

G. RICHARD, P. STENGEL,
G. LEMAIRE, P. CELLIER,
E. VALCESCHINI, COORD.



Une
AGRONOMIE
pour le XXI^e siècle

Guy Richard, Pierre Stengel,
Gilles Lemaire, Pierre Cellier,
Egizio Valceschini, coord.

UNE AGRONOMIE POUR LE XXI^e SIÈCLE

Éditions Quæ

© Éditions Quæ, 2019.
ISBN : 978-2-7592-2937-6
e-ISBN (NUM) : 978-2-7592-2938-3
x-ISBN (ePub) : 978-2-7592-2939-0

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Préface – <i>Philippe Mauguin</i>	7
Introduction – <i>Guy Richard, Pierre Stengel, Gilles Lemaire, Pierre Cellier, Egizio Valceschini</i>	9

PARTIE I

Un département Environnement et Agronomie à l'Inra : une stratégie de recherche 17

Chapitre 1. L'environnement et l'agronomie à l'Inra : essai d'analyse historique d'une mise en convergence 18

L'impossible greffe de la problématique environnementale dans la matrice
productiviste des décennies modernisatrices 19

La discipline agronomique face à la problématique environnementale :
de la traduction à la conversion (1973-1989) 23

La rupture de l'agronomie avec la finalité productiviste (1990-1995) 29

Adapter l'organisation de la recherche agronomique au développement durable
(1996-1999) 34

Conclusion 39

Chapitre 2. Ambitions, programmation stratégique et productions scientifiques 41

Analyse des orientations exprimées dans les quatre schémas stratégiques
du département 42

Évolution du dispositif scientifique et des compétences 48

Évolution de la production scientifique 50

Conclusion 54

Chapitre 3. Un positionnement international original pour l'agronomie 55

Une approche française de l'agronomie 56

L'écophysiologie, une contribution française forte et reconnue 57

Le vertueux couplage de l'agronomie et de l'environnement :
une ambition internationale 58

Chapitre 4. Environnement et agriculture : un terrain pour l'expertise scientifique 60

L'expertise scientifique au service du savoir commun et de la décision collective 60

L'engagement du département dans les expertises collectives de l'Inra 62

Les expertises nourrissent la recherche 65

Les recherches ont des impacts 66

PARTIE II

Les recherches sur les agroécosystèmes : les nouveaux enjeux du XXI^e siècle 69

Chapitre 5. La prise en charge de l'enjeu climatique dans les recherches du département 70

Émissions de gaz à effet de serre et atténuation 71

Impacts du changement climatique 79

Adaptation au changement climatique 86

Conclusion 88

Chapitre 6. Agriculture et qualité de l'air : recherche et appui aux politiques publiques	90
Une pollution d'origine agricole emblématique : les émissions d'ammoniac	91
La complexité de la pollution atmosphérique vue du côté de l'agriculture	98
Perspectives	105
La dissémination des OGM dans les paysages agricoles	107
Chapitre 7. La biodiversité : menaces et ressources	110
Agronomie et biodiversité : l'émergence des grandes orientations	111
Agronomie et fonctions écologiques de la biodiversité : les mains dans le moteur	114
Des fonctions écologiques aux services écosystémiques : les bases de l'avenir	120
Impacts de l'agriculture sur la biodiversité	123
PARTIE III	
Des instruments pour l'étude des agroécosystèmes	125
Chapitre 8. Les infrastructures d'observation et d'expérimentation : vers une dynamique européenne	126
Des travaux en agronomie historiquement basés sur des expérimentations de longue durée	126
L'émergence de nouvelles infrastructures de recherche	127
Les infrastructures d'observation et d'expérimentation du département	
Environnement et Agronomie	129
L'ouverture et la diffusion des données	130
Conclusion	134
La télédétection, proche ou lointaine, pour le suivi des ressources agricoles et environnementales et l'amélioration variétale	135
Chapitre 9. Modélisation du fonctionnement des agroécosystèmes : l'épopée Stics	138
Genèse et positionnement du modèle, au carrefour des trois anciens départements, dans une visée agroenvironnementale	138
La gouvernance du modèle Stics : un modèle collectif innovant	140
Des usages au service de l'amélioration des systèmes de culture	143
Au service de questions globales, par modularisation et couplage	144
Le changement du climat, un cas d'étude emblématique	145
Les défis d'aujourd'hui : vers un modèle pour l'agroécologie ?	147
Chapitre 10. L'évaluation multicritère des systèmes agricoles : une révolution des méthodes	150
Une conception pragmatique de l'évaluation : les travaux pionniers et critiqués de l'Inra de Colmar	151
Une phase de maturation scientifique et de reconnaissance institutionnelle de l'évaluation multicritère	153
Une phase d'extension des méthodes d'évaluation multicritère	156
Conclusion	161
PARTIE IV	
Connaître et évaluer les ressources et les services des agroécosystèmes	163
Chapitre 11. Un renouveau pour l'étude des sols	164
Du sol à l'écosystème, la fusion des départements Science du sol, Bioclimatologie et Agronomie	164

Des menaces aux services : une vision renouvelée de la place des sols dans les écosystèmes	168
Le <i>leadership</i> mondial en science du sol : de la recherche à la politique	172
Conclusion	175
Microbiologie des sols	177
Les contaminations chimiques de l'environnement : les défis de l'écotoxicologie	180
Chapitre 12. Des recherches pour une gestion intégrée de la ressource en eau dans les territoires agricoles	182
Les orientations stratégiques	183
La gestion quantitative de l'eau	188
La gestion qualitative de l'eau dans les contextes de pollution forte des eaux	190
Conclusion	192
Chapitre 13. Bouclage des cycles : des approches renouvelées et plus englobantes des cycles biogéochimiques	194
La gestion de la fertilisation et l'analyse des cycles à l'échelle de la parcelle	196
Vers des approches plus englobantes des cycles des éléments pour conjuguer agronomie et environnement	202
Gestion durable des flux d'éléments dans les agroécosystèmes	208
Conclusion	211
Un renouvellement indispensable des paradigmes qui ont fondé la fertilisation des cultures en agronomie	213
Chapitre 14. La rhizosphère : des interactions racine-sol-micro-organismes aux leviers de l'agroécologie	215
Concept de rhizosphère et enjeux de connaissance	215
La rhizosphère dans le monde aujourd'hui et demain : vers de nouveaux enjeux	220
La rhizosphère au cœur des défis de la transition agroécologique	223
PARTIE V	
Concevoir des systèmes agricoles pour un futur durable	225
Chapitre 15. La conception des idéotypes	226
Liens génotype-phénotype : un tournant pour l'écophysiologie dans les années 1990	226
Qu'est-ce qu'un idéotype et à quoi sert-il ?	227
Des modèles à base de processus pour la recherche d'idéotypes	228
Apparition de méthodes et de démarches adaptées pour la recherche d'idéotypes	230
Le réseau Qualité des produits récoltés, un acteur des recherches sur les idéotypes	230
Conclusion	231
Pistes pour le futur... vers un changement de paradigme ?	231
Quelles recherches sur la qualité des produits ?	233
Chapitre 16. Protection intégrée des cultures : d'une combinaison de techniques à une valorisation de la biodiversité	235
Mise en perspective de la contribution des agronomes du département à la protection intégrée des cultures	235
1998 : la nouvelle donne	237
1999-2003 : la mobilisation	238
2004-2006 : la consolidation	239
1999-2006 : les résultats de la dynamique scientifique	241
À partir de 2007 : des développements encouragés par les politiques publiques	242

À partir de 2007 : les agronomes du département élargissent leur champ d'activités	244
Aujourd'hui et demain : une protection intégrée des cultures encore plus biodiversifiée	246
Chapitre 17. Vers une gestion territoriale du recyclage des matières organiques résiduelles	247
Un développement et une structuration des recherches à l'Inra pour répondre à des enjeux sociétaux	249
Évaluation des filières du traitement jusqu'à la valorisation au champ	252
Quels impacts environnementaux au champ associés à la présence de contaminants dans les produits résiduels organiques ?	257
Intégration des effets et gestion territoriale	258
Conclusions et perspectives	261
Chapitre 18. La conception de systèmes agroécologiques	264
La maturité du concept de système de culture	265
L'élargissement de l'horizon spatial : de la parcelle au paysage et au territoire	267
Les connaissances mobilisées dans la conception : du règne des modèles à l'irruption des savoirs profanes	268
De la conception basée sur un diagnostic agronomique à la mobilisation des méthodes multicritères	270
De la conception par les agronomes à la conception par les agriculteurs	271
Le développement des expérimentations-système	273
L'élargissement du fossé entre la conception et l'analyse des processus	275
Conclusion	277
Étudier la conversion vers l'agriculture biologique : le cas des systèmes viticoles	278
Caractériser la diversité des formes d'agriculture	281
CONCLUSION	
<hr/>	
Environnement et agronomie au <i>xxi</i>^e siècle, et maintenant ?	283
Environnement, changements globaux et changements d'échelles : les défis du climat et de la gestion sobre des ressources	285
Agriculture et biodiversité, changement de paradigme : le temps de l'agroécologie	287
Alimentation et santé, le concept One Health : un monde en transition(s)	290
Et maintenant ?	294
Postface – Philippe Gillet	295
Annexe 1. Unités du département Environnement et Agronomie en 1998 et en 2018	298
Annexe 2. Départements de l'Inra en 2018	300
Liste des sigles	301
Liste des auteurs	303

Préface

L'environnement est aujourd'hui au cœur des priorités stratégiques de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra). Cet ouvrage nous montre que ceci résulte d'orientations construites progressivement et d'actions conduites sur le long terme auxquelles le département Environnement et Agronomie a largement contribué. À partir des intuitions initiales et des nécessités perçues dès les années 1970, un engagement collectif a permis de traduire en programmes de recherche des questions sur la protection et le respect de l'environnement. L'Inra a ainsi réussi un véritable élargissement de ses finalités et de ses compétences scientifiques.

La production agricole et alimentaire, principalement avec des objectifs de productivité, a constitué le point d'entrée privilégié des recherches menées à l'Inra jusqu'aux années 1980. L'importante réforme que mes prédécesseurs ont menée à partir de la fin des années 1990, qui s'est notamment traduite par l'adoption du tripode « agriculture, alimentation, environnement », a conduit à des inflexions majeures sur les plans scientifique et organisationnel.

La création, en 1998, des départements Environnement et Agronomie (EA) et Santé des plantes et environnement (SPE) a ancré la durabilité environnementale des systèmes agricoles et alimentaires à l'Inra comme une finalité pour de nouvelles orientations de recherche et d'innovation, dont se sont emparés depuis l'ensemble des départements. Cette évolution s'est appuyée sur un changement de paradigme scientifique et sur la grande capacité d'adaptation des équipes de recherche et des structures. Au cours de ces vingt dernières années, l'Inra a démontré ses capacités à redéfinir ses fronts de science, à réorienter ses dispositifs et ses compétences scientifiques et, finalement, à produire des connaissances scientifiques dans un nouveau champ de la recherche finalisée. Cette évolution majeure a été possible grâce à la mobilisation de tout l'institut. La direction générale, les directions scientifiques, les départements et les unités ont porté la programmation afin que la nouvelle orientation stratégique entre dans la réalité de l'institut. Les équipes de recherche ont revisité leurs programmes et fait évoluer leurs compétences pour répondre aux nouveaux enjeux.

Le département EA, ses chefs de département successifs et tous ses personnels scientifiques, techniques et administratifs, ont donné corps à cette nouvelle orientation sans cesser d'améliorer la qualité scientifique des travaux. Par la réunion des trois anciens départements d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol, le département EA a mis en synergie un couple « improbable » : une discipline scientifique, l'agronomie, et un champ d'enjeux, l'environnement. À partir de cette association, il a entrepris de renouveler les thématiques de recherche, d'« écologiser » les approches, d'élargir et d'articuler les échelles spatiales, de coupler les facteurs abiotiques et biotiques du fonctionnement des écosystèmes... Si la production de connaissances scientifiques a bien sûr animé ce renouvellement, la volonté de contribuer à la construction d'une agronomie pour le *xxi*^e siècle au service des agriculteurs et des citoyens a eu une importance cruciale.

Les années 2000, et notamment les prospectives Agrimonde et Agrimonde-Terra, ont confirmé que nourrir le monde était un impératif qui ne pouvait pas

être atteint sans prendre en compte, d'une part, la question de la raréfaction et du renouvellement des ressources naturelles et, d'autre part, la protection et la préservation de l'environnement. Le département EA est aujourd'hui un des piliers de la stratégie de l'établissement pour répondre à certains des objectifs exposés dans son document d'orientation Inra 2025, notamment la réduction drastique de l'utilisation des pesticides de synthèse et la neutralité carbone de l'agriculture française. Néanmoins, seule une approche pluridisciplinaire permettra de relever le défi de la transition agroécologique de l'agriculture en conjuguant performances économiques et environnementales. Il sera également essentiel d'assurer le transfert des innovations vers les agriculteurs, en partenariat avec les instituts techniques, l'enseignement agricole et les acteurs du développement.

La célébration des 20 ans du département EA nous fournit l'occasion de nous interroger sur les questions clés que devra se poser la recherche agronomique dans les vingt prochaines années. Il s'agira, dans le cadre d'approches systémiques, de concevoir des systèmes alimentaires sains et durables prenant en compte les interconnexions entre agriculture, environnement et alimentation. Ces systèmes alimentaires devront fournir une nourriture saine et de qualité aux dix milliards d'habitants de la planète attendus pour 2050, tout en luttant contre le réchauffement climatique et en préservant les ressources naturelles et la biodiversité. L'Inra, avec ses partenaires scientifiques nationaux, européens et internationaux, se mobilisera pour répondre à ces enjeux. Le département EA aura un rôle important à jouer pour concevoir et mettre en œuvre de nouvelles approches basées sur l'intégration des connaissances, en travaillant en étroite relation avec les autres départements de l'Inra intervenant dans les domaines de la biologie, des productions végétales et animales, de la nutrition, de la modélisation et du numérique, et des sciences économiques et sociales.

Pour finir, je tiens à souligner combien la création du département EA représente une expérience emblématique de la capacité de l'Inra à assumer des décisions stratégiques de grande ampleur pour prendre en compte l'évolution des connaissances et des enjeux sociétaux. Je souhaite rendre hommage aux chercheurs, aux ingénieurs et aux techniciens qui, dans les laboratoires comme dans les unités expérimentales, ont mis en œuvre avec succès les orientations stratégiques du département au cours des vingt dernières années. Je suis convaincu qu'ils sauront, avec le même enthousiasme et avec la compétence qui les caractérisent, relever les nouveaux défis du département Environnement et Agronomie.

*Philippe Mauguin,
président-directeur général de l'Inra*

Introduction

Guy Richard, Pierre Stengel, Gilles Lemaire, Pierre Cellier, Egizio Valceschini

L'agriculture et l'usage des ressources de la nature : nourrir la planète sans la dégrader

Partout où l'agriculture a été modernisée au cours du xx^e siècle, elle a connu des hausses de productivité, de la terre et du travail, extrêmement fortes. Elles ont été réalisées, pour l'essentiel, grâce à l'industrialisation de la production agricole, au progrès génétique, à la mécanisation, à l'irrigation et à l'utilisation massive d'engrais et de produits phytosanitaires de synthèse. Les rendements des productions végétales, et notamment la production céréalière, ainsi que les superficies cultivées par exploitant ont été démultipliées, entraînant une augmentation sans précédent dans l'histoire de l'humanité de la production alimentaire européenne et mondiale. Ces évolutions ont été accomplies avec une augmentation limitée des surfaces cultivées et elles ont aussi permis, avec la révolution verte, d'en finir avec les famines massives. Pourtant, le xx^e siècle se termine sur un constat critique et un diagnostic alarmant, demandant à l'agriculture et à l'agronomie de revoir, la première ses pratiques et ses méthodes, la seconde ses questions scientifiques et ses finalités.

C'est que la modernisation agricole a aussi eu de nombreux impacts négatifs sur l'environnement, contribuant largement à la dégradation des écosystèmes, observée aujourd'hui au niveau mondial depuis plusieurs décennies. L'ensemble des écosystèmes de la planète est touché de près ou de loin par les activités agricoles : exploitation minière des ressources, pâturage intensif, fragmentation des paysages liée aux infrastructures, ou encore émissions de gaz à effet de serre (GES) accélérant le changement climatique. La fragilisation, la dégradation ou même la destruction des écosystèmes implique, à des degrés plus ou moins importants, les activités agricoles, cultures et élevage. Elles se traduisent par la dégradation des sols, la surconsommation d'eau, les pollutions diffuses, les émissions de GES et enfin l'érosion de la biodiversité.

Les nuisances et les dégradations environnementales, observées depuis le tout début des années 1970 et de mieux en mieux connues, ont atteint au tournant des années 2000 un niveau très alarmant, encore accentué, parfois dramatiquement, par le changement climatique, lui-même mieux connu et admis grâce notamment aux travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Pire, tandis que les dégradations s'accroissent, et contrairement à ce qui s'est passé des années 1960 aux années 1980, on observe maintenant, en tout cas en Europe, un plafonnement des rendements de certaines cultures importantes. Ce phénomène et ses causes méritent d'être bien mieux connus et quantifiés, mais il semble indiquer que le mode d'industrialisation de l'agriculture ait atteint ses limites d'efficacité tout en entretenant la dynamique de dégradation des écosystèmes. Si l'agriculture est en partie responsable des problèmes liés à la dégradation des écosystèmes, elle en subit aujourd'hui en retour les conséquences par la dégradation ou la raréfaction de certaines ressources qui lui sont indispensables.

Pourtant, il reste nécessaire d'assurer la sécurité alimentaire mondiale pour faire face à l'augmentation démographique et au changement des régimes alimentaires

(notamment l'augmentation de la consommation de viande dans les pays émergents), en « jouant » sur les niveaux de production, ou en modifiant les parts respectives des usages alimentaires et non alimentaires (bioénergies, fibres, chimie). Il y a dix ans déjà, la prospective Agrimonde, menée par l'Inra et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), expliquait que l'enjeu à venir résidait dans la poursuite de la production alimentaire et/ou énergétique sur des espaces où devront être préservés les autres services écosystémiques fournis (biodiversité, stockage du carbone, qualité des sols et de l'eau, etc.).

La question ici se pose du rôle qu'entend y tenir l'agriculture française. Mais, quoi qu'il en soit, si l'Inra est historiquement lié à l'agriculture nationale et reste également au service de ses agriculteurs, la recherche agronomique française est depuis maintenant trois décennies au moins engagée dans une économie internationale de la connaissance. Ses finalités sont aussi, et de plus en plus, associées à des enjeux sociétaux, où consommateurs et citoyens sont des acteurs essentiels, et d'envergure planétaire, comme l'a bien montré, par exemple, la contribution de notre institut à la Conférence des parties n° 21 (COP21) en 2015.

Changer le paradigme agronomique : de l'optimisation des ressources à la gestion intégrée des écosystèmes

Progressivement, il a été admis que l'agriculture avait une responsabilité forte vis-à-vis de la gestion durable des écosystèmes. En 2005, l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (*Millennium Ecosystem Assessment*, MEA) a distingué quatre grands types de services rendus par les écosystèmes : des services d'approvisionnement (production de nourriture, de bois), de régulation (pollinisation, séquestration de carbone), culturels (biodiversité patrimoniale, lieux de récréation) et de soutien (cycles de l'azote, du carbone). En tant que gestionnaire d'une grande partie des écosystèmes continentaux, l'agriculture joue un rôle majeur dans la gestion, bonne ou mauvaise, des ressources qui sont interdépendantes au sein des écosystèmes. Une gestion inappropriée des écosystèmes peut fortement altérer leurs fonctionnalités et la fourniture de services écosystémiques, alors qu'à l'inverse certaines formes de gestion peuvent se révéler bénéfiques. Certains services affectent directement les résultats de la production agricole, comme la régulation de ravageurs par des insectes auxiliaires des cultures, d'autres concernent sa durabilité, par exemple la stabilisation de la structure des sols et la limitation de l'érosion des sols qui en résulte.

Cette vision écosystémique de l'agriculture représente un changement considérable dans la manière de considérer les relations entre l'agriculture et l'environnement. En effet, elle implique un changement de paradigme pour passer d'une volonté de minimisation des impacts de l'agriculture à leur prise en compte élargie dans le temps et dans l'espace. Si l'agriculture a toujours un objectif de production, alimentaire et non alimentaire, il s'agit aussi d'aller vers une gestion intégrée des ressources naturelles prenant en compte par anticipation et en pratique un maximum de parties prenantes, agricoles et non agricoles. La mise au point d'outils et de modèles adaptés à la complexité de la gestion des agroécosystèmes en contexte incertain représente un enjeu méthodologique et scientifique essentiel de la recherche agronomique.

Le changement de paradigme de production agricole vers des pratiques plus écologiques tendra à différencier de plus en plus les modes et les types de productions en fonction des particularités écologiques locales. Une importante conséquence de ce changement de paradigme est donc la diversification territoriale, guidée par le contexte rural/urbain, les conditions écologiques, les tissus socio-économiques (les stratégies des acteurs) et une logique sous-jacente de diversification des hiérarchies des services écosystémiques. Sur ce dernier point, l'aspect crucial est la capacité à procéder aux arbitrages (ou *trade-offs*) pertinents entre des services écosystémiques qui peuvent obéir à des objectifs concurrents ou contradictoires selon qu'on se situe à une échelle locale ou à une échelle globale. Cette question des *trade-offs* est extrêmement prégnante car, il faut le souligner, aucune pratique (ou système) n'est gagnante sur tout le spectre des critères d'évaluation des services écosystémiques. Le rôle de la recherche agronomique, en développant l'agronomie « globale », en modélisant et en élaborant différents scénarios, est d'éclairer les choix en quantifiant les termes de ces *trade-offs*, et en instruisant leurs effets.

Mais cette nouvelle orientation, toute nécessaire qu'elle soit, est loin d'être aisée à mettre en œuvre sur le plan scientifique. Elle demande non seulement de connaître bien plus finement les ressources utilisées par l'agriculture, mais surtout de beaucoup mieux considérer les relations complexes qu'elles ont entre elles, et que leur combinaison par l'agriculture peut dégrader au point, parfois, de raréfier, voire de faire disparaître telle ou telle ressource. Ainsi « l'écologisation » de l'agriculture est une voie pour repenser un équilibre entre les ressources. Par exemple, une contribution à l'écologisation consiste à rendre permanente la couverture des sols, et/ou à associer plusieurs cultures aux systèmes racinaires complémentaires. Cela se traduit par une meilleure utilisation des réserves en eau des sols, mais peut avoir pour conséquence de réduire la lame d'eau drainée annuelle, et donc l'alimentation en eau des nappes phréatiques profondes.

