late leaf spot. 2. study of the interactions between diseases and crop intensification in factorial experiments, *Crop Prot.*, 11 : 110-120.
- Savary S., Madden L.V., Zadocks J.C., Klein-Gebbinck H.W., 1995a.** Use of categorical information and correspondance analysis in plant disease epidemiology, *Adv. Bot. Res.*, 21 : 213-238.
- Savary S., Elazegui F.A., Moody K., Litsinger J.A., Teng P.S., 1994.** Characterisation of rice cropping practices and multiple pest systems in the Philippines, *Agric. Syst.* 46 : 385-408.
- Savary S., Willocquet L., Elazegui F.A., Castilla N.P., Teng P.S., 2000.** Rice pest constraints in tropical Asia: quantification of yield losses due to rice pests in a range of production situations, *Plant Dis.* 84 : 357-369.
- Savary S., Castilla N.P., Elazegui F.A., McLaren C.G., Ynalvez M.A., Teng P.S., 1995b.** Direct and Indirect Effects of Nitrogen Supply and Disease Source Structure on Rice Sheath Blight Spread, *Phytopathol.*, 85 : 959-965.
- Savini I., Landais E., Thimon P., Deffontaines J.-P., 1993.** L'organisation de l'espace pastoral. Des concepts et des représentations construits à dire d'expert dans une perspective de modélisation, *Étud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 27 : 137-160.
- SCEES, 1997.** Orientations technico-économiques : classification révisée des exploitations agricoles françaises, *Agreste Cah.*, (22-23), 180 p.
- SCEES, 2001.** Recensement Agricole 2000, *Agreste Cah.*, (3-4).
- SCEES, 2002.** L'utilisation du territoire en 2001. Nouvelle série de 1992 à 2001, *Agreste Chiffres Données Agric.*, 141 : 83 p.
- SCEES, 2004.** Enquête sur les pratiques culturelles en 2001. *Agreste Chiffres Données Agric.*, 159 : 253 p.
- Schmucki R., De Blois S., Bouchard A., Domon G., 2002.** Spatial and temporal dynamics of hedgerows in three agricultural landscapes of southern Quebec, Canada, *Environ. Manage.*, 30 : 651-664.
- Schneider A., 2003.** Characterisation of soil potassium supply as derived from sorption-desorption experiments, *Plant and Soil*, 251 : 331-341.
- Schneider A., Castillon P., Pellerin S., 2003.** Relationships between soil potassium supply characteristics based on soil solution concentration and buffer power and field responses of winter wheat and maize, *Plant and Soil*, 254 : 269-278.
- Schneider O., Roger-Estrade J., Aubertot J.-N., Doré T., 2006.** Effects of seeders and tillage equipment on the vertical distribution of oilseed rape stubble, *Soil Tillage Res.*, 85 (1-2), 115-122.
- Schoeny A., Jeuffroy M.-H., Lucas P., 2001.** Influence of take-all epidemics on yield formation of winter wheat, *Phytopathol.*, 91 : 694-701.
- Schroth G., Sinclair F.L., 2003.** *Trees, crops and soil fertility*, Wallingford, Cabi Publishing, 448 p.
- Schuler J., Kächele H., 2003.** Modelling on-farm costs of soil conservation policies with Modam, *Environ. Sci. Policy*, 6 : 51-55.
- Schvartz C., Fabre B., Julien J.-L., 2005.** Sol, fertilisation et environnement, in Girard M.-C., Walter C., Rémy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L. (eds.), *Sol et Environnement*, Paris, Dunod, 671-693.
- Sebillotte M., 1966.** Rotations et assolements. *Rev. Agric. Fr.*, 52 : 168-184.
- Sebillotte M., 1969.** Le « tour de plaine ». Facteur de rentabilité dans l'entreprise agricole, étude FNCETA, Paris, Entreprise Agricole, 15-23.
- Sebillotte M., 1974a.** Agronomie et agriculture, analyse des tâches de l'agronome. *Cah. Orstom*, série biologie, 24 : 3-25.
- Sebillotte M., 1974b.** *Résultats d'une interrogation écrite de contrôle de connaissances et réflexions sur les attitudes intellectuelles qu'elle révèle*, document multigraphié, chaire d'agronomie, section de spécialisation agriculture, Ina P-G.
- Sebillotte M., 1975.** Comment aborder et suivre l'introduction dans un système de culture de nouveaux procédés de travail du sol ? *Bull. Tech. Inf.*, 302-303 : 555-567.
- Sebillotte M., 1977.** *Agronomie et agriculture*, document pour l'enseignement de 1^{re} année à la chaire d'agronomie, INA P-G, 61 p.
- Sebillotte M., 1978a.** Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 11 : 906-913.
- Sebillotte M., 1978b.** La collecte des références et les progrès de la connaissance agronomique, in Boiffin J., Huet P. (eds.), *Exigences nouvelles en agriculture : les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?* Paris, Ina P-G, 466-496.
- Sebillotte M., 1979.** *Agronomie*, cours multigraphié de la chaire d'agronomie de l'Ina P-G, 7 tomes.

- Sebillotte M., 1980a.** An analysis of yield elaboration of wheat, in *Wheat Technical Monograph*, Basle, Ciba Geigy Ltd., 25-32.
- Sebillotte M., 1980b.** Rôles de la prairie dans la succession culturale, *Fourrages*, 83 : 79-124.
- Sebillotte M., 1982.** Pratiques des agriculteurs et évolution de la fertilité du milieu. Eléments pour un jugement des systèmes de culture. *Bull. Tech. Inf.*, 370-372, 425-436.
- Sebillotte M., 1990a.** Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes, in Combe L., Picard D. (eds.), *Les systèmes de culture*, Paris, Inra, 165-196.
- Sebillotte M., 1990b.** Les processus de décision des agriculteurs : conséquences pour les démarches d'aide à la décision, in Brossier J., Vissac B., Lemoigne J.-L. (eds.), *Modélisation systémique et systèmes agraires*, Paris, Inra, 103-117.
- Sebillotte M., 1990c.** À quoi sert la recherche en agronomie ? *Rech.*, supp. 227 : 6-9.
- Sebillotte M., 1993a.** Épistémologie, agronomie, et formation. Regards sur l'œuvre de Stéphane Hénin in *Mélanges offerts à Stéphane Hénin. Sol-Agronomie-Environnement*, jubilé scientifique, 25 Septembre 1990, Paris, Éditions Orstom, 149-179.
- Sebillotte M., 1993b.** L'agronome face à la notion de fertilité, *Nat. Sci. Soc.*, 1 (2) : 128-141.
- Sebillotte J., 1997.** La qualité de l'eau : quels problèmes et quelles connaissances pour agir ? In Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Neveu A., Papy F. (eds.), *L'eau dans l'espace rural – production végétale et qualité de l'eau*, Versailles, Inra Éditions, 339-353.
- Sebillotte M. 2000.** Des recherches pour le développement local. Partenariat et transdisciplinarité, *Rev. Écon. Rég. Urbaine*, 3 : 535-556.
- Sebillotte M., 2001a.** Les fondements épistémologiques de l'évaluation des recherches tournées vers l'action, *Nat. Sci. Soc.*, 3 : 8-15.
- Sebillotte M., 2001b.** Apprendre, chercher, innover. *Les parcours d'un agronome*, Inra, Série « Bilan et Prospective ».
- Sebillotte M. (ed.) 2002.** Les trois métiers des agronomes, *Agronomes et territoires – deuxième édition des Entretiens du Pradel*, Paris, L'Harmattan, 13.
- Sebillotte M., 2002a.** Logiques de l'agir et construction des objets de connaissance. L'invention de nouveaux dispositifs de recherche, In Gaudin T., Hatchuel A. (éd.), *Les nouvelles raisons du savoir. Vers une prospective de la connaissance*, Colloque de Cerisy, La Tour d'Aigues, Éditions de l'Aube, 93-115.
- Sebillotte M., 2002b.** Agronomes et territoires. Les trois métiers des agronomes, in *Agronomes et Territoires*, deuxième édition des Entretiens du Pradel (dir. P. Prévost), Paris, L'Harmattan, 479-497, et [en ligne] <http://www.academie-agriculture.fr/files/publications/colloques/2003/200209communication28.pdf> (consulté le 07/03/2006).
- Sebillotte M., 2003.** Développement durable et autres développements : solutions miracles ou comportements durables ? In Gonod P., *Matières à (re)penser le développement durable et d'autres développements*, préface, série « Bilan et Prospectives », Paris, Inra.
- Sebillotte M., 2005.** Prospective et développement régional. Du local au global, du projet à la gouvernance, Symposium PSDR, 9-11 mars 2005, Lyon, [en ligne] disponible sur <http://www.inra.fr/rhone-alpes/symposium/index.htm> (consulté le 07/03/06).
- Sebillotte M., Servettaz L., 1989.** Localisation et conduite de la betterave sucrière. L'analyse des décisions techniques, In Sebillotte M. (dir), *Fertilité et systèmes de production*, Paris, Inra, 308-344.
- Sebillotte M., Meynard J.-M., 1990.** Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées, *colloque Nitrates-Agriculture-Eau*, Paris, Ina P-G, Inra, 289-312.
- Sebillotte M., Soler L.-G. 1990.** Les processus de décision des agriculteurs – I. Acquis et questions vives, in Brossier J. et al., (eds.), *Modélisation systémique et systèmes agraires*, Paris, Inra, 88-102.
- Sebillotte M., Godard D., 1993.** La fertilité : lecture agronomique de pratiques sociales, in Segre L. (dir.), *Agricoltura ambiente e sviluppo economico nella storia europea*, Milan, Franco Angeli, 165-226.
- Semenzato R. 1995.** A Simulation Study of Sugar-Cane Harvesting, *Agric. Syst.*, 47 : 427-437.
- Sen A., 2000.** *Un nouveau modèle économique. Développement, justice, liberté*, Paris, Éditions Odile Jacob, Traduction de *Development as freedom*, New York, A. Knopf Inc., 368 p.
- Sène M., 1999.** *Analyse de l'influence des systèmes de culture sur la variabilité des rendements du sorgho (Sorghum bicolor [L.] Moench) et sur son effet allélopathique dans le Sine-Saloum.* thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 186 p.
- Sène M., Doré T., Pellissier F., 2000.** Effect of phenolic acids in soil under and between rows of a prior sorghum (*sorghum bicolor*) crop on

germination, emergence, and seedling growth of peanut (*arachidis hypogea*), *J. Chem. Ecol.*, 26 : 625-637.

de Serres O., 1635. *Le théâtre d'agriculture et mesnage des champs*, Rouen, La Maison Rustique, 1 400 p.

Sester M., Dürr C., Darmency H., Colbach N., 2006. Evolution of weed beet (*Beta vulgaris* L.) seed bank: quantification of seed survival, dormancy, germination and pre-emergence growth, *Eur. J. Agron.*, 24 (1) : 19-25.

Sharifi M.A., van Keulen H., 1994. A decision support system for land use planning at farm enterprise level, *Agric. Syst.*, 45 : 239-257.

Sharpley A.N., Smith S.J., Williams J.R., Jones D.R., Coleman D.A., 1991. Water quality impacts associated with sorghum culture in the southern plains, *J. Environ. Qual.*, 20 : 239-244.

Shobrys D., White D.C., 2000. Planning, scheduling and control systems: why can they not work together, *Comput. Electron. Eng.*, 24 : 163-173.

Shorter R., Lawn R.J., Hammer G.L., 1991. Improving genotypic adaptation in crops – a role for breeders, physiologists and modellers, *Exp. Agric.*, 27 : 155-175.

Shrestha A., 2003. *Cropping systems: trends and advances*, Binghampton, Food products press, 720 p.

Siband P., Loyce C., Witt C., Dingkuhn M., 2001. Évaluer le statut azoté du riz irrigué, in Malézieux É., Trébuil G., Jaeger M. (eds), *Modélisation des agrosystèmes et aide à la décision*, Montpellier/Versailles, Cirad-Inra, 95-106.

Siband P., Wey J., Oliver R., Letourmy P., Manichon H., 1999. Analysis of the yield of two groups of tropical maize cultivars. Varietal characteristics, yield potentials, optimum densities, *Agron.* 19 : 1-17.

Sigault F., 1977. Quelques notions de base en matière de travail du sol dans les anciennes agricultures européennes, *Jatba*, Paris, 24 (2-3) : 139-169.

Simon H.A., 1991. *Sciences des systèmes, Sciences de l'artificiel*, Paris, Dunod, traduction française de *The Sciences of the artificial*, 1969-1981, Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 229 p.

Sims J.T., Moser L.E., Moore K.J., 2004. Foreword, in Rickerl D., Francis C. (eds), *Agroecosystems analysis*, *Agron.*, 43, Madison, ASA, CSSA, SSSA Pub., VII.

Sinclair T.R., de Wit C.T., 1976. Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield, *Agron. J.*, 68 : 319-324.

Sinclair T.R., Ludlow M.M., 1986. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes, *Aus. J. Plant Physiol.*, 13 : 329-341.

Sinclair T.R., Horie T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency : a review, *Crop Sci.*, 29 : 90-98.

Sinclair T.R., Shiraiwa T., Hammer G.L., 1992. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation, *Crop Sci.*, 32 : 1281-1284.

Sisworo W.H., Mitrosuhardjo M.M., Rasjid H., Muers R.J.K., 1990. The relative roles of N fixation, crop residues and soil in supplying N in multiple cropping systems in a humid tropical upland cropping system, *Plant and soil*, 121 : 73-87.

Skirvin D.J., 2004. Virtual plant models of predatory mite movement in complex plant canopies, *Ecol. Modelling*, 171 : 301-13.

Smith C.M., 2004. Plant resistance against pest: issues and strategies, in Koul O., Dhaliwal G.S., Cuperus G.W. (eds), *Integrated Pest Management: potential, constraints and challenges*, Wallingford, Cabi Publishing, 147-167.

Smith H., Firbank L.G., Macdonald D.W., 1999. Uncropped edges of arable fields managed for biodiversity do not increase weed occurrence in adjacent crops, *Biol. Conserv.*, 89 : 107-111.

Smith O.H., Petersen G.W., Needelman B.A., 2000a. Environmental indicators of agrosystems, *Adv. Agron.*, 69 : 75-97.

Smith K.A., Brewer A.J., Dauven A., Wilson D.W., 2000b. A survey of the production and use of the animal manures in England and Wales – I. Pig manure, *Soil Use Manage.*, 16 : 124-132.

Smith P., Smith J.U., Powlson D.S., Mc Gill W.B., Arah J.R.M., Chertov O.G., Coleman K., Franco U., Frolking S., Jenkinson D.S., Jensen L.S., Kelly R.H., Klein-Gunnewiek H., Komarov A.S., Li C., Molina J.A.E., Mueller T., Parton W.J., Thornley J.H.M., Whitmore A.P., 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments, *Geoderma*, 81 : 153-225.

Smith S.J., Schepers J.S., Porter L.K., 1990a. Assessing and managing agricultural nitrogen losses to the environment, *Adv. Soil Sci.*, 14 : 1-43.