La réduction de l'utilisation des intrants (engrais, pesticides, énergie, eau) passe par une internalisation de la production de leurs substituts, *via* les services écosystémiques, au sein de l'agroécosystème. Ce qui nécessite de consacrer une partie de l'énergie lumineuse interceptée à autre chose que la seule production agricole : typiquement, gérer des haies comme des habitats pour des auxiliaires permettant de contrôler naturellement des bioagresseurs, ou insérer des légumineuses dans les rotations pour fournir naturellement de l'azote minéral aux cultures. La conséquence est une diminution globale de la production agricole par unité de surface cultivée : un même volume de production nécessite une superficie plus grande, ce qui impose de ne plus gérer une parcelle indépendamment des autres, mais de les considérer comme un ensemble au sein de l'agroécosystème.

L'agriculture peut aussi contribuer à la lutte contre le changement climatique par un stockage du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique dans les écosystèmes et les sols. Ce stockage peut être accru par une augmentation de la biomasse produite, donc une intensification de la production agricole. Cela demande, à l'inverse, un usage accru d'intrants (éléments minéraux azote, N, et phosphore, P) et d'eau, et nécessite une protection des cultures toujours aussi efficace, soit par voie chimique (pesticides), soit par voie génétique, soit par voie naturelle (biocontrôle, aménagement des paysages).

Le département Environnement et Agronomie : adapter la recherche agronomique aux défis du xxi^e siècle

Dès le début des années 1970, la conscience des « nuisances » qui ont accompagné la modernisation agricole des années 1960 et 1970 est présente à l'Inra comme, d'une manière générale, dans les sociétés industrialisées. Pourtant, il faut attendre les années 1990 pour que les enjeux environnementaux contribuent à redessiner effectivement les finalités de l'Inra en les élargissant hors de la seule sphère agricole. Cet élargissement est renforcé quand, au tout début des années 2000, l'agriculture est interrogée par les diverses composantes de la société et par les autorités publiques, à la fois sur sa contribution au changement climatique et sur sa propre adaptation à ce phénomène dont la rapidité et la puissance sont sans précédent. L'Inra s'interroge alors sur son positionnement dans ce champ scientifique, l'environnement, dont les enjeux politiques, sociaux et économiques sont d'ampleur planétaire.

L'idée s'est imposée lentement que l'Inra ne peut pas se contenter de traiter les questions environnementales comme un coproduit de recherches orientées par les objectifs de production agricole, même si elles concernent l'usage des ressources naturelles. Pour l'institut, c'est un changement de paradigme : l'environnement est une finalité en tant que telle qu'il s'agit de considérer en élargissant le spectre et la cible des recherches, d'une part, pour accompagner l'émergence de voies de production plus respectueuses de l'environnement et, d'autre part, pour contribuer à la conception des politiques publiques agricoles et environnementales. Le département EA est alors créé à partir du rassemblement de trois départements jusque-là liés par leurs histoires mais indépendants dans l'organigramme de l'Inra. Leur convergence dans le cadre d'une stratégie unifiée n'était pas assurée d'entrée, elle a même nécessité tout au long de la construction du département, et encore aujourd'hui, une gouvernance résolue mais ouverte pour « garder le cap » sans exclure les capacités d'imagination et d'innovation de la diversité des chercheurs.

Pour que le département EA puisse être créé, il a fallu une volonté forte de la direction de l'Inra d'imprimer une nouvelle orientation à tout un périmètre scientifique. Mais il a aussi fallu que les diverses composantes scientifiques concernées trouvent des points de consensus stratégiques et robustes. Les deux finalités à atteindre — la finalité environnementale (et par là de l'intérêt général) et celle de production, le caractère englobant (par rapport à ceux des trois départements antérieurs) des enjeux et objets scientifiques correspondant à cette finalité, la gestion des espaces cultivés comme débouché privilégié d'application technique des recherches —, ont été et sont encore les points d'ancrage communs à tous les chercheurs du département EA.

De facto, la création de ce département correspondait à une entreprise de construction d'un collectif scientifique capable de dépasser la seule recherche d'ajustements techniques et d'optimisation des ressources au service soit du rendement (comme dans le cas de l'agronomie de la révolution verte), soit de la réduction des nuisances. Ce collectif agronomique doit porter une agronomie des systèmes, de l'intégration et de la complexité, des données massives, de la pluralité des échelles de temps et d'espace. Il s'agit d'une agronomie adaptative et anticipatrice, agronomie des *trade-offs* (arbitrages et compromis) entre objectifs au sein des territoires. Le département EA s'est progressivement engagé dans des recherches

sur les grands cycles biogéochimiques au service de la gestion des quatre principales ressources de notre environnement que sont l'eau, l'air, le sol et les espèces naturelles dans leur diversité, que les activités agricoles contribuent directement à modifier. Il ambitionne aussi de participer à une meilleure connaissance du changement climatique, son impact sur les systèmes agricoles, leur capacité d'adaptation et leur contribution à son atténuation. De nouveaux « fronts de science » et de nouveaux objets scientifiques, comme la conception de systèmes de culture agroécologiques permettant de réduire l'usage d'intrants de synthèse (fertilisants, pesticides), sont ainsi définis. Il faut aussi développer des systèmes d'observation pluri-échelles, une modélisation des écosystèmes ou encore des méthodes d'évaluation multicritères des systèmes de culture, nécessaires à la production d'une recherche de haut niveau scientifique et à forte capacité d'expertise.

Les orientations données à sa création autant que les investissements réalisés pour lui donner les moyens de produire de la connaissance et de l'expertise sont fondés sur un pari : l'Inra, s'il veut prendre une place significative dans le monde scientifique qui prétend apporter une contribution à la résolution des problèmes environnementaux, doit redéfinir en profondeur une problématique agronomique jusqu'alors orientée essentiellement par la production agricole. La création du département EA et celle, concomitante, du département SPE, est la marque de cette réorientation pour investir le champ de l'environnement. Sont regroupées au sein de ce département dans un même périmètre scientifique et organisationnel les compétences en agronomie (dans le seul domaine végétal) de l'ancien département d'Agronomie, et les compétences en science du sol et bioclimatologie des deux autres anciens départements de Bioclimatologie et de Science du sol, deux départements déjà très mobilisés par les problématiques environnementales. Cette construction est assez spécifique à la France : dans d'autres pays (comme au Royaume-Uni), l'étude de l'environnement n'est pas associée à celle de l'agriculture, et de plus l'étude des pratiques agricoles est plutôt associée à celle du fonctionnement des plantes et de leur amélioration génétique.

Ainsi donc, construit par l'appariement de domaines disciplinaires et de ressources scientifiques qui dans d'autres pays sont restés séparés, le département EA relève d'une architecture institutionnelle et d'un projet scientifique originaux. L'intitulé « Agronomie », pour désigner les contours scientifiques et organisationnels d'un département de l'Inra, et son association au terme « d'environnement » constituent à la fois une originalité et un pari par rapport à l'ensemble des organisations de recherche de par le monde qui se sont structurées sur le modèle anglo-saxon. Explicitement focalisée sur la conception, l'évaluation et la mise en œuvre des règles de conduite des agroécosystèmes, l'agronomie n'est plus seulement orientée ou guidée par la « boussole » de l'efficacité de l'action productive, à quelque niveau que ce soit, mais aussi par l'objectif d'un développement soutenable de la production agricole, prenant en compte l'environnement à la fois comme condition et comme produit du fonctionnement de ces systèmes.

En créant ce département à la fin des années 1990 dans le cadre plus général d'une profonde reformulation de ses finalités et en pleine réorganisation scientifique, l'Inra fait ainsi le pari qu'une innovation organisationnelle permettra des avancées scientifiques bien particulières. Le terme « agronomie » renvoie historiquement à une diversité de domaines scientifiques, pour la plupart présents dès l'installation de l'Inra en 1946, mais dont les périmètres sont changeants et, bien

sûr, dont les méthodes de recherche ont évolué. De son côté, le terme « environnement » renvoie à un ensemble d'enjeux de société concernant les ressources de la nature, qui, lorsqu'elle est domestiquée ou cultivée par l'homme, est parfois bien loin de son état originel, souvent même subissant nuisances et perturbations, dégradations et pollutions, voire destructions ou irréversibilités dramatiques. Accoler le terme « agronomie », qui désigne un spectre de méthodes scientifiques, au terme « environnement », qui recouvre des préoccupations et des finalités formulées par diverses composantes de la société, relève donc d'un appariement à première vue étrange. Celui-ci exprime en fait une stratégie et un pari scientifiques, certes risqué mais dont l'Inra escompte un bénéfice significatif, dans un périmètre d'enjeux où on ne l'attend pas.

Redécouvrir nos trajectoires

Cet ouvrage offre une réflexion collective sur les vingt années d'existence du département EA de l'Inra. Il présente les avancées majeures qu'il a produites et les enjeux du XXI^e siècle dans lesquels est engagé un département de recherche, département qui est lui-même un élément constitutif de la communauté scientifique construite au cours des vingt dernières années au service de l'agriculture et de l'environnement. Il éclaire la construction du périmètre scientifique où s'est opérée et se poursuit, en ce début de XXI^e siècle, l'adaptation de la recherche agronomique française, en la replaçant dans la dynamique de l'agriculture et des défis environnementaux. Il retrace la trajectoire d'un département aux racines anciennes dans l'Inra, mais dont la création est relativement récente et d'architecture originale.

L'ouvrage explicite les raisons qui ont amené progressivement, et non sans difficultés, à cette construction originale. Il exprime la dynamique scientifique qui, dans la diversité des approches et des méthodes, a ainsi été déclenchée pour permettre à la recherche agronomique de contribuer à relever des défis environnementaux et sociétaux cruciaux. Il présente un panel de résultats scientifiques et la formation d'une capacité d'expertise qu'a permis l'engagement résolu, et même enthousiaste, d'une communauté scientifique qui s'est mobilisée sur des enjeux stimulants, qui s'est sentie légitimée dans son rôle social, et qui s'est organisée pour les affronter.

L'ouvrage comporte des contributions thématiques portant sur des questions sociétales, scientifiques ou méthodologiques. Nous avons demandé aux auteurs d'exposer les acquis scientifiques des thématiques traitées en adoptant, autant qu'il leur était possible, une posture de recul, afin de donner à leur narration une profondeur historique. Chaque contribution a été rédigée sous la responsabilité d'un ou de plusieurs coordinateurs, qui ont mobilisé les compétences et les productions pertinentes depuis la création du département (articles scientifiques, rapports, projets, schémas stratégiques, etc.). Cet ouvrage propose donc un regard sur la dynamique du département EA sans ignorer combien les disciplines, les compétences et les connaissances scientifiques ont des antécédents importants qui datent de bien avant sa création. Nous avons aussi souhaité que puissent être évoquées les tensions ou les contradictions inhérentes aux transformations des thématiques et des disciplines, et aux innovations dans les dispositifs de recherche.

Ce livre est une œuvre collective. Non seulement de nombreux auteurs y signent un texte, mais aussi bien d'autres contributeurs ont apporté des matériaux ou lu

des versions intermédiaires, pour faire en sorte que, le mieux possible, soit exprimée la richesse et la diversité des acquis, des réalisations et des projets du département EA. Nous leur exprimons toute notre gratitude et nous les remercions tous vivement et chaleureusement. Nous souhaitons que l'ensemble de nos collègues du département y découvrent leur propre histoire collective en même temps que la richesse de la communauté scientifique à laquelle ils se rattachent. Nous espérons aussi que, dans l'Inra, d'autres communautés de disciplines s'intéresseront à des recherches qui peuvent présenter pour elles un caractère exotique, même si elles en partagent les enjeux. Enfin nous offrons à tous lecteurs intéressés par l'environnement et l'agriculture l'opportunité de percevoir comment la recherche s'adapte à des questionnements complexes et puissamment évolutifs pour éclairer le sens d'engagements urgents.



PARTIE I

UN DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT ET AGRONOMIE À L'INRA : UNE STRATÉGIE DE RECHERCHE

CHAPITRE 1

L'environnement et l'agronomie à l'Inra : essai d'analyse historique d'une mise en convergence

Pierre Cornu, Egidio Valceschini

L'interconnexion des enjeux agricoles et alimentaires avec la question environnementale semble une telle évidence dans le monde qui est le nôtre, qu'il peut paraître extraordinaire qu'un organisme de recherche publique comme l'Inra, en prise directe avec les réalités physiques, économiques et sociales des territoires, ait attendu 1998 pour afficher l'environnement comme défi cognitif et pratique pour ses départements de recherche les plus directement impliqués dans la conception et le pilotage des agrosystèmes — l'agronomie, la bioclimatologie et la science du sol notamment.

Faire l'histoire de la genèse du département Environnement et Agronomie (EA) de l'Inra, ce n'est toutefois pas seulement faire le récit politique d'une trop longue « carence » ou d'un singulier « retard » de la recherche publique, mais bien davantage d'un processus scientifique et cognitif lent, laborieux, non linéaire, fait d'expériences et de tâtonnements, de rencontres, de jeux d'acteurs et d'effets d'opportunités, ayant fini par développer, à la toute fin du xx^e siècle, une compétence en analyse, gestion et prévision du comportement des systèmes cultivés.

Inscrites dans un établissement peu à peu devenu le vaisseau amiral des sciences du vivant piloté¹, l'agronomie, la bioclimatologie et la science du sol ont en effet dû définir leur propre traduction de la question environnementale et justifier la pertinence de celle-ci à la fois au regard de leur propre diversité paradigmatique et de leurs rapports de complémentarité, mais aussi en fonction de leur relation

1. Cornu P., Valceschini E., Maeght-Bournay O., 2018. *L'histoire de l'Inra. Entre science et politique*, Éditions Quæ, 464 p.

d'émulation avec les autres univers disciplinaires présents au sein de l'Inra et dans les autres organismes de recherche publique, depuis les sciences biologiques jusqu'à celles de l'homme. L'environnement, pas plus que la science, ne constitue un concept figé dans sa traversée de la seconde moitié du xx^e siècle. Et c'est bien la coévolution de la définition de la « question environnementale » et de la « réponse agronomique » qui fonde l'intérêt d'une enquête historique rétrospective.

► L'impossible greffe de la problématique environnementale dans la matrice productiviste des décennies modernisatrices

Le surgissement de la « question environnementale » dans le monde des biosciences de la seconde moitié du xx^e siècle s'opère de manière indirecte et retardée dans le débat scientifique français, l'Amérique du Nord constituant le foyer le plus précoce du questionnement sur l'impact de la modernité industrielle et agricole. Aux États-Unis tout particulièrement, où la discipline agronomique occupe un champ de compétences assez restreint, ce sont les biologistes universitaires qui traitent d'un grand nombre d'aspects qui relèveraient des sciences agronomiques appliquées dans les vieux pays agraires d'Europe occidentale, ce qui les met en situation de relier les signaux d'alerte qui surgissent dans les zones de grande culture du Midwest notamment. De ce fait, la biologie et l'écologie américaines connaissent un développement remarquable dans le troisième quart du xx^e siècle, comme sciences analytiques tout d'abord, puis comme sciences critiques de l'impact des activités humaines sur le vivant.

Si le livre de Rachel Carson, *Printemps silencieux*², est traduit et largement diffusé dès 1963 en France, il faut attendre la publication en 1965 d'*Avant que nature meure*³ par l'ornithologue français Jean Dorst (1924-2001) pour qu'un véritable débat naisse dans le monde scientifique français. À l'échelle du grand public, c'est la marée noire consécutive à l'échouage du *Torrey Canyon* en 1967 qui marque le début des mobilisations sociales sur la défense de l'environnement. Mai 68, à son tour, ouvre un espace pour la contestation de la destruction de la nature par le capitalisme, espace dans lequel s'engouffre une partie du monde scientifique, au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) notamment — mais pas forcément chez les écologues. Du côté politique, Georges Pompidou (1911-1974) n'est pas insensible aux enjeux environnementaux. Mais la conception qui domine l'action publique sous son mandat est que le développement économique constitue certes une menace pour la nature, mais que la préservation de cette dernière représente une contrainte et un coût qui demandent à réfléchir soigneusement à l'ampleur des mesures de sauvegarde envisagées. Le fait que les principales menaces soient analysées comme provenant de l'industrialisation et de l'urbanisation laisse penser qu'il suffirait de sanctuariser une partie de la France rurale, en cohérence avec le mouvement de création de parcs naturels. Rapidement toutefois, la critique du productivisme nord-américain traverse l'Atlantique et interroge les pratiques agricoles des bassins de grande culture de la France métropolitaine. Assimilé au projet modernisateur national, l'Inra ne peut rester extérieur à une préoccupation

2. Carson R., 1962. *Silent Spring*, traduction française : *Printemps silencieux*, 1963, Plon, 283 p.

3. Dorst J., 1965. *Avant que nature meure*, Éditions Delachaux et Niestlé, 422 p.

montante dans la société et dans le débat public, et dans son discours programmatique tout du moins, il se révèle très réactif dès le tournant des années 1970.

L'éveil de la recherche agronomique aux « externalités négatives » de l'agriculture

Le 25^e anniversaire de l'institut est l'occasion d'afficher cette prise de conscience, avec une place de choix accordée, dans le volume édité pour l'occasion, à un chapitre rédigé par Raymond Gras (1927-2013) et Richard Vibert (1908-2003), sous le titre « Protection et aménagement du milieu »⁴. « Un environnement convenable doit permettre à l'homme de vivre en bonne santé et lui fournir un cadre de vie agréable. Ceci débouche sur l'importante question des nuisances de tous ordres », écrivent les chercheurs⁵. L'Inra doit intervenir « en évaluant les conséquences sur les milieux ruraux ou non d'un aménagement donné et en proposant des solutions permettant éventuellement d'en pallier les inconvénients »⁶. S'appuyant sur une prise de position de la FAO en ce sens, les auteurs plaident pour le développement de l'écologie au sein de la recherche agronomique. En effet, « l'écologie apporte à l'étude du vivant une nouvelle façon de penser. Alors que la biologie de laboratoire analyse la structure de l'organisme, de la cellule ou du gène, l'écologue, biologiste de terrain, analyse la structure du monde vivant dans son ensemble. On en arrive ainsi à une des notions les plus fondamentales de l'écologie, celle d'écosystème. Elle exprime l'ensemble des rapports énergétiques et des cycles biogéochimiques qui relient les organismes entre eux et avec le milieu »⁷. Force est toutefois de constater que cette écologie idéale n'existe guère dans les institutions scientifiques françaises, et qu'il y a encore loin du constat à sa prise en charge.

Engagés depuis la fondation de l'institut dans l'accompagnement de la modernisation agricole et alimentaire de la France, les chercheurs de l'Inra se montrent certes sensibles aux alertes sur l'état des sols et des nappes phréatiques dans les régions de grande culture notamment, et certains n'attendent pas que l'environnement soit à l'agenda du pouvoir politique pour penser les limites de l'intensification. Prendre conscience de la finitude de la demande de biens matériels, c'est aussi se mettre en situation de préserver le potentiel des sols, des eaux et des espèces animales et végétales domestiquées. L'agronome Stéphane Hénin (1910-2003), chercheur et professeur respecté, n'a-t-il pas justement redéfini l'agronomie en 1967 comme une « écologie appliquée »⁸ au champ cultivé et à l'aménagement du territoire ? Pour la plupart de ses collègues toutefois, si la question environnementale concerne effectivement les pratiques de culture, ce sont principalement les acteurs externes, et notamment les industriels, qui doivent être mis devant leurs responsabilités. Les agronomes de l'Inra, entre autres ceux du Service d'expérimentation et d'information de l'Inra (SEI), plus particulièrement chargés du transfert des connaissances scientifiques auprès des agriculteurs, déplorent avec fatalisme l'inadéquation, et même la dérive « intensificatrice » des prescriptions de fertilisa-

4. Gras R., Vibert R., 1972. Contribution de la recherche agronomique à l'aménagement de l'espace ». In : *L'Institut national de la recherche agronomique. Édition du 25^e anniversaire. 1946-1971. Regards sur la France*, mars, SPEI Éditeur, 376 p., 133-183.

5. *Ibid.*, p. 133.

6. *Ibid.*, p. 146.

7. *Ibid.*, p. 139.

8. Hénin S., 1967. Les acquisitions techniques en production végétale et leurs applications. *Économie rurale*, 74, 37-44, 37.

tion. La relation entre les industries des intrants chimiques et la recherche agronomique, jusqu'alors sans nuages ou presque, entre dans une phase de dégradation rapide. La préoccupation des uns et des autres n'est toutefois pas l'environnement au premier chef, mais bien davantage l'optimisation technico-économique de l'utilisation des fertilisants chimiques. De fait, c'est toujours la « science normale » qui prévaut dans un département d'Agronomie dont les cadres, pour une bonne partie d'entre eux enfants de la France rurale malthusienne de l'entre-deux-guerres, persistent à voir dans la rationalisation techniciste de la production la clé de sortie de la misère du passé.

La rationalisation de l'usage des ressources : la nature « hors-sujet »

Confrontée à la fin du cycle des grands projets de recherche et de modernisation des débuts de la V^e République, la direction de l'Inra voit dans le débat scientifique international une source potentielle de relégitimation de ses missions. La conférence de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) de 1972, consacrée à la révision des concepts et des objectifs de la recherche agronomique dans les pays développés, accueille ainsi une forte délégation de l'Inra, conduite par Jean Bustarret (1904-1988) en personne. Les conclusions de cette rencontre touchent au cœur de la modernisation productiviste que l'Inra a portée et continue à nourrir : « L'évolution technique et économique des sociétés industrielles confère à la recherche agronomique des responsabilités nouvelles vis-à-vis de la protection de la nature et d'une manière plus générale en vue de la préservation et de l'amélioration de la qualité de vie des individus. »⁹

La montée en puissance de la contestation écologique, la création en 1971 d'un ministère de l'Environnement et le lancement en octobre 1972 du premier programme d'action communautaire sur l'environnement, tout incite l'institut à effectuer, par touches successives, un *aggiornamento* de sa doctrine agronomique, avec notamment le développement de travaux sur la lutte biologique, encouragés par la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), et de programmes de recherche spécifiquement consacrés aux régions agricoles menacées, notamment dans les zones de montagne¹⁰. La question environnementale n'est cependant pas encore l'aiguillon premier de l'ajustement de l'offre de recherche, tout au plus un argument surnuméraire dans une stratégie de réaffirmation de la validité universelle et de la capacité à corriger ses propres limites du projet modernisateur.

Encore réticents à intervenir dans les controverses publiques, certains chercheurs de l'Inra, notamment en bioclimatologie et en science du sol, se montrent désireux de participer au débat scientifique international, et particulièrement à la séquence qui commence avec la fondation du Club de Rome en 1968, se poursuit par la création du programme Man and Biosphere par l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (Unesco) en 1971, puis par la conférence de l'Organisation des Nations unies (ONU) sur l'environnement à Stockholm en 1972. La gravité croissante des atteintes aux équilibres des écosystèmes et à la biodiversité ainsi qu'à la santé publique, l'interconnexion des enjeux par les effets de l'augmentation de la pression anthropique sur les milieux,

9. *Bulletin de l'Inra*, n° 75, 1972, p. 6.

10. Inra, 1976. *L'Inra et la montagne*, 24 p. (archive Inra). Et : Inra, 1980. *L'Inra et la montagne*, tome 1, 100 p., tome 2, 298 p. + annexes (archive Inra).

la découverte des effets atmosphériques et systémiques des pollutions, tout concourt à faire de l'environnement non plus une collection de problèmes localisés, mais une crise concernant et affectant *in fine* la planète dans sa globalité.

Quand Jacques Poly, fraîchement nommé directeur scientifique de l'Inra, publie en 1972 le rapport « L'Inra et l'environnement »¹¹, ce n'est toutefois pas à un agronome ou à un spécialiste des problèmes de pollution des sols et des eaux qu'il confie la maîtrise éditoriale de la synthèse, mais à Pierre Bouvarel (1922-2006), chef du département des Recherches forestières alors en pleine expansion et résolument tourné vers la valorisation industrielle des ressources ligneuses. Ce dernier entend faire de la sylviculture la matrice et le modèle de la formulation et de la prise en compte de la question environnementale, en même temps qu'un outil pédagogique pour faire comprendre au grand public les dangers d'une conception romantique de la nature. « Le retour à la forêt "sauvage" est une illusion dangereuse, écrit-il en 1972. Dans la majorité des cas, la rentabilité des forêts pour la production ligneuse est la meilleure garantie qu'elles pourront continuer à assurer — gratuitement — leurs autres fonctions. »¹² Les agronomes, de même, voient avec méfiance la résurgence d'une conception esthétique de la ruralité qui viendrait contester la marche du progrès et sa contribution à la croissance économique. Mais dans une phase historique où les consommateurs ont certes déjà perdu la visibilité et la compréhension des modes de production agricole, sans toutefois les contester ouvertement encore, les agronomes ne s'estiment pas directement concernés par les enjeux sociétaux et laissent volontiers à d'autres le discours sur l'environnement, préférant, à tout prendre, se faire les défenseurs des mérites des régions oubliées du développement.

Dans son introduction au rapport de 1972¹³, Pierre Grison (1912-2000), chercheur reconnu en entomologie et président du comité scientifique de la DGRST « Équilibre et lutte biologique », circonscrit ce que pourrait recouvrir « l'environnement » pour la recherche agronomique. Tout d'abord, à ses yeux, l'environnement ne doit pas constituer une nouvelle discipline scientifique. C'est plutôt la collaboration des disciplines qui doit permettre d'en comprendre les mécanismes et les régulations, les perturbations et les altérations. Ensuite, l'environnement ne doit pas être assimilé à une nature existant sans l'homme qu'il s'agirait de préserver des atteintes que ce dernier pourrait lui porter : « La notion d'environnement fait état de l'utilisation par l'homme des ressources que la nature lui prodigue. »¹⁴ Enfin et surtout, il s'agit de penser l'environnement en termes de bonne ingénierie, en cherchant à « déplacer le centre de gravité de l'adaptabilité et de la productivité des espèces vers le seuil supérieur de tolérance aux facteurs extrinsèques »¹⁵. Ainsi, l'horizon des gains de productivité n'est-il en rien contesté. Quant aux responsabilités dans les atteintes à l'environnement, Pierre Grison les impute ouvertement aux industriels et aux exploitants agricoles eux-mêmes. Les chefs de département qui couvrent la zoologie, la pathologie végétale, la génétique et amélioration des plantes, la malherbologie et la phytopharmacie abondent en son sens dans leur propre contribution : ce sont hélas les pratiques des industriels

11. Inra, 1972. *L'Inra et l'environnement. Inventaire des recherches*, 224 p. (archive Inra).

12. Bouvarel P., 1972. Recherche forestière et environnement. In : *L'Inra et l'environnement. Inventaire des recherches*, Inra, 224 p., p. 49.

13. *Ibid.*, p. 5.

14. *Ibid.*, p. 1.

15. *Ibid.*, p. 2.

et des agriculteurs qui se sont éloignées des conseils de prudence des chercheurs¹⁶. Et les signataires de revendiquer comme une victoire de la pédagogie de l'Inra que « la généralisation du désherbage des céréales, amplement justifiée du point de vue économique, n'ait pas entraîné de détérioration trop grave de l'environnement »¹⁷.

Ainsi Pierre Grison et ses collègues croient-ils pouvoir concilier le projet scientifique au long cours de l'Inra et celui énoncé à Stockholm, réunis par un même idéal qu'ils définissent comme l'alliance de l'aménagement du territoire et de la qualité de vie. On aurait tort de voir dans la défense de ce faux consensus du cynisme ou de l'indifférence. C'est justement parce que Pierre Grison est convaincu de l'importance de la question environnementale qu'il entend lui réserver le mode de traitement le plus élevé qu'il connaisse : celui de la science. Mais quelle science exactement ?

Paradoxalement, hors de l'Inra, les écologues se tiennent en retrait des débats, particulièrement vifs dans la communauté scientifique internationale. La lente et difficile élaboration de leur propre matrice épistémologique les ayant amenés à développer des approches déconnectées des facteurs anthropiques, considérés comme perturbateurs, ils sont de fait peu à l'aise pour prendre position sur la gouvernance des ressources. Et quand bien même ils travaillent sur des échelles proches de celles des agronomes « de terrain », ils ne rencontrent jamais ces derniers sur leurs observatoires.

Pour Jacques Poly, intégrer l'objet « environnement » au champ des compétences de son institut ne présente donc guère de risque d'opposition au sein du monde scientifique, l'Inra étant à son aise pour ranger sous sa bannière des recherches sur les paysages, l'aménagement du territoire, la pollution des sols, la sécurité sanitaire ou encore la gestion des déchets et des résidus. L'environnement, pour lui, ce ne sont encore que les nuisances perçues du modèle économique et technologique dominant. La nature n'est pas le sujet, elle est même hors-sujet. Pour des raisons de compétences scientifiques, certes, mais également à cause de la défiance de Jacques Poly et d'une bonne partie des chercheurs de sa génération envers tout ce qui ressemble à une recherche de type universitaire déconnectée des finalités économiques et sociales, l'écologie comme science autonome n'a pas droit de cité dans l'Inra de cette période. Seules des individualités ayant développé une sensibilité et une approche plus holistes, tout en maintenant le dialogue avec les disciplines techniques, y parviennent, à l'image de Pierre Grison et de l'unité Éco-développement qu'il a fondée sur le domaine de La Minière.

► La discipline agronomique face à la problématique environnementale : de la traduction à la conversion (1973-1989)

Quelque justification que l'on se donne, il apparaît néanmoins, à partir du premier choc pétrolier, que la marche forcée vers la modernisation initiée dans l'après-guerre ne peut plus durer sans une réflexion sérieuse sur ses externalités. Le forçage inconsidéré des ressources de la biosphère n'apparaît pas seulement comme une menace pour les sociétés industrialisées dans leur cadre urbain, mais aussi comme une source de vulnérabilité pour l'agriculture elle-même. Dans ce contexte,

16. *Ibid.*, p. 37.

17. *Ibid.*, p. 40.

la crise énergétique joue un rôle de révélateur, ouvrant un débat interne au monde de la recherche agronomique sur les effets de « l'intensification » et, plus largement, sur les limites du « productivisme ». À cet égard, la sécheresse de 1976 interroge vivement l'Inra¹⁸, et place la thématique de l'eau et de son bon usage au cœur des préoccupations des agronomes. Cependant, la pression productiviste a beau être contestée, et la problématique environnementale gagner sans cesse en force et en ampleur, il n'est pas possible pour la direction de l'institut de remettre en cause d'elle-même ses missions initiales, dans un contexte de vaches maigres budgétaires. Jacques Poly lui-même, accédant à la présidence de l'institut en 1978, ne réussit pas à convaincre le politique, avec son rapport « Pour une agriculture plus économe et plus autonome »¹⁹, de la nécessité d'une politique agricole alternative. Des pans entiers des sciences agronomiques sont ainsi soumis à des choix difficiles, de nature à la fois scientifique et stratégique, sans que la direction de l'Inra soit en mesure de leur fixer une orientation claire et déterminée.

Dans ce contexte, la construction scientifique de la question environnementale à l'Inra est loin d'aller de soi. En effet, dans l'organisation de l'Inra en départements de recherche, ce sont principalement les sciences de l'animal, le secteur propre de Jacques Poly, et celui de l'amélioration des plantes, emblème de la transformation des paysages agraires français, qui se trouvent potentiellement les plus impactés par l'essor de la question environnementale, mais qui disposent d'importants moyens de résister à la contestation extérieure, notamment en s'engouffrant dans l'horizon des biotechnologies, qui les éloigne de la demande sociale. Inversement, les départements de science du sol et de bioclimatologie, qui ont développé des outils d'analyse aux échelles les plus fines, seraient *a priori* les plus à même de définir les fronts de recherche à partir desquels traduire la problématique environnementale en questions scientifiques. Mais ils sont de dimensions très modestes encore, et mal identifiés à l'extérieur.

Ce pourquoi c'est finalement autour et au sein du département d'Agronomie, le plus ancien et historiquement le plus en prise avec la demande de résultats scientifiques applicables par les agriculteurs, que se livre une bonne partie des luttes pour trouver le nouveau point d'équilibre entre pertinence scientifique, attentes de la profession agricole et acceptabilité sociale, dans le contexte de la montée de la question environnementale.

L'agronomie à la recherche d'un juste milieu entre utilitarisme et utopie

Bien davantage que les signaux d'alerte sur la qualité des eaux et de l'air, ce sont toutefois les percées des biosciences qui bousculent le plus fortement la recherche agronomique française dans ses équilibres internes. Le dilemme pour l'institut est en effet de se situer, d'une part, par rapport à une biologie moléculaire en voie de structuration accélérée à l'échelle internationale et qui va de percée en percée à la charnière des années 1970 et 1980, et, d'autre part, par rapport aux approches systémiques qui entendent refonder les sciences agronomiques dans une perspective critique, en interrogeant d'autres niveaux d'organisation du vivant, notamment sa dimension humaine et sociale. Jacques Poly, en fin stratège, donne des gages aux

18. Inra, 1977 (janvier). La sécheresse de 1976, 15 p.

19. Poly J., 1978. Pour une agriculture plus économe et plus autonome. Rapport, Inra, document dactylographié, 69 p.

deux orientations, mais traduit dans ses choix budgétaires ce qui est sa véritable priorité : fonder la réorientation de l'Inra sur l'ingénierie du vivant, convaincu qu'il est que tout problème « agronomique » doit avoir sa solution « génétique » et donc « moléculaire », comme le laisse espérer dans cette période la promesse de la mise au point d'une variété de blé capable de fixer l'azote. L'agronomie se trouve ainsi mise en danger sur ses deux interfaces majeures, menacée d'un côté de devenir un simple « service d'aval » de la génétique appliquée à l'amélioration des plantes, et de l'autre de se trouver peu à peu subordonnée aux sciences sociales. Le grand écart paraît intenable, entre renforcement de l'académisme scientifique d'une part, et recherche de l'interaction la plus étroite avec les mondes de la production d'autre part. C'est dans la logique de la quête d'une sortie par le haut qu'il faut comprendre l'internalisation progressive et prudente de la question environnementale, pierre angulaire de la refondation d'une discipline qui a porté pendant deux siècles la démarche réductionniste appliquée à la maximisation du potentiel des cultures.

En phase d'incertitude sur son centre de gravité scientifique, l'agronomie l'est également sur la pertinence de son périmètre d'étude et d'intervention. La décision en 1973 par la direction de l'Inra de scinder le département d'Agronomie en deux en extrayant la science du sol constitue en effet une donnée majeure de la nouvelle équation, à une époque où l'autorité des chefs de département sur leurs unités de recherche est à la fois très forte et exclusive. Selon Gilles Lemaire (1945-), « cette séparation de l'Agronomie d'une partie constitutive essentielle de son "système d'étude", le sol [...], a été réalisée à l'époque au nom d'une vision très segmentée et réductionniste des disciplines scientifiques : mieux diviser donc mieux cerner pour mieux analyser »²⁰. Comme en témoigne Jean Mamy (1935-2002), chef du département de Science du sol à partir de 1979, « ont été regroupés en sciences du sol tous les gens qui, comme moi, travaillaient sur le sol, en tant qu'objet d'étude et de compréhension, et en agronomie, tous ceux qui prêtaient plus grande attention aux problèmes de conduite des cultures »²¹. Cette division asymétrique a pour effet immédiat de placer sur une agronomie aux ressources humaines et techniques réduites l'essentiel de la charge des relations de l'institut avec la profession agricole, laissant davantage d'autonomie méthodologique à la science du sol pour prendre en compte les effets concrets sur les sols et les ressources en eau des pratiques agricoles.

Michel Sebillotte (1934-2010), titulaire de la chaire d'agronomie de l'Institut national agronomique Paris-Grignon (INA-PG), et qui revendique Stéphane Hénin comme son maître à penser, refuse cette scission scientifique. Partisan d'une approche intégrative des sciences appliquées, il se fait à partir de 1974 le concepteur brillant et le promoteur habile d'une approche systémique de l'agronomie, qui rencontre un succès certain. Étudiants, agriculteurs et conseillers agricoles montrent un grand intérêt pour des méthodes qui permettent d'économiser sur les coûts de production. C'est le cas, par exemple, des travaux sur la fertilisation azotée du blé, menés avec Jean Hébert. Plus largement, c'est une nouvelle génération de chercheurs que Michel Sebillotte forme et promeut, et avec lesquels il développe l'ambition d'une refondation de la discipline agronomique. Jean Boiffin (1948-) et Jean-Marc Meynard (1954-) sont ainsi mobilisés pour développer, en concurrence

20. Échanges avec les auteurs, printemps 2018.

21. Mamy J., 1999. *Arborales Inra*, tome 3, 37-51, p. 41.

avec les approches réductionnistes, de nouvelles méthodes de conduite des cultures susceptibles d'en augmenter la productivité grâce à une expertise *ad hoc* sur les potentialités des milieux cultivés, sans surexploitation dommageable. Cette orientation, parfaitement en phase avec le rapport de Jacques Poly « Pour une agriculture plus économe et plus autonome »²², est toutefois ambiguë encore dans son rapport à la question environnementale. En effet, si les préoccupations du maintien de la fertilité des sols sont bien présentes, ce n'est pas la problématique écologique qui guide le renouvellement paradigmatique de la discipline agronomie, mais bien le souci de l'excellence technique.

C'est de fait davantage à partir de la thématique de l'eau, ressource fortement sollicitée par l'agriculture intensive, que l'Inra sort de sa position défensive sur les questions d'environnement. Le rapport de Suzanne Mériaux (1924-2016), « L'Inra, l'eau et la production agricole »²³, publié en 1979, constitue ainsi un jalon marquant de la refondation du rapport des sciences agronomiques à l'intérêt général, assimilé non plus seulement aux besoins alimentaires mais également à la préservation des ressources des territoires. Le temps est révolu où l'on pouvait affirmer sans sourciller que l'agronomie publique aurait toujours été et serait, par principe, la meilleure gardienne de l'environnement. Sur les questions relatives aux ressources en eau et à leur « bonne » utilisation, comme sur celles de la conduite de la prairie ou de la gestion des forêts, les débats s'ouvrent en interne. L'Inra sort de l'unicité scientifique et du consensus sur un progrès « linéaire ».

D'avantage encore que le travail de Suzanne Mériaux, c'est toutefois la publication l'année suivante du rapport de Stéphane Hénin sur l'eau et les pollutions diffuses par les engrais et les déjections animales²⁴ qui représente la preuve la plus éclatante du changement de posture de la recherche agronomique publique face au modèle productiviste. Personne ne peut plus considérer que l'industrialisation mal contrôlée serait la principale, voire la seule cause, des atteintes à l'environnement. « Et c'est bien pourquoi le rapport Hénin a été une vraie rupture : l'agriculture était aussi à regarder ! Et alors qu'avait fait l'Inra ? »²⁵, témoigne Jean Boiffin.

L'impossible préemption de l'environnement par l'agronomie systémique

Malgré tout, « il ne saurait être question de remettre en cause la politique d'amélioration de la productivité et des revenus ? »²⁶, indique sans ambages le rapport « Environnement » du VIII^e Plan (1981-1985). Et Jean-Claude Rémy (1941-), chef du département d'Agronomie de l'Inra, de confirmer en 1985 : « L'intensification de la production est nécessaire pour maintenir le revenu des exploitations agricoles. »²⁷ Remettre en cause ou limiter l'intensification en réglementant l'usage des ressources, ce serait rejeter en bloc la science, l'innovation et

22. Voir : Poly J., 1978. Nouvelles exigences pour l'agriculture. Évolutions nécessaires et implications pour la recherche agronomique. In : *Exigences nouvelles pour l'agriculture : les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?* (Boiffin J., Huet P., Sebillotte M., eds), Cycle supérieur d'agronomie, INA P-G, Chaire d'agronomie, Adeptina, 496 p., p. 14-28.

23. Inra, 1979. *L'Inra, l'eau et la production agricole*, Inra, 269 p.

24. Hénin S., 1980. Activités agricoles et qualité des eaux. Rapport du groupe de travail. Ministère de l'Agriculture/Ministère de l'Environnement, 2 tomes.

25. Échanges avec les auteurs, été 2018.

26. Commissariat général au Plan, Rapport de l'intergroupe Environnement, 1980. Préparation du VIII^e Plan 1981-1985, 165 p., p. 97.

27. Cesta, 1985. Pour une politique scientifique internationale de l'environnement. Document préparatoire français, Ministère de l'Environnement, 225 p., p. 87.

le progrès. Une seule voie d'intervention, donc : diffuser la meilleure science disponible jusqu'aux utilisateurs finaux, et accompagner ces derniers pour une meilleure pratique des technologies. « Plutôt que d'intervenir par la voie réglementaire ou par la taxation de l'emploi de ces auxiliaires à l'agriculture [les engrais et les pesticides], le choix s'oriente vers une politique d'information et de recherche pour un meilleur emploi des engrais azotés. »²⁸

Cependant, les partisans d'une approche systémique de l'agronomie s'engagent dans la brèche ouverte par Stéphane Hénin pour dessiner des orientations scientifiques desserrant l'étau du productivisme et de l'artificialisation de l'agriculture. Michel Sebillotte soutient ainsi la création, en 1979, du département Systèmes agraires et développement, confié au généticien Bertrand Vissac, ami et collaborateur de longue date de Jacques Poly. Sans y occuper la place centrale, le professeur d'agronomie pense obtenir là des moyens pour intégrer à la recherche agronomique les perspectives écologiques, inspirées notamment du programme Man and Biosphere. Bernard Hubert (1947-), de retour d'Afrique de l'Ouest, peut ainsi créer à Avignon l'unité de recherche Écodéveloppement et initier des recherches innovantes sur la lutte contre les incendies de forêt par la requalification du pastoralisme.

Michel Sebillotte n'entend pas pour autant délaisser le département d'Agronomie, dépositaire du socle identitaire et garant scientifique de la discipline. Le contexte semble lui être favorable, car ce département est « à la peine » depuis la scission de 1974. Louis Gachon (1926-1999), chef du département au tournant des années 1980, a beaucoup de difficultés à réorienter ses laboratoires autour d'un projet commun, dans une atmosphère par ailleurs tendue par la prévalence des recrutements et des avancements en biologie fondamentale. C'est de fait Jean Mamy, chef du département de Science du sol, qui se montre le plus offensif sur la question environnementale : « D'abord tourné très largement vers la pédologie en tant que démarche d'approche du milieu naturel, puis vers les problèmes agronomiques, [notre département] doit maintenant être en mesure de répondre aux exigences croissantes de notre société dans le domaine de la protection de l'eau et de l'environnement. »²⁹

Au sein du département d'Agronomie, Louis Gachon cède sa place à Jean-Claude Rémy, lequel est rapidement remplacé en 1985 par Didier Picard (1941-), venu de la recherche tropicale. Disciple revendiqué de Stéphane Hénin, ce dernier s'efforce à la fois de redonner corps au département et de consolider sa colonne vertébrale scientifique. Pour cela, il pense pouvoir faire fond sur l'écophysiologie, méthodologie systémique originale développée dans le giron de la bioclimatologie des années 1970, et qui présente l'avantage dans les années 1980 de proposer un modèle alternatif au « tout moléculaire », sans pour autant revenir à la conception ancienne de la science de la « plante entière ». Selon Gilles Lemaire, « il ne s'agissait donc pas à l'époque d'une simple tentative de restructuration entre deux départements venant “d'en haut” mais d'un souhait de la “base” d'identifier un cadre scientifique plus cohérent et moins lié à l'histoire des départements [...]. C'est la convergence des approches faites par les chercheurs de base des deux départements d'Agronomie et de Bioclimatologie qui a imposé l'émergence de l'écophysiologie à l'Inra »³⁰.

28. *Ibid.*, p. 87.

29. Jean Mamy, Rapport d'activité du département de Science du sol 1986-1987.

30. Échanges avec les auteurs, été 2018.