- de Snoo G.R., 1994.** Cost-benefits of unsprayed crop edges in winter wheat, sugar beet and potatoes, in Boatman N. (ed.), *Field margins: integrating agriculture and conservation*, Farnham, British Crop Protection Council, 58 : 197-202.
- de Snoo G.R., 1999.** Unsprayed field margins: effects on environment, biodiversity and agricultural practice, *Landscape Urban Plann.*, 46 : 151-160.
- Soane B.D., Van Ouwerkerk C., 1994.** Soil Compaction Problems in World Agriculture, in Soane B.D., Van Ouwerkerk C. (eds.), *Soil Compaction and Crop Production*, *Dev. Agric. Eng.*, Amsterdam, Elsevier, 11 : 1-21.
- Sojka R.E., Upchurch D.R., Borlaug N.E., 2003.** Quality Soil Management or Soil Quality Management: Performance versus Semantics, *Adv. Agron.*, San Diego, Academic Press, 79 : 1-67.
- Soler L.-G., 1990.** Décisions financières et incertitude dans les exploitations de grande culture, *Rev. Fr. Gestion*, 79 : 47-56.
- Somers B.M., 1997.** Learning for sustainable agriculture, in Van Ittersum M.K., Van de Geijn (eds.), *Perspectives for agronomy. Adopting ecological principles and managing resource use*, *Dev. Crop Sci.*, Amsterdam, Elsevier, 25 : 353-359.
- Soto-Pinto L., Perfecto I., Castillo-Hernandez J., Caballero-Nieto J., 2000.** Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico, *Agric. Ecosyst. Environ.* 80 : 61-69.
- Souchère V., Cerdan O., Ludwig B., Le Bissonnais Y., Couturier A., Papy F., 2003.** Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments, *Catena*, 50 (2-4) : 489-505.
- Soula B., Karimjee H., Goebel R., Caplong P., Tabone E., 2003.** Lutte biologique contre le foreur de canne à sucre à l'aide de trichogrammes. Résultats d'essais au champ à la Réunion, *Phytoma – La défense des végétaux*, 562 : 32-35.
- Soulard C.T., 2005.** Les agriculteurs et la pollution des eaux. Proposition d'une géographie des pratiques, *Nat. Sci. Soc.*, 13, 154-164.
- Soussana J.-F., Lafarge M., 1998.** Competition for resources between neighbouring species and patch scale vegetation dynamics in temperate grasslands, *Ann. Zootech.*, 47 : 371-382.
- Soussana J.-F., Oliveira-Machado A., 2000.** Modelling the dynamics of grasses and legumes in cut mixtures, in Hodgson J., Lemaire G., de Moraes A. (eds.), *Grassland ecophysiology and grazing ecology*, Wallingford, Cabi Publications, 169-190.
- Soussana J.-F., Teyssonneyre F., Thiéry J., 2000.** Un modèle simulant les compétitions pour la lumière et pour l'azote entre espèces herbacées à croissance clonale, in Bonhomme R., Maillard P. (eds.), *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, Versailles, Inra Éditions, 325-350.
- Spérandio J.-C., 1980.** *La psychologie en ergonomie*, Paris, Puf, 140 p.
- Squire G.R., Brooks D.R., Bohan D.A., Champion G.T., Daniels R.E., Haugton A.J., Hawes C., Heard M.S., Hill M.O., May M.J., Osborne J.L., Perry J.N., Roy D.B., Woiwod I.P., Firbank L.G., 2003.** On the rationale and interpretation of the Farm Scale Evaluations of genetic modified herbicide-tolerant crops. Philosophical transactions of the royal society, *Biolog. Sci.*, 358 : 1779-1799.
- Stapleton J.J., 2000.** Soil solarization in various agricultural production systems, *Crop prot.*, 1 : 837-841.
- Stengel P., 1990.** Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes, in Boiffin J., Marin-Lafliche A. (eds.), *La structure des sols et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur*, Versailles, Inra Éditions, « Les colloques », 53, 15-36.
- Stengel P., Bourlet M., 1987.** Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage : effet de l'humectation, in Monnier G., Goss M.J. (eds.), *Soil Compaction and Regeneration*, Rotterdam, Boston, Balkema, 95-110.
- Stengers I. (dir.), 1987.** *D'une science à l'autre. Des concepts nomades*, Paris, Seuil, 392 p.
- Stern V.M., Smith R.F., Van den Bosch R., Hagen K.S., 1959.** The integrated control concept, *Hilgardia*, 29 : 81-101.
- Steyaert P., Papy F., 1999.** Contribution de l'agronomie à l'évaluation des opérations locales agri-environnementales, *Écon. rurale*, 249 : 49-54.
- Stiglitz J.E., 2003.** *La grande désillusion*, Paris, Fayard, « Le livre de poche », 407 p.
- Stinner B.R., House G.J., 1990.** Arthropods and other invertebrates in conservation-tillage agriculture, *Annu. Rev. Entomol.*, 35 : 299-318.
- Stoate C., Boatman N.D., Borralho R.J., Rio Carvalho C., de Snoo G.R., Eden P., 2001.** Ecological impacts of arable intensification in Europe, *J. Environ. Manage.*, 63 : 337-365.
- Stockdale E.A., Lampkin N.H., Hovi M., Keatinge R., Lennartsson E.K.M., Macdonald D.W., Padel S., Tattersall F.H., Wolfe M.S., Watson C.A., 2001.** Agronomic and environmental

implications of organic farming systems, *Adv. Agron.*, 70 : 261-327.

Stockle C.O., Kiniry J.R., 1990. Variability in crop radiation use efficiency associated to vapor pressure deficit, *Field Crop Res.*, 25 : 171-181.

Stomph T.J., Fresco L.O., Van Keulen H., 1994. Land use system evaluation: concepts and methodology, *Agric. Syst.*, 44, 243-255.

Stoop W.A., Uphoff N., Kassam A., 2002. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers, *Agric. Syst.*, 71 : 249-274.

Strong W.M., 1995. Nitrogen fertilisation of upland crops, in Bacon P.E. (ed.), *Nitrogen fertilisation in the Environment*, New York, Marcel Dekker Inc., 129-170.

Styczen M., Storm B., 1993. Modelling of N-movements on catchment scale a tool for analysis and decision making. 1. Model description, *Fert. Res.*, 36 (1) : 1-6.

Swanton C.J., Shrestha A., Roy R.C., Knezevic S.Z., 1999. Effect of tillage systems, N, and cover crop on the composition of weed flora, *Weed Sci.*, 47 : 454-461.

T

Tabourel-Tayot F., Gastal F., 1998. Meca-NiCAL, a supply-demand model of carbon and nitrogen partitioning applied to defoliated grass – I. Model description and analysis, *Eur. J. Agron.*, 9 : 223-241.

Tardieu F., 2003. Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit, *Trends Plant Sci.*, 8 : 9-14.

Tardieu F., Simonneau T., 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: Modelling isohydric and anisohydric behaviours, *J. Exp. Bot.*, 49 : 419-432.

Teasdale J.R., Mohler C.L., 2000. The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches, *Weed Sci.*, 48 : 385-392.

Tebrugge F., During R., 1999. A Reducing Tillage Intensity – A Review of Results from a Long-Term Study in Germany, *Soil Tillage Res.*, 53 (1) : 15-28.

Ten Berge H.F.M., Stein A., 1997. Mode-based decision support in agriculture, *Quantitative*

approaches in systems analysis, Wageningen, AB-DLO/TPE-WAU, 15 : 129 p.

Ten Berge H.F.M., Van Ittersum M.K., Ros-sing W.A.H., Van de Ven G.W.J., Schans J., Van de Sanden P.A.C.M., 2000. Farming options for the Netherlands explored by multi-objective modelling, *Eur. J. Agron.*, 13 : 263-277.

Terpstra R., 1986. Behavior of weed seed in soil clods, *Weed Sci.*, 34 : 889-895.

Thaler P., Pagès L., 1998. Modelling the influence of assimilate availability on root growth and architecture, *Plant and Soil*, 201 : 307-320.

Theaker A.J., Boatman N.D., Froudwilliams R.J., 1995. The Effect of Nitrogen-Fertilizer on the Growth of Bromus-Sterilis in-Field Boundary Vegetation, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 53 : 185-192.

Thenail C., Baudry J., 2001. Modélisation des systèmes techniques agricoles contribuant aux dynamiques des structures paysagères : de la parcelle à l'exploitation agricole et au paysage, In Hubert-Moy L. (ed.), *Étude des changements d'utilisation et d'occupation du sol : échelles et modèles*, université de géographie de Rennes-2, 16-24.