Avec le bioclimatologue Alain Perrier (1940-), Didier Picard propose³¹ en 1989 de faire de l'écophysiologie le socle d'une discipline agronomique rélargie. Cherchant à améliorer la crédibilité scientifique et la visibilité internationale de l'agronomie, il joue un rôle majeur dans la création de l'European Society for Agronomy (ESA), « dans l'indifférence de la DG Inra, jusqu'à ce que le ministre de la Recherche Hubert Curien annonce qu'il présidera en personne la séance inaugurale en décembre 1990 »³², souligne-t-il. Dans le même temps est fondé l'*European Journal of Agronomy*, où l'écophysiologie trouve une bonne place et permet de tester les affinités entre disciplines se revendiquant de cette approche. Malgré tout, le contexte reste difficile, avec la nomination en 1989 du biochimiste Pierre Douzou (1926-2000) à la tête de l'Inra. Didier Picard en vient à se demander « s'il y avait encore une place pour l'agronomie au sein de l'institut »³³. « C'était la période où un certain nombre de personnes, dont j'étais, avaient le sentiment que l'Inra était en train d'évoluer vers un CNRS bis avec toutes les questions que cela posait, en particulier le fait de sembler ne plus vouloir investir dans certaines disciplines, de se couper totalement de la profession. »³⁴ Un doute suffisamment fort pour lui faire préférer en 1991 la direction scientifique du Cirad.

De fait, la situation est devenue paradoxale pour les agronomes depuis les réformes impulsées à partir de 1982 par Jean-Pierre Chevènement au ministère de la Recherche et de l'Industrie, ayant abouti en 1984 à la consécration de l'Inra comme Établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST). Moins internationalisée et publiant moins que les disciplines scientifiques de pointe, la discipline agronomique n'entre guère dans les canons de la science qui domine dans la nouvelle hiérarchie de l'institut. D'un autre côté, la dynamique impulsée par la « Relance agronomique » de Michel Sebillotte en 1983, dans la foulée des États généraux du développement agricole, a renforcé la « demande d'agronomie » auprès d'agronomes de métier moins nombreux, moins considérés, et malgré tout attendus sur tous les fronts pour développer des réponses opérationnelles à des problématiques sans cesse plus complexes, qui à la fois les tirent vers les sciences humaines et exigent d'eux de suivre toutes les avancées de la physique, de la chimie et de la biologie. « Comment concevoir une politique de l'environnement permettant une réduction effective des pollutions d'origine agricole ? », s'interrogent Michel Sebillotte et Jean-Marc Meynard en 1990. « Les états de l'environnement sont le produit du fonctionnement de nombreux systèmes très complexes. Ceux-ci, plus ou moins interconnectés, ont des dynamiques non synchrones et des mécanismes de régulation très variés ; certains de ces systèmes sont pilotés par des groupes d'acteurs qui n'ont pas forcément les mêmes objectifs et les mêmes contraintes ; enfin, le fonctionnement de l'écosystème général est soumis aux aléas du climat. Il semble clair, en tout état de cause, qu'une agriculture « viable » est essentielle à une protection efficace de l'environnement : les évolutions devront être conduites dans l'intérêt simultané de l'agriculture et de l'environnement. »³⁵

31. Inra, 1989. *Charte de l'écophysiologie*, 16 p., p. 6.

32. Échanges avec les auteurs, été 2018.

33. Picard P., 2008. *Archonales Inra*, tome 13, 6-46, p. 28.

34. *Ibid.*, p. 29.

35. Sebillotte M., Meynard J.-M., 1990. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. In : *Nitrates, agriculture, eau* (Calvet R., ed.), Inra, 289-312.

Malgré son énergie et ses talents de pédagogue, Michel Sebillotte ne parvient pas à transformer l'intuition systémique de ses débuts en un corpus méthodologique suffisamment robuste pour préempter la question environnementale à l'Inra, laissant ses héritiers les plus proches dans une position temporairement marginalisée par rapport aux chercheurs produisant, à partir du corpus ancien des sciences du sol et du climat, une montée en complexité et en généralité jugée plus prometteuse ou plus rassurante par la direction générale. Ainsi, la création en 1986 de la Cellule environnement de l'institut, autour de Patrick Legrand (1948-), rattachée à la direction générale, constitue-t-elle une opportunité manquée pour les agronomes, même si certains d'entre eux alimentent régulièrement les colonnes du *Courrier de l'environnement*. C'est en effet dans cet espace de liberté éditoriale en marge de la normalisation des publications académiques que les chercheurs sensibilisés aux problématiques écologiques se font les relais de l'actualité internationale, particulièrement dense suite à la catastrophe de Tchernobyl en 1986 et à la découverte de la perturbation de la couche d'ozone par les GES. Cependant, la direction de l'Inra, en phase de refondation délicate au tournant des années 1990, en reste à considérer les préoccupations environnementales comme un aiguillon de la réflexion prospective. La question environnementale demeure circonscrite à des questions d'aménités négatives, et n'a pas encore fini de saper le « programme » de l'agronomie *stricto sensu* et de son hypostase politique, le développement agricole, avec l'espoir, maintenu jusqu'au milieu des années 1990, que les biotechnologies permettront de contribuer à l'atténuation des effets négatifs du productivisme « première manière », fondé sur les énergies fossiles et sur la chimie agricole.

► La rupture de l'agronomie avec la finalité productiviste (1990-1995)

La conférence de Rio de Janeiro en 1992 inaugure un vaste débat sur la notion de « développement durable », présentée pour la première fois par la Première ministre norvégienne Gro Harlem Brundtland (1939-) en 1987. Si l'institut est représenté³⁶ à Rio par des délégués officiels, c'est surtout la Cellule environnement qui est dynamisée par cette conférence. À partir de ce tournant des années 1990, la situation évolue en effet assez vite, du fait du déploiement planétaire des enjeux environnementaux, impactant la recherche agronomique non plus sur ses marges ou dans ses interstices, mais au cœur de ses problématiques. Pour les agronomes, engagés depuis une décennie déjà dans la révision drastique des certitudes acquises en plus d'un siècle de paradigme physico-chimique appliqué aux cultures, ce nouveau contexte est à la fois une menace et une opportunité.

Cependant, faute d'une politique de l'environnement structurante aussi bien de la part du ministère de l'Agriculture que de celui de la Recherche, et malgré une Politique agricole commune qui à partir de sa réforme en 1992 envoie des signaux favorables, on est loin d'une action publique qui conjuguerait, comme le souhaitaient Rémi Barré et Michel Godet dès 1982, « une vision globale, systémique, volontariste »³⁷. Les organismes de recherche ont ainsi bien du mal à hiérarchiser

36. Inra, 1993. Rapport des participants de l'Inra à la Cnuccd (Rio de Janeiro, juin 1992) et à quelques manifestations périphériques. Inra, Délégation permanente à l'environnement/Direction des relations internationales, 64 p.

37. Barré R., Godet M., 1982. *Les nouvelles frontières de l'environnement*, *Economica*, 137 p., p. 104.

les fronts de recherche et à les décliner en programmes prioritaires dans un contexte général caractérisé par un hiatus croissant entre la force des mots prononcés par les dirigeants et la modestie des moyens qu'ils engagent pour les traduire en politiques publiques.

L'Inra rompt avec la finalité productiviste, mais bute sur la programmation scientifique

Fort des avancées pratiques de ses propres unités de recherche, c'est Jean Mamy, le chef du département de Science du sol, qui « prend la main » dans ce contexte incertain. En 1990, il est nommé chef du département d'Agronomie par intérim : « Pour un tas de raisons, témoigne-t-il dans *Archorales*, il [le département] me paraissait partir à la dérive. »³⁸ Le projet de Jean Mamy, dans la ligne de celui de l'institut, vise à augmenter la « scientificité » des recherches, c'est-à-dire leur recevabilité académique nationale et internationale. Mais il saisit également que c'est la raison d'être, la finalité et l'organisation d'un large secteur qui sont à réenvisager, dans la logique du tournant stratégique et prospectif impulsé par Guy Paillotin à partir de sa nomination à la présidence de l'institut en 1991. « L'Inra devait s'investir davantage dans l'étude des problèmes d'environnement et l'afficher clairement. Le secteur "Milieu physique et agronomie" ne me semblait plus répondre aux enjeux actuels. Il se trouve que mes propositions ont été appréciées par Bernard Chevassus et par Guy Paillotin qui venaient d'entrer en fonction. Ils m'ont nommé du même coup directeur scientifique, le 1^{er} octobre 1991. »³⁹

En matière de management scientifique, Jean Mamy ne manque pas de savoir-faire. Dès le tout début des années 1970, encouragé par Stéphane Hénin, il avait testé avec le département d'Agronomie⁴⁰ le Planning Programming Budget System (ou rationalisation des choix budgétaires, RCB), qui consiste en la formalisation d'une démarche prospective d'orientation scientifique à partir d'un graphe dessinant des chemins préférentiels de la recherche depuis les questions fondamentales jusqu'aux applications attendues. Désormais en charge de cette programmation, il manœuvre habilement en chargeant un groupe piloté par Gérard Monnier, où sont représentés les départements d'Agronomie, de Bioclimatologie, de Biométrie et de Science du sol, « de réfléchir à ce que devrait être une problématique agronomie et environnement au sein du secteur »⁴¹. Le rapport produit en octobre 1991, pierre angulaire de la réorientation environnementale des trois départements, pose que « le maintien ou l'amélioration des qualités de l'environnement dans lequel vivent les sociétés humaines sont l'une des conditions de leur survie et, par voie de conséquence, l'un des enjeux importants de la recherche scientifique d'aujourd'hui ». Le consensus se fait sur l'idée que la prise en compte des problématiques environnementales implique un double *aggiornamento* épistémologique et politique : l'environnement est une finalité en tant que telle, et l'Inra ne peut se contenter de la traiter comme un aspect annexe de recherches tournées vers la seule production agricole. Le groupe propose ainsi, ni plus ni moins, de déplacer l'épicentre des finalités des départements concernés, en donnant « une place

38. Mamy J., 1999. *Archorales Inra*, tome 3, 37-52, p. 48.

39. *Ibid.*, p. 48.

40. Maquart D., Gras R., Mamy J., 1971. Essai de programmation de la recherche. Département d'Agronomie. *Annales agronomiques*, numéro hors-série, 70 p.

41. *Ibid.*, p. 48.

centrale à l'influence sur le milieu naturel et ses ressources, des activités relevant de la production agricole, agroalimentaire et forestière »⁴².

Pour approfondir le travail engagé et élaborer, au niveau du secteur et à celui de chacun des départements, une stratégie scientifique de long terme cohérente, Jean Mamy fait appel à une génération « montante » de cadres : Bernard Itier est nommé chef du département de Bioclimatologie, Jean Boiffin de celui d'Agronomie et Pierre Stengel de celui de Science du sol. Tous sont unis par la volonté de progresser dans la prise en considération « sérieuse » de la problématique environnementale par la recherche agronomique. Mais ils sont aussi, peut-être surtout, conscients que l'enjeu est pour eux de faire subsister, en le rénovant complètement, un domaine de recherche traditionnellement en prise directe avec l'activité agricole, qui soit capable d'affronter la compétition scientifique que *de facto* lui propose le monde scientifique des biotechnologies.

Le domaine en question, couvert par les trois départements⁴³, reçoit un nouvel intitulé : non pas « Environnement et Agronomie », qui aurait été un peu trop ouvert pour Jean Mamy, mais « Environnement physique et Agronomie » (EPA), dans une définition étroite de l'environnement, cohérente avec une conception à peine desserrée de l'agronomie *stricto sensu*, dont le domaine d'intervention doit se réduire à l'étude des interactions entre les pratiques et l'eau, les sols et l'atmosphère. « Ce secteur n'était pas appelé à prendre en compte ce qui était biologique (les problèmes de la biodiversité, notamment) parce que ce n'était pas de notre domaine de compétences. J'avais le désir de délimiter strictement notre domaine en précisant ce que nous savions et pouvions faire et en proclamant hautement, pour éviter les malentendus, que les problèmes biologiques et les aspects socio-économiques n'étaient pas de notre ressort. C'est à l'Inra, pris dans son ensemble, de s'en préoccuper »⁴⁴, conclut Jean Mamy.

C'est justement ce qui motive le biologiste Bernard Chevassus-au-Louis (1949-), d'abord conseiller du nouveau président Pierre Douzou, puis directeur général scientifique nommé en janvier 1992 à la place d'Hervé Bichat (1938-2015), dans sa tentative d'acclimater à l'Inra une intelligence plus complète du vivant. Sensibilisé par ses propres travaux sur la faune aquatique et par ses contacts avec le monde associatif, il considère que l'institut ne peut pas en rester à se prévaloir de la continuité de la tradition agronomique française du bon « ménage des champs ». Les urgences de la fin du siècle réclament que l'on révise les objets scientifiques et les échelles d'analyse : les zones humides, les haies, le cycle de la matière organique, le temps long des paysages agraires, notamment. Il saisit toutefois que les enjeux scientifiques se doublent inévitablement d'enjeux organisationnels et hiérarchiques forts, et que s'il « existe une sorte de tradition de recherche environnementale déjà ancienne [...], l'environnement n'a pas d'emblée été considéré comme un thème structurant pour les programmes »⁴⁵. Le problème n'est plus tant celui de la légitimité scientifique des recherches sur l'environnement à l'Inra que celui des

42. Monnier G. *et al.*, 1991. Les recherches dans le secteur milieu physique et agronomie de l'Inra et leur adaptation à une problématique élargie à la préservation de l'environnement. Inra, document dactylographié, 15 p. + annexes, p. 1.

43. Le département de Biométrie a été repositionné dans le secteur des sciences sociales, Sesame, avec les départements d'Économie et de sociologie rurales et SAD.

44. Mamy J., 1999. *Archorales Inra*, tome 3, 37-52, p. 48.

45. Chevassus-au-Louis B., Legrand P., 1990 (octobre). L'Institut national de la recherche agronomique et l'environnement. *Courrier de la Cellule environnement*, 12, 57 p., 1-14, p. 1.

« interrogations [qui] demeurent quant aux programmes, aux méthodes et aux dispositifs »⁴⁶. Bernard Chevassus-au-Louis diagnostique une trop grande dispersion des thématiques et des forces scientifiques qui œuvrent dans le domaine de l'environnement, et pense que la solution réside dans l'élaboration de programmes transversaux à l'institut.

Il charge ainsi Jean-Claude Rémy, qui a rejoint l'École nationale supérieure agronomique de Montpellier (Ensam), d'instruire cette question. Réalisé rapidement, par compilations de documents internes et sur la base d'échanges interpersonnels avec les personnes ressources de la maison Inra, son bilan prospectif se situe pourtant en retrait par rapport aux réflexions incubées par la Cellule environnement de l'Inra. Il révèle certes l'ouverture, mais aussi la prudence des cadres scientifiques de l'institut. De fait, Jean-Claude Rémy en reste à une vision « classique » de la problématique environnementale, restreinte à des questions de nuisances ou de seuils de tolérance. Loin de constituer une rupture, le « développement durable » n'est à ses yeux qu'une réinvention des prescriptions du code rural après une parenthèse de développement accéléré, marquée par des excès regrettables, mais limités et réversibles. Symétriquement, le rapport présente l'agriculture biologique comme une forme de rejet irrationnel de la modernité, même s'il reconnaît aux modèles alternatifs un rôle d'aiguillon pour la recherche agronomique. Cette position défensive témoigne surtout de l'attachement de Jean-Claude Rémy à la finalité agricole, et à la stratégie d'agriculture raisonnée dont il est l'inspirateur par ses propres travaux, avec un très fort écho auprès de Guy Paillotin, dont la présidence est accaparée par le souci de ne pas perdre le contact avec une profession arc-boutée sur une posture défensive face aux mutations sociétales et à la montée de la problématique environnementale.

Cette prudence dans la programmation scientifique peut aussi s'expliquer par une faiblesse de la recherche en écologie appliquée aux systèmes cultivés, dont les méthodologies sont encore à inventer, à l'interface des outils propres de l'écologie, notamment les méthodologies d'approche des populations végétales et animales et de leurs interrelations, et des approches analytiques des pratiques qui sont celles des agronomes. Hormis à Toulouse, où des travaux pionniers ont lieu sur les marges des parcelles cultivées ou sur l'écologie de la prairie et des forêts « paysannes », au sein de l'unité Ursad (département Systèmes agraires et développement), l'Inra se révèle particulièrement faible sur l'approche des facteurs biotiques de la dynamique des espaces cultivés, avec toujours le même problème d'absence d'interlocuteur du côté de la biologie universitaire. Venue de la recherche internationale sur la zone intertropicale, la notion de biodiversité peine encore à trouver ses chercheurs en Europe continentale.

Pour ce qui concerne les recherches conduites au sein de l'Inra, le rapport Rémy leur décerne un *satisfecit* en rapport avec la modération de ses propres attentes : le programme Agrotech, initié en 1989 par Pierre Douzou, sur les alternatives à l'intensification, lui semble une réponse adaptée à la problématique environnementale, malgré une montée en puissance assez lente. Hostile à toute autonomisation de la recherche en écologie, en cohérence avec le souci de la synthèse et de l'application qui prévaut à l'Inra depuis sa création, Jean-Claude Rémy suggère à la direction générale de l'institut de se contenter d'une coordination

46. *Ibid.*, p. 1.

renforcée des recherches sur les objets complexes, comme la maîtrise des couverts végétaux, la gestion des métaux lourds ou la sécurité alimentaire. Cependant, il prône une attitude davantage proactive de la part de l'Inra en direction de la demande sociale, invité à « prendre en charge le *leadership* des recherches relatives à l'interface agriculture-ruralité-environnement »⁴⁷, et à « faire émerger une ingénierie de l'environnement »⁴⁸. En recommandant ainsi de soumettre la question environnementale à une cohérence de type ingénieurial, c'est-à-dire à la fois analytique, didactique et éventuellement prescriptive, le rapport Rémy exprime bien la distance culturelle qui sépare encore l'écologie, science descriptive et holiste, et l'agronomie *sensu lato*, c'est-à-dire l'agronomie comme doctrine politique de l'Inra, archétype des sciences de synthèse finalisées, méfiante vis-à-vis des problématiques incluant trop de paramètres, et en revanche toujours soucieuse d'apporter des résultats robustes et opérationnels aux mondes agricoles et industriels.

La recherche en environnement à l'heure de la ruralité post-agricole

Au milieu des années 1990, la mise en ordre de bataille de l'institut devient des plus urgentes, car « hors de l'institut ou en son sein, la réflexion va bon train »⁴⁹, et sur un mode volontiers conflictuel. Pour Bernard Chevassus-au-Louis, il faut faire le pari de l'unification des forces dispersées, et convaincre le pouvoir politique que c'est à l'Inra qu'il faut confier la recherche sur la thématique de la durabilité.

Les difficultés surgissent en effet de tous côtés sur la question environnementale au milieu des années 1990. La profession agricole, de son côté, est farouchement opposée à toute légitimation de la finalité environnementale au détriment, selon elle, de la finalité productive. Nourrie depuis plus de trente ans par une conception modernisatrice liée aux génies chimique et mécanique, elle est plus que réticente à l'analyse écologique des pratiques agricoles, malgré les effets pervers évidents de l'intensification. De ce côté-ci, le risque de rupture avec une agronomie qui adopterait sans précaution le langage de l'écologie est patent. De l'autre côté, la demande sociale d'environnement est certes capable de s'exprimer sur le mode de la contestation, mais pas encore sur celui d'un soutien fort aux « bonnes pratiques », *via* une propension à payer des consommateurs pour l'achat, par exemple, de produits d'agriculture biologique. Enfin et surtout, l'Inra peut légitimement craindre que l'alarme écologique justifie des coupes budgétaires dans la recherche agronomique, dans une phase où les gouvernements successifs affichent une rigueur renouvelée, sous-tendue par la tendance au rétrécissement du périmètre d'exercice du volontarisme étatique.

Bernard Chevassus-au-Louis, quant à lui, persévère dans son idée de structurer les recherches sur l'environnement autour de grandes thématiques. Il crée en 1993 une Délégation permanente à l'environnement (DPE), confiée à Alain Perrier, pour mener un réexamen en profondeur des compétences de l'Inra et de son potentiel au regard de l'environnement. Le rapport de ce dernier⁵⁰, publié en 1995, s'apparente à une révision au prisme environnemental de toutes les activités concernées par l'agriculture et par l'Inra, des agrosystèmes à la consommation alimentaire et ludique des ressources, en passant par la politique agricole.

47. *Ibid.*, p. 15.

48. *Ibid.*, p. 41.

49. Chevassus-au-Louis B., Legrand P., 1990 (octobre). L'Institut national de la recherche agronomique et l'environnement. *Courrier de la Cellule environnement*, 12, 57 p., 1-14, p. 1.

50. Perrier A. (coord.), 1995 (novembre). L'Environnement à l'Inra. Document broché, 118 p.

C'est sur la thématique de l'eau, que Bernard Chevassus-au-Louis transforme en cas d'école, que cette révision est le mieux opérée. En avril 1992 est créé à l'initiative de Jean Mamy un comité présidé par Charles Riou (1934-), ingénieur agronome qui a fait sa première partie de carrière comme bioclimatologue à l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (Orstom), chargé de mener « une réflexion prospective sur les principaux champs de recherche relatifs à la valorisation et à la protection des ressources en eau »⁵¹. La problématique est déclinée en six grandes thématiques, dans un spectre extrêmement large, où sont abordées aussi bien « L'eau dans le système thermodynamique de la terre » que « L'eau et l'alimentation ». Dans sa préface au rapport final qui est publié en 1995, Bernard Chevassus-au-Louis explicite sa stratégie : « C'est donc, à travers le thème de l'eau, un véritable tour d'horizon des disciplines de l'Inra qui est proposé. Mais au-delà de ce panorama, il convient d'assurer et de renforcer la cohérence de ces diverses approches. C'est le rôle de structures transversales récemment mises en place, comme le comité scientifique "Eau" ou le groupement d'intérêt public (GIP) "Hydrosystèmes". »⁵²

De son côté, Jean Mamy achève l'élaboration d'un schéma directeur 1995-2000 ambitieux⁵³, dont il confie la mise en œuvre concertée aux trois jeunes chefs de département qu'il a fait nommer précédemment. « Il était de plus en plus évident que la présence des trois départements d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol, dans un même secteur scientifique constituait, compte tenu de leur complémentarité, une chance exceptionnelle de développer, sur le moyen et le long terme, un dispositif de recherche, probablement unique dans la communauté scientifique française, sur les relations entre pratiques agricoles et environnement. »⁵⁴ Ainsi, la contradiction originelle entre une approche environnementale et la finalité productiviste s'estompe considérablement : « L'orientation générale, qui devait désormais finaliser la politique scientifique du secteur, fut qu'il était possible d'atteindre des niveaux de production économiquement performants en assurant, par des approches techniques entièrement repensées, le maintien durable des potentialités du milieu, et la préservation des ressources naturelles renouvelables. »⁵⁵ Où l'on voit comment, en ces années 1990, l'Inra traduit à sa manière le concept émergent de développement durable.

► Adapter l'organisation de la recherche agronomique au développement durable (1996-1999)

Au milieu des années 1990, il est acquis que la question environnementale non seulement est appelée à durer, mais plus encore à devenir le pivot des politiques publiques nationales et internationales touchant à la gestion des territoires et des ressources. Dès lors, l'Inra engage une refondation de son socle scientifique et une réorganisation drastique de sa gouvernance, et ce à deux échelles : celle de ses

51. Inra, 1995 (avril). Le thème de l'eau dans les recherches de l'Inra. Annuaire des programmes, des laboratoires et des chercheurs. Document broché, 144 p., p. 7.

52. Chevassus-au-Louis B., 1995 (avril). Préface à : Inra, Le thème de l'eau dans les recherches de l'Inra. Annuaire des programmes, des laboratoires et des chercheurs, 144 p., p. 1.

53. Mamy J., 1994 (novembre). *Environnement physique et Agronomie. Schéma directeur 1995-2000*, Inra, série « Orientation et Organisation », 70 p.

54. *Ibid.*, p. 9.

55. *Ibid.*, p. 10.

propres instances de pilotage programmatique, qui doivent produire une définition de l'environnement cohérente avec la demande sociale et sa prise en charge politique nationale, européenne et mondiale ; et celle des départements de recherche, qui doivent trouver les déclinaisons concrètes de ce concept polysémique, capables de rencontrer les méthodologies scientifiques en essor, notamment la modélisation, à la bonne échelle et sur les bons objets. L'institut connaît dès lors une intense activité de consultation interne, de rédaction de rapports et, sur quelques enjeux sensibles, comme les biotechnologies et les sciences de l'alimentation, de véritables luttes d'appareil, dans une période que l'on peut considérer comme le moment d'une véritable révolution managériale des sciences agronomiques, amenées par le contexte des crises de la vache folle et des organismes génétiquement modifiés (OGM) à intégrer pleinement la dimension sociétale et politique de leur action.

Le nouveau directeur général nommé en 1996 en remplacement de Bernard Chevassus-au-Louis, Paul Vialle, connaît bien l'Inra pour y avoir exercé les fonctions de directeur administratif dans les années 1980. Il entend mener une réforme d'ensemble et, en accord avec le président Guy Paillotin, introduire un principe de prise en compte des attentes et des enjeux sociétaux. Dès la définition des programmes prioritaires de l'Inra en février 1997, le ton est donné : les Actions incitatives sur programme, outils de gestion souple de la recherche, sont considérablement renforcées pour devenir le dispositif stratégique principal de pilotage de l'adaptation des orientations scientifiques des unités de recherche.

La problématique environnementale, pierre angulaire de la réforme de l'Inra des années 1997 et 1998

La réforme de l'Inra telle que conduite par la nouvelle direction affirme avec force le principe de gouvernement de la recherche par la « demande », en posant comme premier le contexte d'émergence des questions de recherche. La société, le marché, les institutions, l'environnement lui-même sont porteurs de sollicitations plus ou moins urgentes, qu'il s'agit de saisir au bon moment et de contribuer à co-élaborer pour ne pas se trouver en situation de carence. Du point de vue de la gouvernance, la question environnementale en particulier constitue un aiguillon très efficace pour maintenir la cohérence et l'orientation finalisée des communautés de chercheurs de plus en plus nombreuses qui constituent la « maison Inra ». C'est donc en fonction de son propre travail d'analyse critique de la demande sociale et des partenariats possibles que la nouvelle direction de l'institut, fonctionnant comme une « agence d'objectifs interne », doit concevoir et doter en postes et en enveloppes financières des axes stratégiques, présentés ensuite aux chefs de département pour concevoir les conditions de leur mise en application. L'environnement, c'est désormais l'horizon de la gouvernance mondiale, une gouvernance qui ne se limite plus à l'agriculture « ménagère » à l'europpéenne, mais qui doit embrasser toutes les figures de la nature anthropisée et tous les aspects de sa gestion responsable.

La réforme n'est toutefois pas acceptée sans résistance par des chercheurs qui perçoivent comme contradictoire la double injonction à l'excellence scientifique et à la finalisation, à la compétition scientifique internationale et à l'assomption de responsabilités éthiques élevées. Après des débats internes et des ajustements structurels, la réforme entre toutefois en vigueur fin 1997, et les nouveaux directeurs scientifiques prennent leurs fonctions non plus dans le système ancien

des directions scientifiques autonomes, mais au sein d'une « direction scientifique collégiale ayant une fonction stratégique marquée »⁵⁶. Avec cette réforme, les directeurs scientifiques ne sont donc plus en charge de champs disciplinaires académiques, mais de grands domaines d'action au nombre de six : Environnement, forêt et agriculture, Société, économie et décision, Nutrition humaine et sécurité alimentaire, Plantes et produits du végétal, Animal et produits animaux, et enfin, transversale à toutes les autres, la Délégation permanente à l'agriculture, au développement et à la prospective.

Les « éléments d'orientation » présentés le 2 décembre 1997 devant le conseil scientifique de l'Inra au titre du nouveau périmètre de la direction scientifique Environnement, forêt et agriculture témoignent de manière éloquent de la place centrale retrouvée par la démarche agronomique au sens élargi. Si c'est l'environnement qui est mis en avant comme « responsabilité de premier plan » pour l'institut, ce sont bien les « enjeux agri-environnementaux » qui constituent le cœur de son programme d'action. Inventorier au-delà des limites étroites de la pensée productiviste, gérer de manière durable, anticiper les évolutions et les crises sont les maîtres-mots du projet.

Le terme « agronomie » n'apparaît certes dans l'intitulé d'aucune des nouvelles directions scientifiques, mais il irrigue de son idéal de science de synthèse appliquée l'ensemble du dispositif. Le métier d'agronome est au reste représenté dans la nouvelle gouvernance par la fonction de directeur scientifique « Environnement, forêt et agriculture » confiée à Jean Boiffin, avec Pierre Stengel comme adjoint. Comme en témoigne le premier, « l'agronomie réussit au passage à "sauver sa peau" en se coulant dans une réforme qui lui permet de se reconstituer discrètement à l'abri d'un département plus vaste au sein duquel elle est moins exposée aux critiques ! »⁵⁷.

La suppression des anciens « secteurs », et donc du secteur Environnement physique et Agronomie, amène tout naturellement à la réunion des trois départements d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol dans un seul nouveau département dénommé « Environnement et Agronomie » (EA). L'agronomie comme discipline y est considérée sinon comme hors-sujet, du moins comme non pertinente en tant que périmètre autonome. Et ce qui apparaissait auparavant comme une faiblesse, la dispersion des agronomes, est désormais présenté comme une force : leur capacité, héritée de leur formation, à faire « liant » autour de questions scientifiques impliquant une forte pluridisciplinarité, contrecarrant ainsi la tendance à l'hyperspécialisation compétitive des sciences globalisées. Pour opérer ce renversement, il a toutefois fallu au préalable restructurer le département d'Agronomie. C'est ce que réalisent Jean Boiffin et Gilles Lemaire autour de trois axes : l'écophysiologie et le fonctionnement des cultures, les effets des interventions culturelles sur les plantes et sur le milieu, et la conception et l'évaluation agronomiques et environnementales des systèmes de culture. Intégrant ainsi les orientations du schéma directeur du secteur, ils permettent l'alliance avec Bernard Itier et Pierre Stengel, avec qui ils partagent désormais la responsabilité de programmer la recherche.

56. Rencontres Direction générale-Départements 1998, Dossier général, Inra, 1998, p. 3.

57. Échanges avec les auteurs, printemps 2018.

L'installation du département Environnement et Agronomie : « concilier production et environnement »

Porté sur les fonts baptismaux dans l'élan de la réforme de 1997, le nouveau département EA est placé sous l'autorité de Bernard Itier. Cheville ouvrière des Assises de bioclimatologie⁵⁸ qui avaient pour but d'analyser les recouvrements et les collaborations scientifiques de son département avec les départements voisins, ce dernier connaît bien les coopérations réelles et potentielles, mais aussi les obstacles à la collaboration au sein du nouveau département. Il doit en effet faire face aux difficultés immédiates d'organiser la rencontre des trois cultures disciplinaires rassemblées et de les entraîner toutes trois vers une recherche finalisée par l'exigence de durabilité des systèmes de culture.

Pour dépasser ces difficultés, Bernard Itier adopte un fonctionnement collégial, en formant une équipe de direction diversifiée, composée initialement de Gilles Lemaire (1945-), ingénieur horticole de formation qui s'est spécialisé très tôt en écophysiologie, discipline qu'il a largement contribué à développer à l'Inra et dans laquelle il est internationalement reconnu ; de Bernard Seguin (1946-), ingénieur agronome spécialiste de bioclimatologie, l'un des premiers chercheurs de l'Inra à avoir compris l'importance du GIEC, qu'il intègre en 2004 ; et enfin de Jean-Claude Fardeau (1937-2014), chercheur en science du sol. Bernard Seguin témoigne de l'état d'esprit qui prévalait alors : « Ce fut une grande aventure, passionnante et enrichissante et dans un esprit de camaraderie qui rendait plus facile l'investissement constant qu'elle supposait. »⁵⁹

Pour la nouvelle équipe, le meilleur moyen de faire prendre l'alliage est de mettre immédiatement les unités au travail sur des projets transversaux, tout en maintenant les collaborations antérieures à la fusion avec les spécialistes de la biologie des plantes, de leur amélioration ou de leur santé. Le chef de département peut s'appuyer sur ses propres troupes des unités de bioclimatologie, qui ont vécu sans crise leur intégration, et qui ont une grande habitude des partenariats extérieurs⁶⁰. De fait, le département EA est l'un de ceux qui comptent le plus d'unités multi-tutelles, aussi bien entre départements de l'Inra qu'avec les universités, le Cirad et bien sûr les établissements supérieurs agronomiques. Au total, quelque 90 enseignants-chercheurs associés enrichissent les effectifs du département, qui compte en 1999 près de 200 scientifiques Inra⁶¹ pour un nombre total de 800 agents, colorant son identité d'une forte dimension pédagogique, mais également d'un idéal de constitution patiente d'un savoir académique tourné vers les mondes de la pratique.

Pour dépasser les anciens clivages disciplinaires, éliminer les redondances entre équipes et repérer les lacunes collectives, et surtout pour créer de nouvelles cohérences thématiques et de nouvelles synergies entre équipes, sont organisés des « chantiers qui ont trait à des objets d'étude écophysiologiques (l'arbre, la prairie...) ou à des thématiques telles que l'agriculture de précision, le travail du

58. Itier B. *et al.*, 1992. « Document préparatoire pour le débat sur le thème Marges et collaborations ». In : *Assises de bioclimatologie*, Obernai, 14-16 janvier 1992, 63-88.

59. Seguin B., à paraître. *Archives Inra*, tome 19.

60. Rapport du chef du département de Bioclimatologie aux membres du conseil scientifique et du conseil de gestion du département, 10 octobre 1997, Inra, document confié par Bernard Itier.

61. Rencontres Direction générale-Départements 98. Environnement et Agronomie, Compte-rendu des discussions, juin-juillet 1998, Inra.

sol, ou encore les pesticides ou les matières organiques des sols »⁶². En parallèle, le département ouvre le chantier de la restructuration des unités, à la fois pour donner plus de cohérence aux différents sites et pour mieux les interconnecter.

Forte des convergences et des réflexions collectives construites au cours des années précédentes, l'équipe de direction du département prépare dans des délais assez brefs un schéma directeur 1999-2003 qu'elle présente à l'été 1998 devant la direction générale de l'Inra. Se référant à la notion de « développement durable », Bernard Itier stigmatise cependant le manque de « rationalité » des débats qui l'entourent, réaffirmant les principes de la construction scientifique des objets. La mission qu'il définit pour son département fixe clairement le bon ordre des choses : « Contribuer à l'étude intégrée du fonctionnement des écosystèmes cultivés, c'est-à-dire analyser les interactions entre l'environnement et la production végétale et, plus généralement, entre l'environnement et l'ensemble des activités agricoles qui sont liées à cette production, en vue de proposer des systèmes de culture durables. »⁶³

Ainsi, la problématique environnementale ne saurait déterminer à elle seule les fronts de science, orienter les recherches et fixer les objectifs scientifiques du département. « L'affirmation de la préoccupation environnementale ne conduit pas à abandonner la problématique de production. Bien au contraire, elle la renouvelle. Il s'agit désormais de produire en situations de contraintes environnementales, biotiques et abiotiques en interaction, plutôt que de choisir la solution de facilité que représentait la recherche d'augmentation de production en se plaçant en situation potentielle du point de vue hydrominéral et phytosanitaire. »⁶⁴ Dès lors, le nouveau département doit développer une approche intégrée des écosystèmes cultivés, dépassant l'échelle et le niveau d'analyse de la parcelle : « La problématique croisée environnement-production étend les gammes retenues, conduisant à accorder une importance accrue aux grandes échelles : spatialement jusqu'au bassin versant, temporellement jusqu'à la dizaine d'années, voire plus. »⁶⁵ Physique, chimie, biologie ne sont plus les « savoirs de base » d'une science appliquée au pilotage des cultures annuelles, mais les constituants d'une science intégrative de l'espace, capable de penser la dimension pluriannuelle des facteurs biotiques, abiotiques et techniques en jeu — même si les enjeux de biodiversité, déjà pointés par Jean Mamy comme trop éloignés des compétences classiques de l'agronomie, demeurent sous-investis en dépit de leur centralité dans les débats scientifiques internationaux.

La fondation de ce nouveau département ne réunifie pas entièrement la discipline agronomie, qui garde des représentants dans le département Sciences pour l'action et le développement (SAD), résolument tournés vers les approches systémiques. Incontestablement toutefois, c'est une nette réévaluation de la pertinence de la démarche agronomique que la création du département EA atteste, de la part d'un exécutif d'établissement soucieux de refonder sur de nouvelles bases le

62. Directoriales 1999. *Rencontres avec le département Environnement et Agronomie*, Inra, Direction générale, 14 p., p. 2.

63. Mission du département Environnement et Agronomie, 1998. « Transparent » pour présentation orale, source Bernard Itier.

64. Rencontres Direction générale-Départements 98. Environnement et Agronomie, Documents préparatoires rédigés par le département EA, juin-juillet 1998, Inra, 39 p., p. 1.

65. *Ibid.*

compromis entre agriculteurs et consommateurs, en positionnant la recherche à la fois en médiatrice et en experte des controverses publiques. Et de fait, le nouveau département est appelé à jouer un rôle majeur dans les expertises collectives promues par la réforme de l'institut, notamment celles qui exigent de concilier impératifs de production et enjeu de la durabilité, au service de la décision publique. « Nous attendons beaucoup de votre part un apport sur la production de normes, la contribution à l'élaboration de règlements et le zonage des régions »⁶⁶, déclare Pierre Stengel lors de la première audition de Bernard Itier par la direction générale.

À la lumière de ces débuts, il apparaît ainsi que le « E » de environnement, placé en tête de l'intitulé du nouveau département, n'indique en rien une sujétion de l'agronomie à un corpus scientifique qui lui serait étranger, mais qu'il vaut essentiellement pour la demande sociale d'environnement, on pourrait même dire pour la demande « systémique » d'un monde sous contrainte, qui attend de la recherche scientifique qu'elle trouve le chemin d'une satisfaction des besoins alimentaires qui ne se fasse pas au détriment de la durabilité des écosystèmes et, de manière croissante, de la stabilité du climat. Reste à passer des intentions aux actes, c'est-à-dire, d'un côté, de la fusion à la mise en synergie des forces scientifiques rassemblées dans le nouveau département et, d'un autre côté, de l'affirmation d'un champ de compétences à son occupation effective, à l'interface des départements voisins et surtout des organismes de recherche nationaux et internationaux qui développent eux aussi des recherches sur l'environnement au tournant des années 2000. S'inscrivant dans un pas de temps bien plus ample que celui de la réforme de l'Inra, ce défi reste celui du présent des chercheurs du département fondé il y a aujourd'hui vingt ans.

► Conclusion

Durant toute la phase antérieure à la crise du « progrès » de la fin du xx^e siècle, force est de constater que la « nature » n'eut pas d'autre statut que celui de stock de ressources potentielles pour les chercheurs de l'Inra, agents d'un institut qui, il faut le rappeler, était perçu comme plus proche du modèle des instituts techniques que de celui des grands opérateurs de recherche, au point d'avoir failli être transformé, à la fin des années 1970, en un « établissement public à caractère industriel et commercial ».

Défini depuis sa création en 1946 comme une institution de recherche « agronomique », il est vrai que jusqu'au seuil des années 1990, l'Inra n'a cessé de jouer de l'ambivalence entre définition étroite de l'agronomie comme discipline technique du domaine des productions végétales, et définition large comme science carrefour du développement agricole, puis de l'innovation agroalimentaire. Les agronomes de métier, pour leur part, ont à la fois souffert de cette ambivalence, volontiers utilisée contre eux par les « disciplines de base » de la recherche sur le vivant, et tiré parti de la plasticité de leur discipline de référence pour s'adapter aux variations internes à l'espace scientifique occupé par l'Inra, dominé dans les premières décennies de l'histoire de l'institut par l'enjeu de l'amélioration des plantes, puis bouleversé à partir du début des années 1980 par les avancées de la biologie moléculaire.

66. Rencontres Direction générale-Départements 98. Environnement et Agronomie, Compte-rendu des discussions, juin-juillet 1998, 9 p. + annexes, p. 5.

Occupant un niveau intermédiaire instable entre les sciences de laboratoire et les sciences sociales, la discipline agronomique dut sans cesse redéfinir son périmètre d'action, tirant tantôt d'un côté et tantôt de l'autre, jouant tantôt de sa propre cohérence et tantôt de sa diversité interne, avec deux atouts pérennes : une forte position dans l'enseignement supérieur spécialisé, et des relations privilégiées avec les mondes de la pratique, bien avant que ces derniers ne soient définis comme une « demande sociale ».

Cette étonnante plasticité du vocable « agronomie » a permis à l'Inra de se faire tantôt le serviteur zélé des politiques publiques liées à la cogestion entre État et profession agricole, et tantôt le garant de l'excellence des biosciences appliquées françaises, mais toujours en subordonnant la définition de l'optimum des milieux cultivés aux critères de leur valorisation en termes de biomasse commercialisable. Notre étude révèle toutefois que ces contradictions seraient sans doute restées insolubles sans l'autonomisation puis le retour en position d'interface de la science du sol d'une part, et l'émergence de la bioclimatologie d'autre part, offrant la possibilité aux sciences des productions végétales de retrouver *in fine* une assise suffisante pour faire entendre leur voix dans les débats transversaux concernant le triptyque agriculture-alimentation-environnement.

La genèse du département EA apparaît ainsi comme bien davantage qu'un simple *aggiornamento* de l'administration des sciences appliquées, un véritable moment de basculement durant lequel les maturations distinctes de la question environnementale d'une part, et de la conversion de l'agronomie et des sciences affines aux approches systémiques fines d'autre part, se rencontrent pour développer une dynamique à la fois scientifique, sociale et politique dont les effets sont loin d'être stabilisés, mais d'ores et déjà tangibles.

Bien difficile, à l'aune de cette histoire, de prédire le devenir de cet univers de recherche « post-disciplinaire ». Ce qui est évident d'ores et déjà, c'est qu'aussi bien l'*ager* que le *nomos* qui se combinaient pour dessiner l'horizon cognitif et pratique de l'agronomie ont été profondément impactés par la dynamique du changement global, le champ cultivé se trouvant désormais connecté à l'environnement dans toute sa complexité, et la définition des « bons principes » de culture se trouvant élargie à la question de la sécurité alimentaire mondiale : il n'y a plus, en théorie, d'externalités neutres aux questions des sciences appliquées aux productions végétales. Sans doute est-ce dans la manière de répondre à ce défi que l'historien peut retrouver la cohérence de longue durée de ce monde scientifique singulier, intimement liée à la dynamique du rapport des sociétés modernes à leurs bioressources, à ses tâtonnements et à ses compromis successifs, et à l'émergence tardive mais irrépressible du concept d'environnement pour en penser la consistance et la soutenabilité.

Remerciements

Plusieurs responsables scientifiques, anciens ou actuels, des départements de recherche dont il est question dans ce chapitre ont apporté leur témoignage et ont parfois fourni des documents inédits. Ils ont également accepté de lire et d'annoter des versions intermédiaires de ce texte afin d'en enrichir les analyses. Si les auteurs seuls assument l'argumentaire qui précède, ils tiennent à remercier très chaleureusement les acteurs de cette histoire qui se sont généreusement et courageusement prêtés au jeu de sa mise en perspective critique. Les auteurs osent croire qu'ainsi, ils livrent au lecteur un récit à la fois mieux informé et toujours distancié sur la genèse du département EA de l'Inra.

CHAPITRE 2

Ambitions, programmation stratégique et productions scientifiques

*Laurent Bruckler, Nathalie Munier-Jolain,
Marianne Le Dref, Bernard Itier, Guy Richard*

La fin du xx^e siècle est caractérisée par la montée en puissance d'une prise de conscience de l'impact majeur des activités humaines, dont l'agriculture, sur le devenir de la planète au travers de questions relatives aux pollutions, au changement climatique, à l'approvisionnement en énergie, aux crises sanitaires, à la sécurité alimentaire... Les systèmes de production agricole se trouvent ainsi régulièrement remis en question, ce qui se traduit par l'émergence affirmée de l'environnement comme objet d'étude légitime au sein de l'Inra, et par une nouvelle organisation de l'établissement qui vise la multidisciplinarité et l'ingénierie au service de la conception et de l'évaluation de nouvelles modalités de gestion des agroécosystèmes.