Thenail C., Baudry J., 2004. Variation of farm spatial land use pattern according to the structure of the hedgerow network (bocage) landscape: a study case in northeast Brittany, France, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 101 : 53-72.

Thenail C., Le Cœur D., Baudry J., 2003. L'analyse des relations entre les systèmes agricoles et écologiques dans les zones humides : complémentarité entre approches fonctionnelles et spatiales, in Barr V., Weng P. (eds.), *Programme National de Recherche sur les Zones Humides (PNRZH)*, colloque de restitution, Medd, Paris, coéd. Agences de l'eau-BRGM, 73-78.

Théodore de Saussure N., 1804. *Recherches chimiques sur la végétation*, Paris, Nyon, 327 p.

Thévenet G., Joubert H. (eds), 2001. *Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée*, Paris, Comifer, 392 p.

Thévenet G., Mary B., Wylleman R., 2002. Stockage du carbone et techniques de travail du sol : bilan de 30 années d'expérimentation en grande culture, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 88 : 5.

Thinon P., 2005. Modélisation de données d'enquêtes sur l'organisation et les usages du territoire agricole de l'exploitation, in *Agricultures et Territoires*, Paris, Hermès, 207-221.

Thinon P., Deffontaines J.-P., 1999. Partage de l'espace rural pour la gestion de problèmes

environnementaux et paysagers dans le Vexin français, *Cah. Étud. Rech. Fr. Agric.*, 8 : 373-387.

Thinon P., Landais E., Pierret P., Perrot C., 1998. Modélisation des relations entre l'activité agricole et le territoire : Essai de prédiction de l'utilisation des parcelles agricoles dans douze communes de la Haute-Marne, in Le Berre M., Petithory M., Odouze A.-M., Maillardet J. (eds.), *3^e Rencontres de Théo Quant*, Besançon, Presses Universitaires Franc-Comtoises (PUFC), 115-126.

Thom R., 1997. *Prédire n'est pas expliquer*, Paris, Eshel, 250 p.

Thomas D., 2002. Editorial of the special volume on small-scale mixed farming systems, *Agric. Syst.* 71 : 1-4.

Thorne P.J., Tanner J.C., 2002. Livestock and nutrient cycling in crop animal systems in Asia, *Agric. Syst.* 71 : 111-126.

Thornton P.K., Dent J.B., Caldwell R.M., 1990a. Applications and issues in the modelling of intercropping systems in the tropics, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 31 : 133-146.

Thornton P.K., Fawcett R.H., Dent J.B., Perkins T.J., 1990b. Spatial weed distribution and economic thresholds for weed control, *Crop Prot.*, 9 : 337-342.

Tiedemann A.V., 1996. Single and combined effects of nitrogen fertilization and ozone on fungal leaf diseases on wheat, *J. Plant Dis. Prot.*, 103 (4) : 409-419.

Tiercelin J.-R., 1998. *Traité d'irrigation*, Paris, Tec et Doc, 1011 p.

Tijssens L.M.M., Vollebregt H.M. (eds.), 2003. Proceedings of international conference on Quality in chains, *Acta Horticulturae*, 604 : 821 p.

Tilman D., 1980. Resources: a graphical-mechanistic approach to competition and predation. *Am. Nat.*, 116 : 362-393.

Tilman D., Wedin D., 1993. Competition among grasses along a nitrogen gradient: initial conditions and mechanisms of competition, *Ecol. Monogr.*, 63 : 199-229.

Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nat.*, 418 (6898) : 671-677.

Tissut M., Séverin F., 1984. *Plantes, herbicides et désherbage*, Paris, Acta, 251 p.

Tixier P., Malézieux É., Dorel M., Wery J., 2004. SIMBA: a comprehensive model for agro-ecological assessment and prototyping of

banana based cropping systems. An application to the banana cropping systems in French West Indies, in Fischer T. et al., *New directions for a diverse planet*, Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, September 26th-October 1st 2004, Brisbane, [en ligne] disponible sur <http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/> (consulté le 07/03/06).

Thustos P., Willison T.W., Baker J.C., Murphy D.V., Pavlikva D., Goulding K.W.T., Powlson D.S., 1998. Short-term effects of nitrogen on methane oxidation in soils, *Biol. Fert. Soils*, 28 : 64-70.

Tomita M., Hashimoto K., Takahashi K., Shimizu T.S., Matsuzaki Y., Miyoshi F., Saito K., Tanida S., Yugi K., Venter J.C., Hutchison C.A., 1999. E-CELL: software environment for whole-cell simulation, *Bioinf.*, 15 : 72-84.

Tordjman S., Navarrete M., Papy F., 2005. Les formes de coordination technique entre une structure de première mise en marché et ses fournisseurs : le cas de la salade en Roussillon, *Cah. Agric.*, 14 (5) : 479-484.

Touraine B., Gojon A., 1997. Intégration de l'absorption du nitrate dans la plante, in Morot-Gaudry (ed.), *Assimilation de l'azote chez les plantes*, Versailles, Inra Éditions, 109-129.

Trinsoutrot I., Recous S., Bentz B., Linères M., Chêneby D., Nicolardot B., 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64 : 918-926.

Trocmé S., Boniface R., 1972. Synergie des réserves du sol et des engrais récemment appliqués, *Bull. Assoc. Fr. Étud. Sol*, 4-5 : 161-173.

Tsuiji G.Y., Hoogenboom G., Thornton P.K., 1998. *Understanding options for agricultural production*, Dordrecht, Kluwer, 399 p.

Tull J., 1731. *Essay on the Principles of Tillage and Vegetation*, London, The New Horse Houghing Husbandry.

Turkelboom F., Trébuil G., 1998. A multiscale approach for on-farm erosion research: application to northern Thailand Highlands, in Penning de Vries F.W.T., Agus F., Kerr J. (eds.), *Soil erosion at multiple scales*, Wallingford, Cabi, 51-71.

Turner N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status, *Plant and Soil*, 58 (1/3) : 339-366.

Turner F.T., Jund M.F., 1991. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semidwarf rice, *Agron. J.*, 83 : 926-928.

V

Valantin-Morison M., 2004. Crop management of winter oil seed rape (WOSR) in organic systems in France, in Jacobsen S.E., Jensen C.R., Porter J.R. (eds), *VIII ESA Congress*, Copenhagen, Royal Veterinary and Agricultural University, 689-690.

Valentin C., Bresson L.-M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils, *Geoderma*, 55 : 225-245.

Valenzuela H., DeFranck J., 1995. Agroecology of tropical underground crops for small-scale agriculture, *Crit. Rev. Plant Sci.*, 14 (3) : 213-238.

Van der Werf H., Zimmer C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system, *Chemos.* 36 (10) : 2225-2249.

Van Eeuwijk F.A., Denis J.B., Kang M.S., 1996. Incorporating additional information on genotypes and environments in models for two-way genotype by environment tables, in Kang M.S., Gauch H.G. (eds.), *Genotype-by-Environment interaction*, Boca Raton, CRC-Press, 15-49.

Van Ittersum M.K., Van de Geijn S.C., 1997. Perspectives for agronomy. Adopting ecological principles and managing resource use, *Dev. Crop Sci.*, Amsterdam, Elsevier, 25 : 366 p.

Van Ittersum M.K., Rabbinge R., Van Latessteijn H.C., 1998. Exploratory land use studies and their role in strategic policy making, *Agric. Syst.*, 58 (3) : 309-330.

Van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., Van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L., Goudriaan J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models, *Eur. J. Agron.*, 18 (3-4) : 201-234.

Van Keer K., 2003. *On-farm diagnosis of transitional upland rice swidden cropping systems in northern Thailand*, thèse de la Katholieke Universiteit Leuven, 220 p.

Van Keulen H., Seligman N.G., 1987. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop, *Simulation Monogr.*, Wageningen, Pudoc, 310 p.

Van Lenteren J.C., 1993. Integrated Pest Management: the inescapable trend, in Zadocks J.C. (ed.), *Modern crop protection: development and*

perspectives, Wageningen, Wageningen Academic Publishers, 217-225.

Van Sanford D.A., Mc Kown C.T., 1986. Variation in nitrogen use efficiency among soft red winter wheat genotypes, *Theor. Appl. Gent.*, 72 : 158-163.

Varlet-Grancher C., Bonhomme R., 1974. Utilisation de l'énergie solaire par une culture de *Vigna sinensis* – III. Évolution du rendement énergétique pendant la phase végétative, *Ann. Agron.*, 25 (6) : 811-819.

Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., Artis P., 1982. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal, *Oecol. Plantarum*, 3 (17) : 3-26.

Vaucelle A., Le Bail M., 2004a. Diversité des engagements contractuels et fonctionnements des exploitations agricoles en Beauce, In Boiron J.-P. (ed.), *Les systèmes de production agricole : performances, évolution, perspectives*, 18 et 19 novembre 2004, Lille, Paris, Sfer, 18 p.

Vaucelle A., Le Bail M., 2004b. A method to assess the effects of production guidelines on cropping systems, in Jacobsen S.E. et al. (ed.), *European agriculture in a global context*, Copenhagen, European Society of Agronomy, 697-698.

Vaudour E. 2003. *Les terroirs viticoles*, Paris, Dunod, 294 p.

Vaughn K.C., 2003. Herbicide resistance work in the United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service, *Pest Manage. Sci.*, 59 : 764-769.

Veldkamp A., Fresco L.O., 1997. Reconstructing land use drivers and their spatial scale dependence for Costa Rica (1973 and 1984), *Agric. Syst.*, 55 : 19-43.

Veldkamp A., Lambin E.F., 2001. Predicting land-use change, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 85 : 1-6.

Verburg P.H., Veldkamp A., 2001. The role of spatially explicit models in land-use change research: a case study for cropping patterns in China, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 85 : 177-190.

Vereijken P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms, *Eur. J. Agron.*, 7 : 235-250.

Viaux P., 1999. *Une troisième voie en grande culture : environnement, qualité, rentabilité*, Paris, coéd. Agridécisions-France Agricole, 211 p.

Viaux P., Parat J., Blal B., 2002. Les endomycorhizes, indicateurs de la qualité des sols ? *Perspect. Agric.*, 277 : 50-54.

Vickerman G.P., 1974. Some effects of grass weed control on the arthropod fauna of cereals, *Proceedings of the 12th weed control conference*, London, BCPC, 3 : 929.

Vilain L. (dir.), 2003. *La méthode IDEA – Indicateur de durabilité d'exploitations agricoles – Guide d'utilisation*, Dijon, Éducagri éditions, 151 p.

Vincent C., Coderre D. (eds.), 1992. *La lutte biologique*, Montréal/Paris, Gaëtan Morin Éditeur-Lavoisier Tec et Doc, 671 p.

Vleeshouwers L.M., 1997. Modelling the effect of temperature, soil penetration resistance, burial depth and seed weight on pre-emergence growth of weeds, *Ann. Bot.*, 79 : 553-563.

Volterra V., 1926. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically, *Nat.*, 118 : 558-560.

Vos J., 1981. *Effects of temperature and nitrogen supply on post-floral growth of wheat; measurements and simulations*, Wageningen, Pudoc, 140 p.

W

Waggoner P.E., Berger R.D., 1987. Defoliation, disease, and growth, *Phytopathol.*, 77 : 393-398.

Wardle D.A. 1995. Impacts of the disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices, in Begon M., Fitter A.H. (eds.), *Adv. Ecol. Res.*, New-York, Academic Press, (26) : 105-185.

Wardle D.A., Giller K.E., Barker G.M., 1999. The regulation and functional significance of soil biodiversity in agroecosystems. In Wood D., Lenne J., (eds.), *Agrobiodiversity*, Wallingford, Cabi, 87-121.

Warren-Wilson, 1967. Ecological data on dry matter production by plants and plants communities, in Bradley E.F., Denmead O.T. (eds.), *The collection and processing of field data*, Sydney, Interscience, 77-123.

Warren-Wilson, 1972. Control of crop processes, in Rees A.R., Cockshull K.E., Hand D.W., Hurd R.G. (eds.), *Crop processes in controlled environments*, London, Academic press, 7-30.

Watson D.J., 1952. The physiological basis of variation in yield, *Adv. Agron.*, 4: 101-145.

Way M.J., Van Emden H.F., 2000. Integrated pest management in practice. Pathways towards successful application, *Crop Prot.*, 19 : 81-103.

Welch S.M., Wilkerson G., Whiting K., Sun N., Vagts T., Buol G., Mavromatis T., 2002. Esti-

mating soybean model genetic coefficients from private-sector variety performance trial data, *Trans. ASAE*, 45 : 1163-1175.

Wendroth O., Jurschik P., Kersebaum K.C., Reuter H., Van Kessel C., Nielsen D.R., 2001. Identifying, understanding, and describing spatial processes in agricultural landscapes – Four case studies, *Soil tillage Res.*, 58 (3-4) : 113-127.

Wery J., Metral R., Lecœur J., 1999. Le développement des cultures nouvelles dans une région : les outils de l'agronomie moderne permettent de concilier recherche et ingénierie agronomique, in *Recherches Pour et Sur le Développement Territorial*, tome 1, Paris, Inra-DADP, 337-342.

Wey J., Oliver R., Manichon H., Siband P., 1998. Analysis of local limitations to maize yield under tropical conditions, *Agron.*, 18 : 545-561.

White J.W., Hoogenboom G., 1996. Simulating effects of genes for physiological traits in a process-oriented crop model, *Agron. J.*, 88 : 416-422.

White J.W., Hoogenboom G., 2003. Gene-based approaches to crop simulation : past experiences and future opportunities, *Agron. J.*, 95 : 52-64.

White J.W., Corbett J.D., Dobermann A., 2002. Insufficient geographic characterization and analysis in the planning, execution and dissemination of agronomic research? *Field Crops Res.*, 76 (1) : 45-54.

Whitfield D.M., 1993. Field irrigation on CO₂ assimilation and radiation use efficiency in wheat, *Field Crop Res.*, 31 : 211-231.

Wibawa G., 1992. *Approche, par enquête et expérimentation, de l'effet de l'état structural du sol sur la nutrition azotée et l'élaboration du rendement de l'orge de brasserie*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 209 p.

Wiebe K., 2003. *Land quality, agricultural productivity, and food security: biophysical processes and economic choices at local, regional, and global levels*, Cheltenham/Northampton, Edgar Elgar Publishing, 480 p.

Wijnands F.G., 1997. Integrated crop protection and environment exposure to pesticides: methods to reduce use and impact of pesticides in arable farming, *Eur. J. Agron.*, 7: 251-260.

Wilhelm W.W., Wortmann C.S., 2004. Tillage and rotation interactions for corn and soybean grain yield as affected by precipitation and air temperature, *Agron. J.*, 96 (2) : 425-432.

Wilhelm W.W., Johnson J.M.F., Hatfield J.L., Voorhees W.B., Linden D.R., 2004. Crop and

soil productivity response to corn residue removal: a literature review, *Agron. J.*, 96 (1) : 1-17.

de Willigen P., 1991. Nitrogen turnover in the soil-crop system; comparison of fourteen simulation models, *Fert. Res.*, 27 : 141-149.

Willocquet L., Savary S., Fernandez L., Elazegui F.A., Teng P.S., 2000. Development and evaluation of a multiple-pest, production specific model to simulate yield losses of rice in tropical Asia, *Ecol. Modelling*, 131 : 133-159.