Le département Environnement et Agronomie (EA) est créé en 1998 pour appuyer ces changements, et se retrouve naturellement aux premières lignes, sans toutefois être le seul : le département SPE est créé la même année. Des collaborations renforcées entre les deux départements se mettront d'ailleurs en place pour définir une stratégie de recherche à l'appui de la protection intégrée des cultures et de l'optimisation de l'utilisation de la biodiversité au service du contrôle des bioagresseurs. Ces deux départements sont à partir de 1998 coordonnés avec les départements Forêts et milieux naturels et Hydrobiologie et faune sauvage (qui seront réunis en 2004 en un seul département, Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques, EFPA) au sein de la nouvelle direction scientifique Écologie des systèmes cultivés et naturels (Econat). La création et le titre de cette direction scientifique traduisent la volonté de la direction générale de l'Inra d'être en capacité de comprendre et d'agir sur le fonctionnement d'écosystèmes plus ou moins anthropisés. La modélisation des agroécosystèmes, qui apparaît dès la création du département EA comme l'une de ses spécificités et l'un de ses atouts, sera réalisée avec le département Mathématiques et informatique. Les collaborations

avec le département d'Économie et de sociologie rurales (aujourd'hui Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement, SAE2) se développent également, par exemple pour évaluer une rémunération des agriculteurs pour des services environnementaux. Le lien avec le département de Génétique et amélioration des plantes évolue pour passer à l'analyse des interactions « génotype-environnement », puis « génotype-environnement-conduite », à la conception d'idéotypes adaptés à la diversité des conditions agropédoclimatiques en s'appuyant sur le couplage de la modélisation et du phénotypage. La diversification des espèces cultivées comme levier de « l'écologisation » des systèmes agricoles est un défi commun avec le département d'Amélioration des plantes, suivant le choix de la direction de l'Inra, au début des années 2000, de restreindre le nombre d'espèces étudiées pour se concentrer sur quelques espèces dites « modèles ». Le département EA travaille également étroitement avec les départements animaliers : liens autour de l'alimentation des animaux d'élevage — qui est un levier d'évolution des productions végétales —, de la gestion des prairies — qui a une place essentielle dans les services écosystémiques —, du recyclage des effluents en agriculture — qui représente un maillon critique du bouclage de cycles biogéochimiques.

Ces grandes évolutions sont programmées dans ce que l'Inra appelle les schémas stratégiques des départements (SSD). Mis en place lors de la réforme de l'Inra de 1998, ces documents formulent les ambitions et les priorités scientifiques pour une période de quatre à cinq années, et identifient les moyens à mettre en œuvre pour les réaliser : définition de champs thématiques, structuration des unités, évolution des compétences, développement d'infrastructures, organisation des partenariats académiques et non académiques, politique internationale. Document à la fois descriptif, prospectif, stratégique et opérationnel, chaque schéma stratégique s'appuie sur une réflexion collective. Ce chapitre présente une analyse diachronique des quatre schémas stratégiques de département qui se sont succédé depuis la création du département EA⁶⁷. L'évolution des ambitions et les visions successives qui les soutiennent sont *in fine* mises en regard avec les évolutions, d'une part, du dispositif de recherche et des compétences scientifiques et techniques et, d'autre part, de la production académique, marqueur de l'impact de la stratégie scientifique.

► Analyse des orientations exprimées dans les quatre schémas stratégiques du département

Le schéma stratégique 1999-2002 : la fondation

Dès 1998, le département EA affirme que sa mission consiste à étudier le fonctionnement physique, chimique et biologique des écosystèmes cultivés, avec pour finalités de contribuer à « gérer durablement l'espace rural en prenant en compte l'ensemble des fonctions et impacts environnementaux des activités agricoles » et à « atteindre des objectifs de production en quantité et en qualité, en optimisant les ressources et les milieux et en se plaçant en situation de contraintes

67. Itier B. *et al.*, 1999. Schéma stratégique 1999-2002 du département Environnement et Agronomie, 42 p. ; Bruckler L. *et al.*, 2004. Schéma stratégique 2004-2008 du département Environnement et Agronomie, 31 p. + annexes ; Richard G. *et al.*, 2011. Schéma stratégique 2010-2015 du département Environnement et Agronomie, 35 p. + annexes ; Richard G. *et al.*, 2016. Schéma stratégique 2016-2020 du département Environnement et Agronomie, Document Inra, 53 p.

environnementales d'origine biotique et abiotique ». Les bases sont posées et, aux évolutions de vocabulaire près, elles seront durables. Dans le premier schéma stratégique du département EA, l'évaluation, la maîtrise, la gestion, la protection, la valorisation puis la conception déclinent les finalités proposées :

- valorisation, gestion et protection des ressources en eau ;
- gestion et protection des sols ;
- évaluation et maîtrise des interactions entre agriculture et composition de l'atmosphère ;
- maîtrise de la qualité des produits végétaux récoltés ;
- maîtrise de la contamination par les polluants des écosystèmes cultivés ;
- aménagement durable de l'espace rural ;
- conception de systèmes de production agricoles durables.

Il s'agit donc non seulement de limiter les impacts négatifs de l'agriculture, mais aussi de produire des outils, méthodes, résultats qui rendent compatible l'activité agricole avec une gestion durable de l'environnement. Les notions d'étude intégrée, d'écosystèmes cultivés, d'interactions entre environnement et production végétale, et de systèmes durables sont déjà présentes, d'où le nom emblématique du nouveau département « Environnement et Agronomie ». Le souci d'assurer une production agricole prenant en compte les contraintes économiques de l'agriculteur demeure prégnant.

Les champs thématiques, au nombre de six, sont marqués par cette nécessité de conjuguer agriculture et environnement. *L'écophysologie végétale*, au-delà de ses missions classiques de compréhension du fonctionnement des peuplements végétaux, doit viser aussi à réduire l'utilisation des intrants nocifs sur l'environnement (azote, pesticides), ou de ceux dont la ressource est limitée (eau, phosphore). *L'écologie du sol et de la rhizosphère* doit notamment décrire les conséquences du fonctionnement de la rhizosphère sur l'activité et la dynamique des populations microbiennes du sol. *Les cycles biogéochimiques* doivent contribuer à satisfaire l'exigence de qualité et de sécurité demandée par les consommateurs et justifient les recherches qui doivent concerner des substances polluantes, ou considérées comme telles, et alimenter le concept de qualité du sol ou les techniques de biodépollution. *L'étude des transferts et de la maîtrise des états physiques du milieu* insiste sur la nécessité de progresser dans le couplage entre transferts et processus biogéochimiques, et précise que l'analyse des échanges (énergie, masse) et des états (propriétés physiques) doit aussi prendre en compte les rétroactions liées aux régulations biologiques. *L'organisation spatiale et le fonctionnement des écosystèmes cultivés* doivent prendre en compte les échanges latéraux en relation avec l'organisation spatiale des cultures, aborder l'échelle du paysage par la prise en compte de la segmentation de l'espace en incorporant les transferts verticaux et horizontaux non seulement de chaleur et de gaz, mais aussi de pollens, spores, graines, particules. Il s'agit bien de rechercher plus systématiquement un traitement plus déterministe du changement d'échelle. *La conception et l'évaluation des systèmes de culture* visent une recherche intégrative et la prise en compte des impacts environnementaux des systèmes de cultures déjà dits « innovants ». L'objectif est annoncé de la conception d'itinéraires techniques et de systèmes cultures qui puissent respecter des cahiers des charges ayant trait à la fois aux aspects économiques de la production et aux aspects environnementaux et sociétaux. Les modèles doivent être génériques afin de prédire les rendements dans des conditions variées de

cultures sous contraintes climatiques et environnementales, d'établir des « bilans environnementaux » des ressources du milieu et des substances à caractère polluant, et d'évaluer les impacts agronomiques et environnementaux de différents choix techniques.

Pour l'essentiel, la jonction entre production et environnement est faite, elle est vue dans les deux sens, et en 1999, l'armature du nouveau département est ainsi construite. Même si les changements climatiques, à l'époque bien moins informés scientifiquement, sont peu explicitement mentionnés, même si le terme de biodiversité n'est pas cité, et si le vocabulaire apparaît parfois daté, l'agronomie systémique est déjà mise en avant, les collaborations et ouvertures disciplinaires avec les autres départements sont posées. Elles se traduisent notamment par la participation à des programmes transversaux mis en place par la direction générale comme Porcherie verte ou Agriculture et développement durable.

Ces orientations amènent à remettre en cause des axes de recherche qui seraient trop déconnectés d'une pertinence environnementale immédiate, ainsi « de travaux consacrés à la caractérisation des minéraux argileux sans un lien fort avec l'étude des éléments traces, ou de travaux régissant l'évapotranspiration et la photosynthèse, ou d'aller beaucoup plus loin dans l'étude de la signification des mesures radiométriques ».

Avant la création de ce département, aucun des départements préexistants ne pouvait prétendre appréhender globalement les questions agroenvironnementales. Dorénavant, la taille du département (environ 800 agents) et l'explicitation de ses missions rendent possibles la conception de problématiques agroenvironnementales globales, puis leur segmentation pour leur prise en charge organisée.

Le schéma 1999-2002 est celui de la fondation scientifique du département pour aborder de nouvelles finalités.

Le schéma stratégique 2004-2008 : la consolidation

En 2004, la problématique environnementale s'élargit au travers de quatre nouvelles finalités dévolues au département :

- prévoir le comportement de génotypes existants ou virtuels dans des scénarios environnementaux évolutifs (contraintes biotiques et abiotiques) ;
- connaître et maîtriser les impacts environnementaux des activités agricoles ;
- mettre au point des systèmes de cultures innovants capables d'assurer des fonctions agronomiques et environnementales spécifiées ;
- contribuer finalement au développement d'une agriculture durable et à la préservation de l'environnement.

Le nouveau schéma SSD veut contribuer à faire émerger des recherches pour et sur l'environnement en tant que tel, s'appuyant sur une vision portée notamment par l'Inra de la « multifonctionnalité » de l'agriculture, sous contrainte désormais de changements climatiques avérés : « Mettre au point des systèmes de cultures innovants capables d'assurer des fonctions environnementales spécifiées » dans un contexte où « il est désormais probable que des changements climatiques importants sont en cours ». L'hypothèse de travail à climat moyen constant semble ainsi définitivement caduque et va de pair avec l'expansion de l'utilisation de simulateurs du climat dans des modèles. Les questions sur la multifonctionnalité de l'agriculture accompagnent la prise en compte de la diversification des systèmes de production et la coexistence de plusieurs types d'agriculture (« raisonnée »,

« intégrée », « avec ou sans OGM », « biologique », etc.) : « La prise en compte de préoccupations environnementales sur de larges portions de territoires (et qui appelle une “agronomie des fonctions non productives et de la gestion de l’espace”) pourrait aller de pair avec une certaine intensification des systèmes de culture dans des zones spécialisées bénéficiant de tous les progrès technologiques (agronomie de précision, plantes à usage non alimentaire ou énergétique, plantes de service issues des biotechnologies par exemple). » La demande pour des usages et des débouchés non alimentaires des productions agricoles s’accroît, de même que l’évaluation multicritère des activités et productions agricoles. La place de la modélisation est croissante, visant une « mathématisation de l’agronomie » justifiée par le besoin en développement d’outils génériques capables de traiter d’interactions nouvelles, incitant ainsi à la simulation de scénarios et à l’exploration de maquettes, virtuelles ou réelles.

Même s’ils passent de six à quatre en marquant des inclusions dans des champs plus génériques, les champs thématiques (CT) restent globalement stables (CT1 : Agronomie systémique et bases biophysiques de la gestion des écosystèmes cultivés, CT2 : Modélisation des plantes et de l’interaction génotype-environnement, CT3 : Fonctionnement des sols, cycles biogéochimiques et écologie fonctionnelle, CT4 : Transferts et échanges de masse et d’énergie dans l’environnement). Globalement, le département EA s’appuie sur la même organisation disciplinaire générale, seuls les objets et les enjeux évoluent progressivement, les champs thématiques étant « adhérents » aux compétences des unités et constituant ainsi toujours un pavage disciplinaire de l’espace de recherche. Le lien de l’écophysiologie à la génétique est renforcé de manière significative, comme le souligne le changement d’intitulé du champ thématique, allant même jusqu’à interroger la place de l’écophysiologie dans le département EA. Un effort de structuration des modèles virtuels et des plateformes informatiques est entrepris, à la fois pour faire face à des finalités de plus en plus larges, interactives, connectées les unes aux autres, et pour faire face à des conditions climatiques et environnementales variables. De manière concomitante à ce renforcement de la modélisation, une amplification de l’acquisition de données massives sur les agroécosystèmes, sur des séries temporelles longues, s’appuie sur le développement d’observatoires et de réseaux de mesures. L’exemple le plus emblématique est le Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS), initié quelques années auparavant mais renforcé dans ses ambitions. Les restructurations engagées avec les autres départements s’intensifient sur différents sites avec le développement d’unités multi-départements, qui va de pair avec la diversité des enjeux et le croisement des disciplines, nécessaire pour prendre en compte des interactions nouvelles.

Le schéma 2004-2008 est celui de la consolidation du dispositif de recherche.

Le schéma stratégique 2010-2015 : l’écologisation

À partir de 2011, une porosité croissante du département EA s’établit avec ses interfaces disciplinaires, notamment avec les autres départements de l’Inra. Il ne s’agit pas tant de modifier les missions que « de mettre en œuvre une approche systémique qui prenne en compte la complexité des problématiques au travers notamment du développement de recherches transversales, de l’intégration de l’ensemble des acteurs de l’agriculture, du renforcement des articulations entre expérimentation et observation, gestion des données et modélisation ».

En 2011, des évolutions thématiques ou des ambitions renforcées apparaissent plus explicitement : les services écosystémiques font leur apparition, de même que la bioénergie ou les premières évocations de l'intensification écologique. La vision devient plus intégratrice, encore plus écologique, l'innovation affecte aussi les méthodes de recherche avec les premières évocations de méta-analyses. On passe progressivement de la production agricole en quantité et en qualité à la sécurité alimentaire globale, à la prise en compte intégrée des paysages et des agro-écosystèmes. Les ambitions sont élargies : l'observation comparative, dans le but affiché de développer des connexions entre différentes disciplines (agronomie, écophysiologie, géographie des milieux) afin de dégager des éléments de typologie et des singularités, côtoie l'intégration devant aborder des interactions entre la plante et son environnement au sein des peuplements et des paysages, voire des territoires. La conception, synonyme de renouvellement de l'ingénierie agronomique, s'appuie maintenant sur des concepts de l'écologie.

Cette appropriation des concepts de l'écologie dans tous ses états — l'écologie fonctionnelle, l'écologie des communautés, l'écologie évolutive, l'écologie du paysage — devient ainsi un des piliers de l'orientation scientifique, allant de pair avec la prise en compte du paysage comme échelle d'étude prioritaire, avec l'apparition d'une nouvelle terminologie dans le champ de l'agronomie (« mosaïques paysagères », « scénarios régionalisés », « évaluation multicritère des agroécosystèmes de la parcelle au paysage », etc.). Au-delà des paysages, les échelles affichées vont jusqu'à « l'échelle globale » pour proposer des scénarios de changements globaux (analyse des cycles des nutriments majeurs) ou pour évoquer l'analyse des impacts écotoxicologiques. Les champs thématiques sont conservés en affirmant leur dimension disciplinaire : Agronomie systémique et ingénierie agroécologique (CT1), Écophysiologie végétale (CT2), Biogéochimie, écologie et physique des sols (CT3), Physique et écologie des paysages (CT4). L'apparition d'« enjeux structurants » (au nombre de quatre) permet de mettre l'accent sur des finalités mobilisant plusieurs champs thématiques avec un élargissement des échelles, des interactions et de la complexité : l'adaptation des cultures aux nouveaux contextes agricoles, l'intensification écologique, la gestion, la protection et la restauration des ressources, le bouclage des cycles de l'azote et du phosphore et le stockage du carbone.

Diversification, changements d'échelle, multifonctionnalité et multicritères, services écosystémiques et intensification écologique sont réaffirmés et deviennent les maîtres-mots : « On perçoit une grande diversification des systèmes de production cherchant chacun à répondre à des cahiers des charges particulièrement étendus. Ceux-ci peuvent inclure les besoins de productions à vocation alimentaire ou non alimentaire (bioénergie, matériaux) avec des critères de qualité diversifiés, la réduction des impacts négatifs sur l'environnement (eutrophisation, perte de biodiversité, transferts de contaminants), la maximisation des services écosystémiques (atténuation des concentrations en GES, pollinisation, gestion des paysages), la moindre dépendance aux intrants (azote, phosphore, produits phytosanitaires, eau, énergie), et enfin l'adaptation aux changements climatiques, tout en maintenant le revenu agricole dans un contexte économique fluctuant. [...] Ainsi, pour le département EA de l'Inra, c'est la question du renouvellement de l'agronomie qui est posée aujourd'hui. »

La période 2010-2015 est celle de l'écologisation de l'agronomie.

Le schéma stratégique 2016-2020 : la globalisation

En 2016, l'agriculture et l'Inra se retrouvent en première ligne dans les principaux agendas politiques : résultats de la COP21, proposition du programme international « 4 pour 1 000 » sur le stockage du carbone dans les sols, débats sur l'alimentation et le lien à la santé humaine, etc. En conséquence, le département EA prend à sa charge des questions relatives à la gestion phytosanitaire (du devenir des pesticides à la (re)conception des systèmes de culture), à la sensibilité croissante aux changements climatiques, au développement confirmé et parfois tendu de plusieurs formes d'agriculture (agriculture biologique, technologique, de ferme, etc.). Le département se veut « multi-acteurs, multi-échelles, multi-performances », les nouvelles technologies doivent s'inscrire elles-mêmes dans une démarche systémique, réunissant d'un côté les principes de l'agroécologie et de la bioéconomie, et de l'autre, toutes les parties prenantes dans le cadre d'une innovation maintenant ouverte.

L'agronomie systémique, la bioéconomie, l'agroécologie, les services écosystémiques, l'adaptation aux changements climatiques sont maintenant des thématiques affirmées. Pourtant, portées chacune par des instances politiques et/ou scientifiques différentes, et se référant à des cadres conceptuels divers, la cohérence entre elles n'est guère explicite. Les orientations à prendre et à soutenir doivent plus que jamais faire l'objet d'une « intelligence collective ».

Les assemblages interspécifiques sont présents comme des variables de conception des systèmes de culture, les interactions sont élargies (interactions « génotype × environnement × conduites »), le phénotypage haut débit devient un outil massivement utilisé par les scientifiques, la biodiversité englobe la prise en compte des bioagresseurs, du biocontrôle, des associations végétales, dans une vision agroécologique maintenant dominante. Les échelles spatiales abordées sont certes encore la parcelle cultivée, mais aussi « ses interfaces avec les parcelles voisines, le paysage et ses aménagements, la région, le pays et la planète », et les échelles temporelles doivent incorporer certes les effets cumulatifs à long terme, mais en tenant compte aussi « des incertitudes, des éventuels points de basculement, des propriétés de robustesse et de résilience » face aux aléas. La priorité donnée à l'agroécologie est elle-même insuffisante, car il faut aussi être à même de prendre en charge des questions de bioéconomie (bioproduits et économie circulaire notamment), des nouvelles technologies et des approches participatives. On interroge le déterminisme de la qualité de la production dans toutes ses dimensions (génétiques et environnementales), en lien avec différents usages et en considérant tous les bioproduits, toutes les possibilités de transformation (fractionnement, extrusion, etc.), en visant finalement un nouveau genre d'idéotype, un idéotype généralisé et multi-usages en quelque sorte et qu'il faut promouvoir pour mieux prendre en charge l'ensemble des services attendus. On cherche à tenir compte de l'ensemble des organismes vivants du sol (organismes micro-méso-macro, animaux et végétaux), à faire le lien avec les services écosystémiques, la fourniture d'eau et d'éléments minéraux, la régulation du climat, le contrôle des bioagresseurs telluriques, et aussi avec les pratiques culturelles. Le rôle de la matière organique lui-même est à revisiter pour mieux argumenter les objectifs de teneur en carbone à atteindre. Le paysage est confirmé comme une échelle indispensable à appréhender, et c'est encore à cette échelle qu'il faut promouvoir des approches encore plus intégrées afin d'identifier

« les antagonismes entre les services attendus pour tous les enjeux relatifs à la gestion des ressources naturelles — sol, eau et air ».

Au-delà de l'agroécologie, les élargissements pour prendre le tournant de la bioéconomie et des nouvelles technologies sont également affirmés, allant finalement jusqu'à la reformulation des missions du département, pour passer du « produire des connaissances génériques et opérationnelles pour gérer durablement les espaces cultivés et atteindre des objectifs quantitatifs et qualitatifs de production agricole » au « produire des connaissances fondamentales et opérationnelles pour le développement d'agricultures multiperformantes dans la durée et pour l'optimisation des services écosystémiques rendus par les espaces cultivés, dans un contexte de changements globaux ». L'objectif de multiperformance impose un renforcement des interfaces avec les autres départements qui conduit à interroger en retour les limites des départements. Tout ceci n'est pas tout à fait étranger à l'apparition et au développement des métaprogrammes, qui ont amplifié un discours de transversalité pluridisciplinaire.

La période 2016-2020 est celle de la globalisation des enjeux et des approches.

► Évolution du dispositif scientifique et des compétences

Évolution du dispositif

De sa création à aujourd'hui, le département EA a vu se modifier la quasi-totalité de ses unités selon plusieurs modalités : fusions entre unités ou portions d'unités, scissions d'unités avec abandon ou non de thématiques pour le département EA, unités placées sous d'autres tutelles que l'Inra (souvent avec un statut d'unité sous contrat, USC), arrêts de rattachement d'unités ou d'équipes, etc. Finalement, en dehors des unités expérimentales, seules deux unités sur les 35 actuelles n'ont pas été modifiées dans leur périmètre. Cependant, malgré toutes ces réorganisations, le nombre d'unités est resté quasi stable, passant de 33 unités en 1998 à 35 en 2016, en particulier du fait de la création d'unités (3) ou de l'association avec des unités déjà existantes sous forme d'USC (4). Enfin, le département EA s'est séparé d'unités ou d'équipes ayant été rattachées à un autre département, en particulier à la suite de la création du département EFPA.