Willocquet L., Savary S., Fernandez L., Elazegui F.A., Castilla N., Zhu D., Tang Q., Huang S., Lin X., Singh H.M., Srivastava R.K., 2002. Structure and validation of RICEPEST, a production situation-driven, crop growth model simulating rice yield response to multiple pest injuries for tropical Asia, *Ecol. Modelling*, 153 : 247-268.

Wilson B.J., Brain P., 1991. Long-term stability of distribution of *Alopecurus myosuroides* Huds. within cereal fields, *Weed Res.*, 31 : 367-373.

Winner W., Pell E., Roy J., 1991. *Response of Plants to Multiple Stresses*, San Diego, Academic press, 396 p.

Wischmeir W.H., Smith D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*, Agric. Handb., U.S. Dept. Agr., Science and Education Administration, 537 : 58 p.

de Wit C.T., 1960. On competition, *Versl. Landbouwk. Onderz.*, 66 : 1-82.

de Wit C.T., 1978. *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crop surfaces*, Wageningen, Pudoc.

Withers P.J.A., Edwards A.C., Foy R.H., 2001. Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil, *Soil Use Manage.*, 17 (3) : 139-149.

Wuest S.B., 2001. Earthworm, infiltration, and tillage relationships in a dryland pea-wheat rotation, *Appl. Soil Ecol.*, 18 : 187-192.

Wünsch J.A. 2004. *Intégration des contraintes du marché dans la conduite des cultures : effet de la différenciation des produits sur la conduite de la culture de pomme de terre de conservation dans les exploitations agricoles de Picardie*, thèse de doctorat de l'Ina P-G, Paris, Ina P-G, 160 p.

X

Xénophon, ~ 380 av. J.-C. *L'économique*, édition de 1995 traduite par J.-C. Riedinger, Paris, Éditions Payot et Rivages, 144 p.

Y

Yadava V.L., 1986. A rapid non-destructive method to determine chlorophyll in intact leaves, *Hortic. Sci.*, 21 : 1449-1450.

Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, Timsina J., 2005. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics, *Adv. Agron.*, 85 : 269-407.

Yin X., Stam P., Kropff M.J., Schapendonk H.C.M., 2003. Crop modelling, QTL mapping, and their complementary role in plant breeding, *Agron. J.*, 95 : 90-98.

Yin X., Kropff M.J., Aggarwal S., Peng S., Horie T., 1997. Optimal preflowering phenology of irrigated rice for high yield potential in three Asian environments: a simulation study, *Field Crops Res.*, 51 : 19-27.

Yin X., Chasalow S.C., Dourleijn C.J., Stam P., Kropff M.J., 2000. Coupling estimated effects of QTLs for physiological traits to a crop growth model: predicting yield variation among recombinant inbred lines in barley, *Hered.*, 85 : 539-549.

Yoshida S., 1981. *Fundamentals of rice crop science*, Los Baños, Irri, 269 p.

Ythier É., Bernard J.-L., 2003. Flore des bordures, pucerons et auxiliaires en culture betteravière, *Phytoma - La défense des végétaux*, 556 : 12-16.

Yule I.J., Cain P.J., Evans E.J., Venus C., 1996. A spatial inventory approach to farm planning, *Comput. Electron. Agric.*, 14 : 151-161.

Z

Zadoks J.C., 1993. Cultural methods, in Zadoks J.C. (ed.), *Modern crop protection: development and perspectives*, Wageningen, Wageningen Pers, 163-170.

Zhang J., Davies W.J., 1990. Does ABA in the xylem control the rate of leaf growth in soil-dried maize and sunflower plants? *J. Exp. Bot.*, 41 (230) : 1125-1133.

Index

- adventice, 34, 36, 46, 47, 54, 83, 89, 158, 199, 200, 202, 204-206, 208-210, 212-214, 216, 222, 223, 226, 228, 238, 239, 242, 243, 246, 247, 296
- agriculture de précision, 8, 55, 56, 127, 213, 257, 272
- agrosystème, 23, 28, 35, 171, 172, 174, 175, 178, 180, 193, 200, 201, 221, 223, 225-227, 237, 247
- amélioration variétale, 159
- approche participative, 78, 89, 95
- aptitudes culturelles, 172, 200, 224
- architecture, 130-133, 135, 162
- assolement, 67, 257, 259, 267, 274, 280, 282, 301, 310
- auxiliaire, 51, 199-201, 214, 216, 242
- azote
 - de la plante, 119
 - minéral, 49, 118, 121, 147, 149, 153, 158, 179, 181, 183-185, 187, 188, 220, 295, 297
 - organique, 121, 183, 190
- bassin
 - d’approvisionnement, 271, 288, 290, 291, 293-296, 303
 - versant, 10, 94, 172, 243, 254, 270, 272-275, 277, 279, 280, 282, 309
- battance, 45, 219, 231-233, 240, 274
- bioagresseur, 201, 202, 214-216
- biodisponibilité, 191, 193-195, 197, 219, 247
- biomasse du sol, 200, 218-220
- bonnes pratiques agricoles, 26
- certification, 285-287, 307, 309
- changement d’échelle, 106, 110-112, 120, 121, 123, 124, 159
- chargement mécanique, 234
- coefficient de partage entre infiltration et ruissellement, 226
- compactage, 231, 233, 234, 242
- compétition, 46, 79, 103, 123, 124, 129, 138, 146-150, 168, 179, 183, 185, 186, 199, 204, 208-211, 215, 216, 219, 222, 294, 298
- conservation tillage*, 238
- contrainte hydrique, 92, 114, 115, 227-229
- conversion de l’énergie solaire, 107, 110
- coordination entre acteurs, 291
- culture intermédiaire piège à nitrate, 189, 190
- cycle
 - de l’azote, 49, 180, 183, 186, 187, 200
 - du carbone, 181, 223
 - du phosphore, 193, 194
 - du potassium, 193
- déchaumage, 207, 239
- décision technique, 58, 61, 73-75, 289, 302, 307
- décompactage, 45, 239, 241, 243
- démographie, 146, 147, 149, 211, 213
- dénitrification, 49, 185, 186, 189, 223, 233
- diagnostic agronomique, 7, 73, 77, 78, 80-84, 88-90
- dilution de l’azote, 121, 123, 126
- dires d’experts, 88
- dormance, 7, 210

- effet précédent, 52, 53, 65
- efficience
 - d'interception du rayonnement, 81
 - d'utilisation de l'eau, 112
 - de conversion de l'énergie, 107
- éliciteur, 203
- érosion, 5, 9, 10, 12, 38, 44, 45, 51, 75, 85, 92, 93, 153, 179, 190, 208, 231-233, 236, 240, 242, 243, 270, 272, 274, 280, 281
- espace
 - de négociation, 289
 - décisionnel, 289
 - écologique, 254, 255
 - technique, 288
- évaluation des systèmes de culture, 50, 77, 83, 84, 86, 88, 98, 294
- évapotranspiration, 5, 45, 104, 111, 226, 227, 278
- expérimentation, 3, 10, 34, 40, 51, 53, 73, 74, 80, 88, 91-93, 274
- exploitation agricole, 10, 40, 57-59, 61, 64, 68, 69, 71, 72, 74, 75, 251, 256, 257, 259, 262, 263, 280, 283, 309
- facteur de croissance, 48, 157, 211
- faune du sol, 51, 218, 223, 231, 235
- fertilisation
 - azotée, 9, 46-50, 127, 144, 147, 150, 153, 158, 185, 186, 190, 215, 302
 - phosphopotassique, 178, 197, 198, 247
 - raisonnée, 178, 187
- fertilité, 2, 16, 93, 172, 194-198, 242, 252
- fissuration, 231, 236, 237, 242
- fixation symbiotique, 147, 149
- génotype, 47, 107, 159, 162, 163, 205, 212, 227
- germination, 91, 205-207, 209, 210, 231, 239
- gestion de l'exploitation, 72, 256, 298
- gonflement-retrait, 236
- humidité du sol, 46, 131, 186, 234, 235, 243, 274, 296
- humus, 3, 181, 246
- indice
 - de nutrition azotée, 83
 - de récolte, 127
- interactions génotype × environnement, 47, 159
- interculture, 47, 65, 174, 179, 187, 188, 190, 195, 209, 228, 233, 240, 310
- ion orthophosphate, 191, 193
- irrigation, 18, 34, 35, 48, 64-67, 74, 75, 81, 94, 113, 158, 168, 194, 203, 228, 229, 233, 260, 277, 278, 295, 296, 298-300, 309
- labour, 34, 37, 44-47, 69, 70, 179, 188, 189, 206, 207, 210, 215, 220-223, 232, 237-243, 257
- lixiviation du nitrate, 81, 85, 86, 93, 185
- lombricien, 199, 200, 219, 223, 235
- long terme, 13, 16, 44, 51, 54, 114, 147, 148, 177, 181, 189, 190, 195, 203, 208, 211, 212, 247, 273, 289, 290
- lutte
 - biologique, 201, 203, 213, 216
 - chimique, 201-203, 213, 217
 - contre les bioagresseurs, 137
 - mécanique, 202
- macrofaune, 218, 220-222, 235
- marge de manœuvre, 255, 256, 262, 268, 279-283, 300, 301, 304, 309
- matière organique du sol, 34, 177, 179, 180
- mauvaise herbe, 38, 45, 47, 54, 55, 79, 137, 138, 142, 153, 156, 158, 199, 202, 204-213, 217, 240, 241
- mésafaune, 218, 221, 222
- microfaune, 183, 218, 220, 221, 235
- microflore du sol, 183, 186, 216, 218
- minéralisation, 36, 49, 90, 119, 149, 174, 179-193, 223
- modèle
 - conceptuel, 61, 66, 78, 80, 81, 89-91
 - spatial, 274
 - de culture, 46, 59, 91-94, 101, 103, 113, 132, 136, 138, 140-142, 144, 152-155, 157-159, 167, 168, 211, 270, 271, 303
- mosaïque paysagère, 252, 264, 265, 267
- mulch, 188, 208, 241, 243
- mycorhize, 192, 219, 221
- non-labour, 155, 179, 188, 189, 221-223, 241
- nutrition, 25, 83, 108-110, 119-121, 124, 127, 144, 147, 152, 153, 168, 175, 178, 179, 184, 189, 217, 293

- organisation
 - de l'azote, 181, 188
 - du travail, 44, 45, 66, 67, 69, 72-75, 208, 212, 257, 271, 274, 280, 283, 295, 300
 - spatiale, 255, 259, 264-267, 282
 - territoriale, 264-267
- outil d'aide à la décision, 59, 94, 95, 98, 212, 217, 303
- paysage, 6, 14, 54, 251, 256-259, 261-266
- phosphore, 51, 118, 148, 150, 172, 175, 178, 179, 190-198, 200, 220, 246
- pollution, 49, 153, 178, 187, 200, 201, 226, 231, 252, 253, 269, 270, 273, 280, 283
- porosité, 36, 37, 174, 189, 200, 218, 219, 222, 230, 231, 234-236, 240, 242
- potassium, 118, 148, 150, 175, 178, 179, 190, 191, 193, 194, 195, 197
- potentiel hydrique, 83, 111, 117, 160, 225, 229
- profil cultural, 5, 171, 237, 246
- protection intégrée, 93, 137, 175, 203, 213, 219, 245, 248, 291, 311
- prototypage, 78, 91, 92
- puits, 107, 109, 128-130, 145, 155, 227
- QTL, 162, 164-165
- qualification, 84, 286, 295, 303, 305, 310
- qualité des produits, 26, 38, 39, 84, 87, 130, 151, 154, 159, 168, 177, 249, 252, 295, 303, 304, 309, 310
- rayonnement, 81, 83, 104, 107, 111, 124, 126, 131, 133, 135, 139, 140, 145, 155, 161, 167, 173, 190, 227, 228
- réglementation, 279, 300, 303-305
- règle de décision, 38, 40, 48, 60-62, 66, 68, 69, 73-75, 89, 91, 94, 283, 286, 289
- repousse, 204, 213, 228, 239
- réserve, 121, 128, 129, 206, 246, 277
 - utile, 117, 225-227, 229, 297
- résistance mécanique, 234
- rotation, 9, 51, 52, 190, 210, 216-218, 243, 267
- ruissellement, 136, 172, 178, 179, 226, 229, 231, 232, 236, 240, 243, 272-274, 276, 277, 279, 281-283, 306, 310
- satisfaction des besoins en azote, 114, 127
- semis direct, 45, 70, 91, 189, 241, 242
- simplification du travail du sol, 44-46, 93, 242
- source, 11, 13, 15, 37, 45, 59, 74, 101, 104, 128, 129, 172, 183, 184, 219, 274, 312
- sous-solage, 239
- spatial, 54, 254, 262, 263, 268, 273, 274, 297
- stabilité structurale, 177, 230, 232, 233, 235, 240
- stock semencier, 210
- structure du sol, 5, 38, 44, 172, 188, 200, 210, 230-232, 235, 242, 243, 245, 246, 296, 312
- succession de cultures, 51, 52, 54, 58, 243, 252
- surface foliaire, 105, 107, 115, 116, 122, 124, 127, 141, 143, 155, 227, 228
- système
 - d'information géographique, 93
 - local d'approvisionnement, 288-294
 - technique, 78, 309
- tassement du sol, 293
- technique
 - culturale sans labour, 44, 45, 47, 238, 241
 - culturale simplifiée, 45, 155, 237, 238
- territoire, 10, 12, 14, 20, 35, 173, 200, 255-257, 259-263, 265-268, 270, 271, 274, 277, 279-283, 286-288, 297-299, 303, 309, 310
- transpiration, 111-113, 115, 118, 160, 226-228
- typologie de systèmes de production, 57, 71
- volatilisation de l'ammonium, 185

Liste des auteurs

Bruno ANDRIEU

Directeur de recherche
UMR Inra-Ina P-G « Environnement
et grandes cultures »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
andrieu@bcgn.grignon.inra.fr

Jean-Noël AUBERTOT

Chargé de recherche
UMR Inra-Ina P-G « Agronomie »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
aubertot@grignon.inra.fr

Christine AUBRY

Ingénieure de recherche
UMR Inra-Ina P-G « Sad-APT »
16 rue Claude-Bernard
F-75231 Paris cedex 05
caubry@inapg.inra.fr

Marie-Odile BANCAL

Maître de conférences
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Environnement
et grandes cultures »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
mobancal@bcgn.grignon.inra.fr

Michel BERTRAND

Ingénieur de recherche
UMR Inra-Ina P-G « Agronomie »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
bertrand@grignon.inra.fr

Jacques CANEILL

Professeur
Enesad
BP 87999, F-21079 Dijon cedex
jacques.caneill@enesad.fr

Nathalie COLBACH

Chargée de recherche
UMR Inra-Enesad-université de Bourgogne
« Biologie et gestion des adventices »
17 rue Sully
BP 86510, F-21065 Dijon cedex
nathalie.colbach@dijon.inra.fr

Frédéric DARBOUX

Chargé de recherche
Inra, unité de science du sol d'Orléans
avenue de la Pomme-de-Pin – Ardon
BP 20619, F-45166 Olivet cedex
Frederic.Darboux@orleans.inra.fr

Pauline DÉFOSSEZ

Chargée de recherche
Inra, unité d'agronomie
de Laon-Reims-Mons
rue Fernand-Christ
F-02007 Laon cedex
Pauline.Defossez@laon.inra.fr

Stéphane DE TOURDONNET

Maître de conférences
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Agronomie »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
tourdonn@inapg.inra.fr

Thierry DORÉ

Professeur
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Agronomie »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
dore@inapg.inra.fr

Irène FÉLIX

Ingénieure régionale
Arvalis-Institut du végétal
domaine du Chaumoy
F-18570 Le Subdray
i.felix@arvalisinstitutduvegetal.fr