En 1998, environ un tiers des unités de recherche étaient déjà rattachées à plusieurs champs thématiques, deux dans la plupart des cas, ce qui indique que la pluridisciplinarité était déjà à l'œuvre à la fondation du département, puis le nombre moyen de champs thématiques dans ces unités est passé de 2 à 3, marquant un élargissement disciplinaire. Alors qu'en 1998 le département comptait une seule unité pluri-départementale et 8 unités de type unité mixte de recherche (UMR), le paysage de 2018 est transformé avec 17 unités pluri-départementales et 24 UMR (soit les deux tiers environ des unités de recherche), cette évolution formalisant concrètement une volonté d'ouverture explicite. En s'associant avec un autre département ou établissement de recherche ou d'enseignement supérieur, le département EA a choisi de développer une recherche qui croise des approches et des disciplines, et, par là même, qui associe un plus grand nombre de compétences. Les unités pluri-départementales créées sont cogérées par 8 des 13 départements de l'Inra (Phase, SPE, BAP, SAD, Cepia, SAE2, EFPA,

MICA). La plupart de ces associations interdépartementales ne concernent qu'une seule unité, mais en revanche, un lien privilégié avec les départements BAP et SPE s'est progressivement confirmé, essentiellement sur la base de rapprochements disciplinaires de l'écophysiologie et de la génétique, de l'agronomie et de la santé des plantes, venant ainsi conforter les lignes de force d'une stratégie agro-écologique. Au-delà des partenariats traditionnels avec les écoles d'agronomie, ces associations ont aussi concrétisé une ouverture vers le monde universitaire, porteur de disciplines comme la physiologie végétale, l'écologie, les sciences de l'environnement. Des problématiques nouvelles ont également été affirmées par la création d'unités *ex nihilo* — comme ce fut le cas avec l'unité System à Montpellier, consacrée à l'agronomie méditerranéenne et tropicale — ou par la création d'unités sous contrat.

Sur toute la période, le dispositif des unités expérimentales rattachées au département EA a beaucoup évolué : des unités ont été nouvellement rattachées au département EA (Dijon, Mons, Bordeaux), d'autres ont été fermées pour être intégrées à des unités de recherche (Dijon, Avignon), et la plupart de ces unités sont multi-départementales dans un mouvement parallèle à celui des unités de recherche. Cela traduit la volonté de limiter le nombre d'unités de trop petite taille, mais aussi l'investissement du département EA dans des unités expérimentales proches des unités de recherche qui ont elles-mêmes évolué, notamment avec le rapprochement avec la génétique végétale. Enfin, les unités de service sont restées identiques : Laboratoire d'analyses des sols (LAS) et Unité de service et de recherche en analyses végétales et environnementales (Usrave) pour les analyses de sol et de végétaux, Infosol et Agroclim pour les données « sol » et « climat ».

Au total, ces évolutions ont accompagné la progression du caractère multidisciplinaire des recherches au sein du département EA, et elles illustrent l'adaptabilité du dispositif. Elles sont aussi liées aux politiques publiques nationales et aux stratégies régionales qui, depuis deux décennies, n'ont cessé de pousser à la constitution de pôles de recherche et à la restructuration des « sites » scientifiques (UMRisation, contrats de plan État-région, programmes d'investissements d'avenir, etc.).

Évolution des compétences

Le département EA compte près de 800 agents titulaires à sa création en 1998, avec 200 chercheurs et 150 ingénieurs. Le ratio « personnel technique et administratif (AI + TR + AT)/personnel scientifique (DR + CR + IR + IE) »⁶⁸ est alors d'environ 1,2. En 2018, le département compte 700 agents, avec un nouveau ratio de l'ordre de 1,0, cette évolution reflétant une tendance générale à l'échelle de l'établissement de baisse globale des effectifs, et en particulier du corps des AT. Les compétences initiales sont bien sûr celles des trois anciens départements constitutifs du département EA : bioclimatologie, physique, physico-chimie, écologie, écophysiologie, agronomie systémique, etc., avec des compétences marquées en modélisation et en analyse de données. Qualitativement, la montée en puissance des sciences écologiques et environnementales et d'approches plus intégratives a actionné plusieurs leviers simultanément : recrutements sur des compétences

68. AI : assistant ingénieur ; TR : technicien de recherche ; AT : adjoint technique ; DR : directeur de recherche ; CR : chargé de recherche ; IR : ingénieur de recherche ; IE : ingénieur d'étude.

nouvelles, réorientations progressives des thématiques des chercheurs en place (accompagnement en interne, formation permanente, etc.), réorganisation des unités et modifications de leurs périmètres.

En raison de l'évolution des référentiels disciplinaires et de l'incomplétude des mises à jour des évolutions disciplinaires de chaque chercheur, il est impossible d'obtenir des données fiables et consolidées sur toute la période. L'évolution tendancielle des compétences sera donc appréhendée au travers de l'analyse de la production scientifique et de son évolution (voir ci-dessous). En revanche, des évolutions sont vérifiées pour les branches d'activité professionnelle (BAP) des ingénieurs et des assistants-ingénieurs. Par exemple, l'augmentation de l'effectif des assistants-ingénieurs relevant de la BAP « Mesures physiques » (pour atteindre 25 agents) et l'augmentation de près des deux tiers de la BAP « Informatique pour les ingénieurs » (pour atteindre 50 agents) soulignent l'investissement du département et de l'Inra dans la gestion de grands dispositifs d'observation et d'expérimentation et dans le développement informatique (voir chapitre 8).

► Évolution de la production scientifique

De 2002 à 2016, la production scientifique du département EA a augmenté, passant de 296 articles à comité de lecture en 2002, à 432 en 2016, soit 46 % d'augmentation sur quinze ans, soit environ 2,5 % par an. Cette évolution a suivi la dynamique de l'établissement, marquée par une production régulièrement croissante, de l'ordre de 2,5 % par an également, et celle au niveau national : augmentation de 40 % entre 2000 et 2015, soit une croissance annuelle de l'ordre de 2,3 %.

Parallèlement à l'augmentation de la production scientifique, les collaborations internationales se sont multipliées, suivant également les tendances de l'internationalisation de la science. Les relations avec les pays européens, en particulier l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, le Royaume-Uni, la Belgique, la Suède, la Finlande, l'Autriche, la Suisse, ont connu un développement continu. De même pour les grands pays émergents comme la Chine, l'Inde ou le Brésil. L'amplification des copublications avec des pays de la bordure méditerranéenne est également visible, même si elle se ralentit au cours de dernières années. Le département EA a ainsi suivi l'internationalisation de la science vers l'Europe, vers des pays émergents, vers la Méditerranée, même si quelques grands pays scientifiques semblent toujours rester en creux dans les collaborations (comme Israël, l'Argentine ou la Russie). Pour autant, les relations internationales n'ont pas été un élément saillant, ni même très structurant des schémas stratégiques de département. Au-delà de quelques principes généraux, tels que « renforcer l'internationalisation », qui au demeurant n'ont pas été incantatoires, et de quelques initiatives ciblées de coordination, de soutien ou d'animation, il s'agit pour l'essentiel de relations bilatérales créées d'une part par les équipes et d'autre part par les dynamiques scientifiques ou les politiques publiques nationales et internationales, qui conditionnent pour partie la capacité des unités à saisir des opportunités pour bâtir des alliances scientifiques.

Une analyse plus fine de la production de contenus thématiques ou disciplinaires montre des tendances spécifiques de la période 2002-2006 à la période 2012-2016. Ces tendances attestent de la réussite des ambitions affichées dans les schémas stratégiques successifs, même si le « grain » d'une classification selon la

discipline de rattachement des revues peut différer de celui des champs thématiques des schémas stratégiques. On observe ainsi :

- une montée en puissance massive des thématiques environnementales et écologiques (figure 2.1). Alors que l'augmentation globale du nombre de publications sur la période 2002-2016 est de 46 %, les sciences environnementales, l'écologie, l'ingénierie environnementale, les sciences et technologies vertes et durables ont connu des progressions supérieures à 150 % (voire nettement plus). En quinze ans, la visibilité environnementale *sensu lato* est ainsi devenue une évidence, marquée tant par la masse de la production, avec plus de 1 000 publications scientifiques sur la période récente 2012-2016 (soit 47,2 % de la production scientifique totale), que par des progressions relatives très importantes. Certaines de ces progressions correspondent à de véritables émergences presque *de novo*, comme l'ingénierie verte et les bioénergies ;

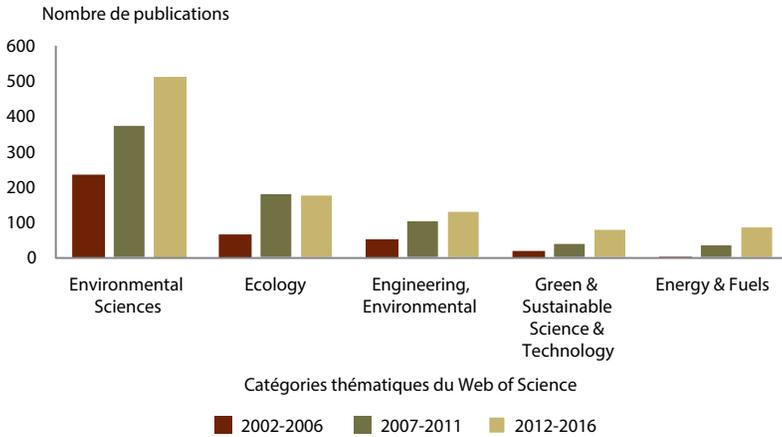


Figure 2.1. Évolution du nombre de publications en fonction de l'appartenance de la revue à au moins une discipline environnementale.

- des progressions très significatives pour des disciplines au caractère « multi-disciplinaire » ou « d'interface », et plus largement pour des disciplines qui rapprochent des frontières ou qui mélangent des compétences (figure 2.2). Là encore, les progressions sont parfois très largement supérieures à la progression de la production globale, par exemple 72 % en agriculture multidisciplinaire ou 1 200 % en sciences multidisciplinaires. La prise en compte d'interfaces disciplinaires et le brassage progressif des compétences sont donc devenus une réalité, amplifiée et promue sans doute par une généralisation massive d'appels d'offres à des projets de recherches imposant l'interdisciplinarité comme critère de sélection ;
- une visibilité croissante de productions scientifiques faisant référence à une composante applicative en termes de méthodes, d'outils ou d'impacts (figure 2.3). La volonté de servir des finalités, de produire « une science pour l'impact », de rénover l'ingénierie agronomique, est donc largement perceptible, en particulier dans les domaines des biotechnologies et de la microbiologie appliquée, de la télédétection ou de l'ingénierie agronomique, qui montrent des progressions largement supérieures à 50 %.

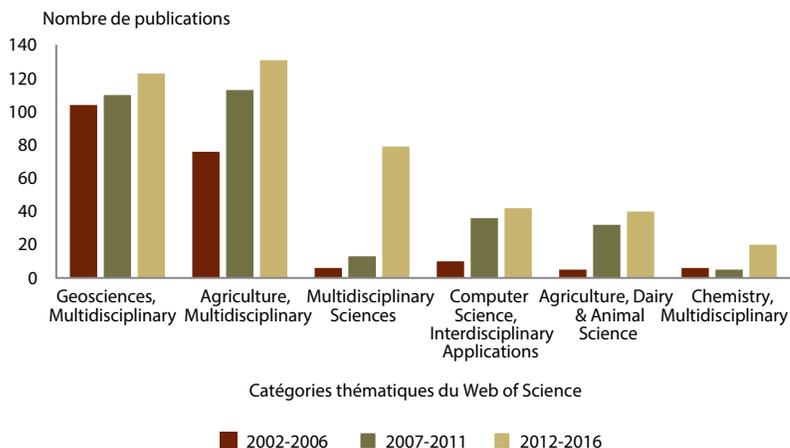


Figure 2.2. Évolution du nombre de publications en fonction de l'appartenance de la revue à au moins une « discipline multidisciplinaire ».

Parallèlement à ces progressions, parfois spectaculaires, des tendances inverses sont observables :

- une stabilité quantitative des domaines ou disciplines de recherche constituant le cœur de métier initial du département, telles les sciences des plantes, l'agronomie, les sciences du sol, les ressources en eau ou bien la météorologie et les sciences de l'atmosphère. Tout en restant massives pour certaines en valeur absolue, ces disciplines fondatrices du département, avec des progressions de l'ordre de 10 % de publications au maximum, indiquent bien une dynamique de décroissance relative par rapport aux domaines liés à l'environnement ;
- une diminution, combinée à une faible importance en valeur absolue, des publications de domaines scientifiques et de compétences correspondant aux sciences

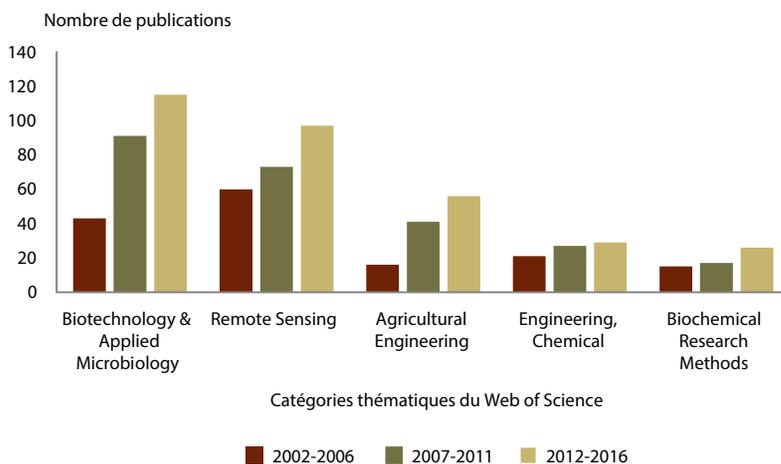


Figure 2.3. Évolution du nombre de publications en fonction de l'appartenance de la revue à au moins une discipline d'ingénierie.

les plus analytiques. En géochimie et géophysique, en sciences et technologies alimentaires, en biochimie et biologie moléculaire et en chimie en général, la production du département devient ainsi résiduelle et en extinction, avec des diminutions de l'ordre de 10 à 50 %.

Au total, l'analyse des revues dans lesquelles les scientifiques du département EA ont publié au cours de la période 2002-2016 indique une montée en puissance des thématiques environnementales et écologiques, des productions multidisciplinaires, d'interface, ou faisant référence à l'ingénierie et aux applications, une stabilité quantitative des productions caractéristiques du cœur de métier initial du département, et une diminution, voire une extinction des productions issues des sciences les plus analytiques ou les plus marginales. Ainsi l'augmentation globale de la production académique s'est bien opérée sur une différenciation croissante affirmée en écologie et en environnement à partir de compétences nouvelles ou réorientées, et appliquées à la prise en charge de l'environnement comme finalité à part entière, et non pas seulement comme coproduit de recherches axées sur la production. Elle s'est également accompagnée d'une forte implication des scientifiques du département dans les opérations d'expertise scientifique collective mises en place à l'Inra à partir du début des années 2000. Ces expertises sont le fruit du potentiel d'analyse multidisciplinaire des agroécosystèmes permise par l'ensemble des compétences regroupées au sein du département EA.

Une analyse complémentaire des mots-clés peut permettre de décrire l'évolution des thèmes ou objets étudiés (figure 2.4). Ainsi, les nuages de mots réalisés sur les périodes 2002-2006 et 2012-2016 illustrent la montée en puissance des thématiques environnementales, écologiques, climatiques ou systémiques, avec l'apparition ou la croissance de mots-clés révélateurs comme « agroécologie », « biodiversité », « changement climatique », « sécheresse », « cycle de vie », « agriculture biologique », « pesticides et gaz à effet de serre ». La progression

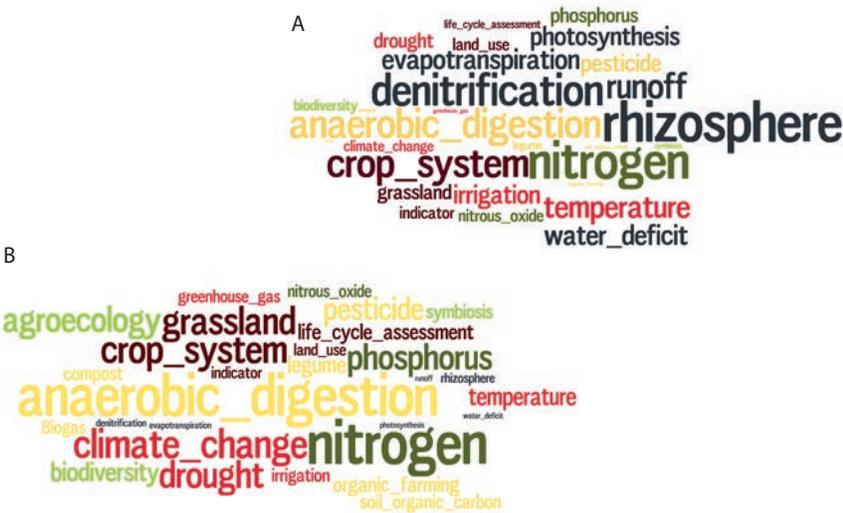


Figure 2.4. Nuages d'une sélection de mots-clés sur les périodes 2002-2006 (A) et 2012-2016 (B), réalisés avec Wordle.

d'occurrences de ces mots-clés est largement supérieure à 100 %, dépassant la progression moyenne du nombre d'articles sur la période. *A contrario*, et en illustration de réduction de recherches plus analytiques ou centrées sur des processus précis, certains mots-clés s'estompent comme « évapotranspiration », « ruissellement », « dénitrification », « déficit hydrique », « rhizosphère » ou « photosynthèse ». Enfin, un cœur de métier stable reste visible, symbolisé par quelques marqueurs tels que « système de culture », « azote » ou « digestion anaérobie ».

► Conclusion

Les évolutions de la communauté de travail (unités, compétences) et de la production scientifique, la contribution aux expertises scientifiques, sont cohérentes avec les ambitions stratégiques du département EA, allant progressivement vers des recherches plus environnementales, plus intégrées, plus interdisciplinaires. *A contrario*, le mouvement vers une intégration plus forte n'a pas abouti à la disparition de compétences à caractère monodisciplinaire, comme certains pouvaient le redouter à la création du département. Finalement, c'est bien une nouvelle communauté scientifique qui a été constituée et qui est par ailleurs assez originale dans le contexte international. Elle a su également s'adapter à l'évolution des modalités de financement de la recherche et à la mise en place généralisée d'une recherche conduite en mode « projet ». Elle s'est aussi fortement mobilisée dans l'évolution du système de recherche et développement agronomique français dans son ensemble.

Ces observations appellent cependant un questionnement : la création du département EA et ses quatre schémas stratégiques successifs ont-ils initié et anticipé ces changements ? Ont-ils suivi et accompagné ces changements ? Ou enregistré et formalisé ces changements ? Les ont-ils amplifiés ? Probablement un peu tout cela en même temps, car les évolutions scientifiques dépendent, de façon multifactorielle, de facteurs à la fois externes (agendas internationaux, politiques publiques, évolutions tendanciellelles sociétales, etc.) et internes aux communautés scientifiques elles-mêmes. Les schémas stratégiques ont en tout cas contribué à assimiler ces évolutions globales, à les formaliser, à les instruire et à les discuter sur la base de connaissances, de méthodes et de concepts scientifiques, à les partager au sein d'une communauté de travail multidisciplinaire. Le département EA en tant qu'organisation collective a ainsi été en mesure de créer des interactions, de combiner des ambitions stratégiques avec des décisions opérationnelles, de promouvoir des évolutions tendanciellelles qui se sont révélées être de véritables ruptures.

CHAPITRE 3

Un positionnement international original pour l'agronomie

Gilles Lemaire

Le même terme est utilisé avec des sens différents dans le monde francophone, « agronomie », et dans le monde anglophone, *agronomy*, et recouvre donc des domaines scientifiques et institutionnels non concordants. Il importe de revenir aux concepts et paradigmes fondateurs de cette discipline, ou de cet ensemble de disciplines qu'elle mobilise, pour voir en quoi la persistance, en France, du terme « agronomie » dans l'organisation de la recherche, notamment à l'Inra et, surtout, dans la dynamique du département Environnement et Agronomie (EA), a joué un rôle dans l'originalité ou la spécificité de l'approche française par rapport à celles des autres acteurs internationaux.

Selon l'étymologie, le terme « agronomie » se réfère à l'ensemble des règles (*nomos*) qui doivent régir la conduite du champ cultivé (*ager*). Il s'agit donc des études concernant la conception et la mise en œuvre de pratiques agricoles sur un espace déterminé, du champ à l'exploitation, dans le but d'en obtenir une production donnée. Un autre terme aurait pu être utilisé, « agrologie », qui aurait alors correspondu à la science du champ cultivé afin d'étudier les lois (*logos*) qui en régissent le fonctionnement. En réalité, ce deuxième terme ne s'est pas imposé, ni en français, ni en anglais, laissant une forme d'ambiguïté dans le sens du terme « agronomie ». Cette distinction sémantique entre *nomos* et *logos* permet de distinguer deux grands pôles de questionnements scientifiques : comment organiser et gérer l'activité de production agricole de manière cohérente en vue d'objectifs déterminés dans un contexte donné ? Et comment comprendre les processus mis en jeu afin de mieux les maîtriser ? En français, du fait de la prédominance de la formation d'ingénieur, le terme « agronomie » a recouvert en priorité la partie *nomos*, tout en permettant à la partie *logos* de se développer dans toutes les disciplines scientifiques associées (pédologie, science du sol, bioclimatologie,

physiologie végétale, génétique, etc.), le tout synthétisé dans le titre « ingénieur agronome » qui s'est imposé rapidement à l'ensemble de l'activité agricole, bien au-delà du seul champ cultivé (prairies, élevage, transformation des produits, etc.), dénotant ainsi la suprématie de la vision *nomos* par rapport à la vision *logos*. Dans les pays anglo-saxons, les disciplines académiques se sont davantage émancipées de la tutelle de l'*agronomy*, qui est restée plus restreinte à l'activité *engineering* comme une discipline parmi les autres. Entre ces deux ensembles distincts, le monde francophone et le monde anglophone qui s'interpénétraient peu du fait de la barrière de la langue jusqu'à une période récente (1970-1980), il existait cependant un certain nombre de pays, notamment latins et latino-américains, dans lesquels l'organisation de type française, basée sur l'ingénieur agronome et une conception plus transversale de l'agronomie, s'était développée (Espagne, Italie, Argentine, Brésil...), mais ce modèle d'organisation de la recherche et de la formation a vite évolué vers le modèle anglo-saxon du fait de la prédominance de la langue anglaise et des structures académiques universitaires.