Michel GÉNARD

Directeur de recherche
Inra, unité des plantes et systèmes de culture
horticoles
domaine Saint-Paul, Agroparc
F-84914 Avignon cedex 9
Michel.Genard@avignon.inra.fr

Marie-Hélène JEUFFROY

Directrice de recherche
UMR Inra-Ina P-G « Agronomie »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
jeuffroy@grignon.inra.fr

Alexandre JOANNON

Chargé de recherche
Inra, unité « Sad Armorique »
65 rue de Saint-Brieuc
F-35042 Rennes cedex
Alexandre.Joannon@rennes.inra.fr

Alexandra JULLIEN

Maître de conférences
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Environnement
et grandes cultures »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
jullien@bcgn.grignon.inra.fr

Marianne LE BAIL

Professeure
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Sad-APT »
16, rue Claude-Bernard
F-75231 Paris cedex 05
lebail@inapg.fr

Jérémie LECŒUR

Maître de conférences
Agro M.
UMR Agro M.-Inra « Lepse »
2 place Viala
F-34060 Montpellier cedex 01
lecoeur@ensam.inra.fr

Gilles LEMAIRE

Directeur de recherche
Inra, unité d'écophysiologie des plantes
fourragères
F-86600 Lusignan
Gilles.Lemaire@lusignan.inra.fr

Chantal LOYCE

Maître de conférences
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Agronomie »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
loyce@grignon.inra.fr

Philippe MARTIN

Maître de conférences
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Sad-APT »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
pmartin@inapg.inra.fr

Jean-Marc MEYNARD

Directeur de recherche
Département Sad
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
meynard@grignon.inra.fr

Isabelle MICHEL-DOUNIAS

Maître de conférences
Cnearc
1101 avenue Agropolis
BP 5098, F-34033 Montpellier cedex 01
isabelle.michel@cnearc.fr

Catherine MIGNOLET

Ingénieure de recherche
Inra, station de Mirecourt
662 avenue Louis-Buffer
F-88500 Mirecourt
Catherine.Mignolet@mirecourt.inra.fr

Nicolas MUNIER-JOLAIN

Ingénieur de recherche
UMR Inra-Enesad-université de Bourgogne
« Biologie et gestion des adventices »
17 rue Sully
BP 86510, F-21065 Dijon cedex
munierj@dijon.inra.fr

Mireille NAVARRETE

Chargée de recherche
Inra, unité d'écodéveloppement
domaine Saint-Paul, Agroparc
F-84914 Avignon cedex 9
mireille.navarrete@avignon.inra.fr

Bertrand NEY

Professeur
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Environnement
et grandes cultures »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
ney@bcgn.grignon.inra.fr

François PAPY

Directeur de recherche honoraire, chargé
de mission
UMR Inra/Ina P-G « Sad-APT »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
papy@grignon.inra.fr

Sylvain PELLERIN

Directeur de recherche
UMR Inra-Enita B. « Transfert sol-plante
et cycle des éléments minéraux dans
les écosystèmes cultivés »
domaine de la Grande-Ferrade
71 avenue Édouard-Bourlaux
BP 81, F-33883 Villenave d'Ornon cedex
Sylvain.Pellerin@bordeaux.inra.fr

Bénédicte QUILOT

Chargée de recherche
Inra, unité de génétique et amélioration
des fruits et légumes
domaine Saint-Maurice
BP 94, F-84143 Montfavet cedex
benedicte.quilot@avignon.inra.fr

Sylvie RECOUS

Directrice de recherche
Inra, unité d'agronomie
de Laon-Reims-Mons
rue Fernand-Christ
F-02007 Laon cedex
Sylvie.Recous@laon.inra.fr

Guy RICHARD

Directeur de recherche
Inra, unité de science du sol d'Orléans
avenue de la Pomme de Pin – Ardon
BP 20619, F-45166 Olivet Cedex
guy.richard@orleans.inra.fr

Jean ROGER-ESTRADE

Professeur
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Agronomie »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
estrade@grignon.inra.fr

Michel SEBILLOTTE

Professeur émérite de l'Ina P-G
membre de l'Académie d'agriculture
de France
100 boulevard Masséna
F-75013 Paris
michel.sebillotte@wanadoo.fr

Véronique SOUCHÈRE

Ingénieure de recherche
UMR Inra/Ina P-G « Sad-APT »
BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon
souchere@grignon.inra.fr

Jean-François SOUSSANA

Directeur de recherche
Inra, unité d'agronomie
site de Crouël
234 avenue du Brézet
F-63100 Clermont-Ferrand
Jean-Francois.Soussana@clermont.inra.fr

Claudine THENAIL

Chargée de recherche
Inra, unité « Sad Armorique »
65 rue de Saint-Brieuc CS 84215
F-35042 Rennes cedex
Claudine.Thenail@rennes.inra.fr

Aurélien VAUCELLE

Enseignant-chercheur
Ina P-G, département Ager
UMR Inra-Ina P-G « Sad-APT »
16 rue Claude-Bernard
F-75231 Paris cedex 05
vaucelle@inapg.fr

Jacques WERY

Professeur
Agro M.
UMR AgroM.-Cirad-Inra « System »
campus de La Gaillarde
2 place Viala, bât. 27
F-34060 Montpellier cedex 2
very@ensam.inra.fr

L'agronomie *sensu stricto*, qui contribue aux transformations de l'agriculture et des espaces ruraux, a évolué en même temps que les sociétés modifiaient la place accordée à leurs agricultures. Partant de son objet d'étude premier qu'est le champ cultivé — considéré à la fois comme objet physique et comme le lieu du raisonnement des successions culturales et des techniques par un agriculteur —, elle a élargi ses échelles d'approche, modernisé ses outils de travail et renouvelé ses objets d'étude.

S'appuyant sur une abondante bibliographie, cet ouvrage s'attache à montrer cette évolution et à faire un point sur ce qu'est la discipline, en balayant l'ensemble du champ de connaissances qu'elle couvre aujourd'hui.

Dans un premier temps, les concepts d'« itinéraire technique » et de « système de culture » sont étudiés. Est ensuite abordée l'évolution des connaissances agronomiques relatives à deux composantes de l'agrosystème — le fonctionnement du peuplement végétal cultivé puis le devenir des composantes physiques, chimiques et biologiques du milieu — sous l'effet des pratiques agricoles. Une dernière partie enfin est consacrée aux connaissances agronomiques mobilisées pour traiter des systèmes techniques intégrant plusieurs niveaux d'échelle, de la parcelle au territoire rural et aux filières.

L'ouvrage est destiné aux étudiants, aux professionnels et aux chercheurs non spécialistes de l'agronomie, intéressés par une vision panoramique et documentée des transformations de la discipline.

Les coordinateurs de l'ouvrage enseignent l'agronomie à l'Inra P-G, et effectuent des recherches dans la discipline au sein d'unités mixtes de recherche Inra/Ina P-G. **Thierry Doré** et **Jean Roger-Estrade** s'intéressent aux systèmes de culture, **Bertrand Ney** à l'écophysiologie, **Marianne Le Bail** et **Philippe Martin** aux échelles des territoires et des filières. Ils sont tous ingénieurs agronomes de l'Inra P-G et docteurs de cet établissement ou de l'université Paris-VII. Ils se sont entourés, pour la rédaction de cet ouvrage, de plus d'une trentaine d'agronomes enseignants, chercheurs ou ingénieurs du développement.

En couverture : Système céréalier semi-aride (Tunisie).
Cliché T. Doré.

Inclus un cédérom contenant
98 articles scientifiques
consultables avec Acrobat Reader®
version 4.0 et supérieures. Pour plus
d'informations, veuillez vous référer
au fichier Lisez-moi.

éditions
Quæ

Éditions Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra
www.quae.com



Institut national
agronomique
Paris-Grignon

ISBN : 2-7592-0000-0
ISSN : 1777-4624
Réf. : 02000

Prix TTC : 35 €