► Une approche française de l'agronomie

La persistance d'un département d'Agronomie au sein de l'Inra et de chaires d'agronomie au sein des écoles d'ingénieurs a permis à la recherche française de garder une forte hybridation entre les recherches sur l'activité agricole et les recherches pour la compréhension des processus sous-jacents. Cette hybridation a favorisé le développement d'un ensemble de concepts originaux concernant la conception et la mise en œuvre des systèmes de production dans lesquels les pratiques des agriculteurs sont prises en compte comme un objet d'étude à part entière. Basée sur les observations *in situ*, le diagnostic et l'analyse des pratiques, cette approche « clinique » de l'agronomie a débouché sur les concepts emboîtés d'itinéraires techniques, de systèmes de culture et de systèmes de production. Ces concepts, qui se réfèrent à des niveaux de décision et d'action hiérarchisés et emboîtés, ont donné lieu non seulement à des analyses théoriques et à des études empiriques, mais aussi à des actions de développement ou de recherche-développement. C'est ainsi qu'ont été jetées les bases d'une véritable école française d'agronomie, sous l'impulsion de Stéphane Hénin puis de Michel Sebillotte et leurs élèves. Cette école française, qui se développe dans les années 1970 et 1980, se dégage d'une vision purement normative et prescriptrice de l'agronomie pour entrer plus fortement dans le domaine de la science. Elle a largement diffusé dans les pays francophones, notamment *via* la formation des agronomes du Cirad et de l'Institut de recherche pour le développement (IRD). Ces concepts se sont aussi diffusés dans certains pays latino-américains grâce à des actions de coopération bilatérales. Pourtant dynamique sur le plan scientifique et ayant essaimé sur le plan international, cette école française est restée cantonnée, pour l'essentiel, au monde francophone. Faute d'avoir été diffusée par des publications en langue anglaise, elle s'est *de facto* tenue à l'écart des confrontations et des débats, des instances et des réseaux, qui évaluent et valident la production de connaissances scientifiques selon des normes internationalement reconnues. Dans les années 1960 et jusqu'aux années 1980, la langue anglaise, devenue la langue scientifique internationale, a constitué une barrière redoutable pour diffuser des concepts, certes fructueux mais pensés en français et conçus à l'aune de situations françaises.

En France, ces concepts ont servi de cadre à la reconfiguration du département d'Agronomie de l'Inra lorsque, en 1973, il s'est séparé de sa branche Science du sol, qui a été constituée en département de recherche autonome. Une grande partie de ces concepts ont trouvé une application en synergie avec les sciences sociales et les sciences de la gestion lors de la création du département SAD, en 1979, dans lequel bon nombre d'agronomes se sont investis. Cette synergie a été et demeure une spécificité française assez forte, même si elle est aujourd'hui reconnue sur le plan international, notamment dans la communauté scientifique des *farming systems*.

► L'écophysiologie, une contribution française forte et reconnue

L'écophysiologie végétale, qui vise à étudier les processus par lesquels les plantes et les peuplements végétaux interagissent avec leur environnement, s'est développée en France comme une branche de l'écologie fonctionnelle au CNRS-CEFE (Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive) de Montpellier dans les années 1960-1970 (entre autres les travaux de Eckart, Saugier, Warembourg). Dans le même temps, le département de Bioclimatologie de l'Inra mettait en œuvre une approche thermodynamique du fonctionnement des couverts végétaux cultivés à partir des travaux pionniers de Philippe Chartier et autres collègues sur l'étude des flux du carbone (C) et de l'eau (H₂O).

Une convergence a eu lieu entre de ces deux courants de recherche, considérant le fonctionnement du continuum sol-plante-atmosphère du point de vue des échanges de masse et d'énergie, au sein duquel les fonctions de régulations biologiques étaient assimilées à l'analogie de « résistances ». Cette convergence a permis l'étude de la dynamique d'élaboration de la production primaire des écosystèmes et des peuplements cultivés en fonction de facteurs du milieu local du sol et du climat ; et en retour l'étude de la modification de ces mêmes facteurs du milieu par le fonctionnement même des couverts végétaux. Cette approche a abouti entre autres aux concepts d'*efficacité de conversion énergétique* des couverts végétaux selon l'approche de Monteith (1972) et d'*efficacité d'utilisation de l'eau*, qui ont été à la base de la modélisation du fonctionnement des cultures. Dans la même période (1970-1990), dans le département d'Agronomie d'alors, l'écophysiologie a développé une approche de la dynamique de la nutrition N et minérale des peuplements végétaux, basée sur le concept de « dilution de N ». Ce concept renforce l'approche fonctionnelle en couplant les flux de C, N (puis P, K, S, etc.) et H₂O dans un même formalisme. L'écophysiologie a ainsi contribué, à travers les études de fonctionnement des couverts végétaux, à aborder le problème essentiel du couplage entre les grands cycles biogéochimiques, C, N, P et H₂O, qui sont à la base non seulement de la production primaire des couverts végétaux, mais aussi des émissions dans l'environnement. Par ailleurs, l'écophysiologie a développé une approche de la morphogenèse des plantes, c'est-à-dire de la dynamique d'élaboration et de la mise en place des différents organes et de leur croissance. Cette approche, associée à celle des flux de C, N, minéraux et H₂O, a permis de concevoir des modèles de fonctionnement dynamique des plantes et des peuplements explicitant les boucles de rétroactions existantes entre la capacité d'acquisition des ressources C, N, minéraux et H₂O, et la capacité d'utilisation de ces ressources dans la croissance, traduisant les propriétés d'auto-adaptation des plantes et des

peuplements aux modifications du milieu. Les convergences entre les départements d'Agronomie et de Bioclimatologie dans ce domaine de l'écophysio­logie (voir la Charte de l'écophysio­logie⁶⁹) ont largement anticipé et préparé la création du département EA en favorisant enfin un réel couplage entre les cycles C-N-P et H₂O et une approche intégrative du fonctionnement des couverts végétaux. Cette approche s'est étendue naturellement au domaine des forêts. L'écophysio­logie en France s'est développée en gardant des attaches conceptuelles fortes avec l'écologie fonctionnelle, ce qui lui a permis de faire plus facilement le lien avec l'étude des cycles biogéochimiques et les problématiques environnementales. Ce faisant, l'intégration de l'écophysio­logie dans le nouveau département EA l'a ouvert aux problématiques environnementales en les intégrant de manière fonctionnelle aux pratiques agricoles. La contrepartie de ce rapprochement a sans doute été un plus grand éloignement de l'écophysio­logie avec les domaines de la biologie, de la physiologie et de la génétique végétale, qui a nécessité d'autres formes de collaborations. L'écophysio­logie à l'Inra s'est trouvée sans doute parfois écartelée entre ces deux pôles. Il s'agit là d'une originalité et d'une force de l'approche française de l'écophysio­logie en comparaison de ce qu'il est convenu d'appeler *crop physiology* dans l'univers anglo-saxon, dont les modèles sont plus centrés sur les performances productives des cultures avec un lien sans doute plus affirmé avec les objectifs de *plant breeding*, alors que les modèles de fonctionnement de culture produits en France (voir chapitre 9) apparaissent beaucoup plus interfaçables avec les modèles biogéochimiques pour l'étude des impacts environnementaux des systèmes de culture. À cet égard, la création du département EA a favorisé en quelque sorte l'inclusion des domaines de la science du sol dans l'approche en écophysio­logie, permettant justement d'aboutir à des modèles plus globaux et davantage pluri-fonctionnels que les modèles équivalents anglo-saxons.

► Le vertueux couplage de l'agronomie et de l'environnement : une ambition internationale

L'intitulé « Agronomie » pour désigner les contours scientifiques et organisationnels d'un département de l'Inra, et son association au terme « d'environnement », constituent à la fois une originalité et un atout par rapport à l'ensemble des organisations de recherche de par le monde qui se sont structurées sur le modèle anglo-saxon. Explicitement focalisée sur la conception, l'évaluation et la mise en œuvre des règles de conduite des agroécosystèmes, l'agronomie n'est plus seulement guidée par la « boussole » de l'efficacité de l'action productive, à quelque niveau que ce soit, mais aussi par l'objectif d'un développement soutenable de la production agricole, prenant en compte l'environnement à la fois comme condition et comme produit du fonctionnement de ces systèmes. La cohabitation entre des unités de recherche et des chercheurs individuels formés dans le cadre des concepts de l'agronomie avec des chercheurs et unités structurées autour des grandes problématiques environnementales relatives à l'eau, aux sols, à l'atmosphère et à la biosphère, et les synergies qui peuvent en résulter apportent des opportunités d'analyse scientifique aux interfaces disciplinaires. C'est notamment le cas entre physico-chimie et biologie des sols pour la gestion de la disponibilité

69. Inra, 1989. *Charte de l'écophysio­logie*, 16 p.

des éléments nutritifs dans les sols, ou entre les domaines des signaux physiques (lumineux, mécaniques) perçus par les plantes et leur traduction en réponses biologiques, pour prendre des exemples d'avancées récentes en photomorphogenèse ou en tigno-morphogenèse concernant des domaines ignorés jusqu'alors, mais essentiels dans la compréhension de certaines propriétés émergentes des peuplements végétaux. Cette organisation de « grand écart » entre la « biologie » et la « biogéochimie » se traduit-elle par un avantage réel, en ce qui concerne la production scientifique notamment, par rapport à des pays qui ont concentré leurs structures de recherches en *crop physiology* en l'interfaçant davantage avec la biologie et la génétique qu'avec les structures de recherche du domaine de l'environnement ? Même si seule une analyse bibliométrique apportait une réponse fine, on peut néanmoins affirmer que la recherche française en général et le département EA en particulier sont bien positionnés sur ces domaines. Cependant, malgré l'excellence des productions scientifiques, il reste nécessaire d'accroître le volontarisme international pour investir davantage les comités d'édition, les groupes de travail internationaux et les consortiums de projets internationaux pour devenir plus visible à l'échelle institutionnelle.

Environnement et agriculture : un terrain pour l'expertise scientifique

Pierre Stengel, Bertrand Schmitt

► L'expertise scientifique au service du savoir commun et de la décision collective

La montée de l'exigence de crédibilité

L'expertise des chercheurs et des institutions scientifiques en appui à la décision publique a toujours été sollicitée. Ceci est particulièrement vrai dans les domaines de la recherche finalisée, et l'Inra a ainsi été constamment concerné depuis sa création. Exercée de manière *ad hoc*, suivant des règles et des objectifs variables selon les sujets, les motivations et les commanditaires, le plus souvent à titre individuel, l'expertise de l'Inra et de ses chercheurs est longtemps restée diffuse et multiforme. Elle n'a pas fait l'objet d'un engagement organisé et codifié jusqu'à la fin des années 1990.

Ces années voient s'amplifier à la fois une demande d'expertise liée notamment aux problèmes sanitaires ou aux controverses sur les innovations génétiques, et une profonde (re)mise en cause de l'expertise technico-scientifique. De lourdes erreurs appuyées sur des dires d'experts et la révélation de conflits d'intérêts sous-jacents à des conclusions de certains experts jugées fortement tendancieuses, ont entaché la crédibilité de l'expertise et de son fondement scientifique, tout comme la réputation des experts et leur impartialité. Cette remise en cause émerge à un moment où, justement, le travail d'instruction des problèmes et l'évaluation des effets positifs et négatifs des activités humaines et de leurs évolutions étaient le plus nécessaires pour éclairer la décision publique et nourrir le débat public. On peut rappeler, à titre d'exemples, la crise de l'amiante, Tchernobyl ou la crise de la vache folle. Le rejet radical en France, et plus largement en Europe, des semences OGM en est, au moins en partie, une manifestation.

Dans ce contexte, les modalités du fonctionnement démocratique ont dû être reconsidérées, le débat sur des bases objectivables étant une composante essentielle de sa recomposition. La restauration de la crédibilité de l'expertise scientifique, jusqu'ici considérée comme acquise, s'affirme alors comme une ardente obligation. Il s'agit de rétablir la légitimité de la recherche à introduire, dans les débats qui « agitent » la société, un état des connaissances scientifiques acquises, incertaines ou manquantes de la façon la plus neutre, impartiale ou objective possible. La remise en cause de la légitimité de la science à intervenir de la sorte dans les débats, processus qui se prolonge aujourd'hui sous des formes renouvelées, menace l'hypothèse de rationalité partagée comme support des débats démocratiques, et la place de la science comme voie privilégiée d'accès à la connaissance du monde.

L'Inra en première ligne

Acteur important de la première révolution verte, celle de la montée en puissance d'une agriculture hautement productive, l'Inra a été et est toujours associé à ses impacts négatifs par une partie de l'opinion. Partenaire des acteurs de l'encadrement technique de l'agriculture et des industries de l'agrofourmiture (génétique et chimie, particulièrement), il est suspecté de conflits d'intérêts et, en tout cas, de soumission à la pensée dominante d'un de ses ministères de tutelle, celui de l'Agriculture. Attester qu'il fournit des connaissances robustes, qu'il est en capacité d'en expliciter les limites, qu'il œuvre pour limiter les surinterprétations toujours possibles, est une condition essentielle pour nourrir une évaluation fiable en mesure d'éclairer une décision « en toute connaissance de cause ». Tel est le défi auquel l'Inra a été confronté au tournant du siècle et auquel il continue à être confronté.

Situer l'agriculture dans un champ de questionnements considérablement élargi par les problématiques relatives à l'environnement, à l'alimentation et au territoire implique l'ouverture des cibles traditionnelles des recherches de l'institut. De la sphère agricole et agro-industrielle, les finalités s'étendent désormais aux décideurs publics et privés non agricoles, au monde associatif, aux médias, à l'enseignement général, bref à la société dans son ensemble, désormais concernée par des enjeux qui l'affectent lourdement et collectivement.

Il ne s'agit plus seulement de fournir des inventions efficaces pour produire plus ou mieux, mais aussi de comprendre et d'évaluer les risques collectifs ou les perspectives de progrès, concernant les enjeux relatifs à l'agriculture, à l'environnement et à l'alimentation. Parallèlement à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) et avec l'ambition de faire référence, l'Inra a voulu donner les garanties les plus strictes contre les suspicions de partialité et d'incomplétude scientifiques, en s'engageant au début des années 2000 dans l'élaboration de protocoles d'expertise codifiés.

L'expertise collective et ses règles méthodologiques

L'Inra, tout comme l'Inserm, définit alors ses exigences méthodologiques et épistémologiques en s'inspirant des standards internationaux, et les traduit dans une « Charte de l'expertise » qui a depuis été diffusée auprès de l'ensemble des organismes de recherche français. Il crée une équipe dédiée à l'expertise dont les principes directeurs sont compétence et indépendance des experts, pluralité des angles de vue, neutralité des conclusions et publicisation des résultats.

L'expertise scientifique doit être collective. En effet, l'objectivité peut difficilement être atteinte ou approchée individuellement ; elle nécessite la pluralité des entrées disciplinaires et la pluralité des angles de vue portés par un collectif diversifié. Les modalités de choix d'experts qualifiés, spécialistes reconnus de différentes disciplines et provenant de différentes institutions, et la méthode de travail privilégiant une reprise systématique de la littérature scientifique existant et organisant, *via* le débat, la critique mutuelle, sont clairement posées. De même, les procédures assurent un traitement aussi exhaustif et aussi peu biaisé que possible de la littérature publiée dans des supports académiques internationaux.

L'indépendance doit être affirmée sur le plan individuel, c'est le rôle de la déclaration individuelle des liens d'intérêts potentiels. Elle doit l'être aussi sur le plan collectif, par l'analyse de l'équilibre, au sein du collectif d'experts, des engagements et des postures des experts individuels. Elle est enfin indispensable d'un point de vue institutionnel, tant vis-à-vis du commanditaire de l'expertise que de l'autorité hiérarchique responsable des experts, c'est-à-dire les directions générales des organismes de recherche mandatés. Ces directions générales se doivent d'apporter une réponse à cette double attente : elles s'engagent, d'une part, envers le commanditaire comme interlocutrices responsables de l'exécution du cahier des charges de l'expertise et, surtout, du respect de ses exigences méthodologiques et, d'autre part, vis-à-vis des experts sur cette unique fonction. Ainsi, la direction générale de l'Inra a renoncé à tout contrôle des contenus et des conclusions, sous réserve que ceux-ci soient scientifiquement étayés et opposables.

Enfin, pour être en capacité de répondre aux inévitables mises en cause, la procédure assure traçabilité et transparence, notamment au sujet de résultats ou d'interprétations divergentes et d'absences motivées de référence à certaines sources. Produire une expertise reconnue ne peut d'ailleurs suffire à assurer un rôle nouveau pour l'Inra et les organismes de recherche. Il est également nécessaire d'en garantir le caractère totalement public. Les moyens en sont l'adaptation des supports à différents lecteurs, un colloque largement ouvert et laissant une grande place aux débats, la présentation anticipée aux « parties prenantes » intéressées, la participation aux débats que les résultats pourraient susciter au-delà du colloque de restitution.

► L'engagement du département dans les expertises collectives de l'Inra

Environnement et Agronomie, un département pionnier

Conséquence des discussions internationales relatives à l'application du protocole de Kyoto, la première Expertise scientifique collective (ESCo) commandée à l'Inra par le ministère en charge de l'Environnement porte sur la perspective de stocker le carbone dans les sols de France comme moyen d'améliorer le bilan national des émissions de GES⁷⁰.

Elle mobilise principalement les compétences du département EA sur les sols. Elle est le support de mise au point des règles procédurales, dont celle de la

70. Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.-F., Stengel P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, Inra (France), 32 p.

pluridisciplinarité, en particulier avec les sciences économiques. Dans un contexte qui, à ce moment-là, ne soulève pas d'enjeu sociopolitique aigu, elle permet d'appliquer ces règles sans pression forte. Leur acceptation par les chercheurs experts et par le commanditaire assure le succès qui fonde ainsi dès 2002 l'inscription des ESCo comme offre d'activités de l'institut.

Une étape fondatrice, l'expertise Pesticides

Alors que les questions relatives aux risques induits par l'usage des pesticides prennent une acuité accrue aux niveaux européen et national, la direction générale de l'Inra propose aux deux ministères directement impliqués, les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement, la réalisation d'une ESCo sur le modèle mis en œuvre au sujet du carbone du sol. Il en résulte une commande, conjointement adressée à l'Inra et au Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts (Cemagref), sur les justifications et la possibilité de réduction de cet usage⁷¹. Les impacts potentiels de ce travail pour les acteurs professionnels et les réactions préventives qu'ils peuvent susciter sont d'un ordre clairement supérieur. L'expertise est confiée à un pilote scientifique du département SPE. Huit experts du département EA y contribuent, majoritairement spécialistes du devenir des molécules dans l'environnement. Sa réalisation confirme et renforce le bien-fondé des règles procédurales et la nécessité de leur respect rigoureux, malgré les difficultés qu'elles présentent pour les experts.

Sa diffusion en 2005 suscite effectivement les réactions fortes de certaines des parties prenantes concernées par le double constat de la nécessité et de la faisabilité de restrictions d'usage des pesticides. Mais la reconnaissance finale de sa qualité, au-delà de ces polémiques, renforce la légitimité et l'utilité de cette activité de l'Inra pour le débat et la décision publique. Elle fait également apparaître le besoin de productions complémentaires, à vocation plus opérationnelle, c'est-à-dire préparatoires à des décisions et à l'engagement des acteurs. Elles sont appelées « Études ». À la différence des ESCo, elles doivent mobiliser des compétences et des références techniques contextualisées, au-delà du domaine académique, et recourir à la simulation par des modèles.

L'étude Écophyto R&D⁷², destinée à identifier, analyser et évaluer des techniques alternatives à l'emploi de pesticides et à implémenter un processus pour leur développement, en est le prototype. Ses résultats, largement repris dans le plan gouvernemental Écophyto, constituent un premier exemple de référence quant à l'intérêt de la démarche couplant ESCo et Études pour la construction de la décision publique.

Un département engagé sur de nombreux fronts d'expertise et d'études

Le succès du dispositif mis en place est consolidé par la création de la Délégation à l'expertise scientifique collective, à la prospective et aux études (DEPE) en 2010, qui associe aux démarches ESCo et Études les approches prospectives comme autre forme de prolongement et d'usage d'un état des connaissances

71. Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P. *et al.*, 2005. Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, Inra, France, 64 p.

72. Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M. *et al.*, 2010. Écophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse de l'Étude, Inra, France, 90 p.

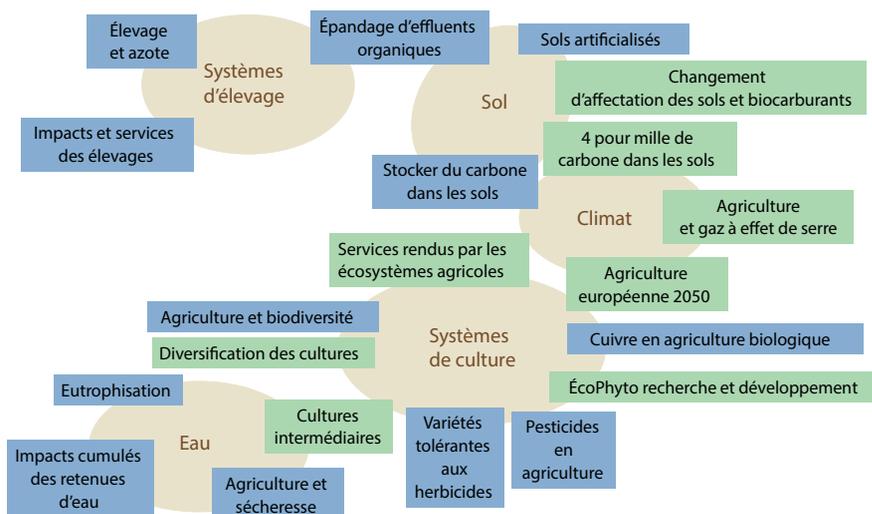


Figure 4.1. Expertises scientifiques collectives et Études Inra auxquelles ont participé des scientifiques du département EA (en bleu, expertise ; en vert, étude).

permettant d'éclairer politiques publiques et débat public. La création de ce dispositif induit une demande continue d'expertises, d'études et de prospectives bénéficiant de financements publics ou parapublics (ministères, agences, instituts techniques, etc.). Les thèmes, en relation directe avec l'agenda politique et/ou l'ampleur des préoccupations de l'opinion, concernent principalement les relations entre agriculture et environnement.

La figure 4.1 récapitule ce qui, parmi les ESCo et les Études menées, a pu concerner le département EA. Si plusieurs des travaux réalisés au cours des quinze dernières années s'inscrivent clairement dans les suites des deux ESCo et de l'Étude séminale (« 4 pour 1 000 », VTH, alternatives à l'usage du « cuivre en agriculture biologique »), les thématiques traitées s'ouvrent à d'autres enjeux des pratiques et systèmes agricoles (réduction des émissions de GES, diversification des cultures, cultures intermédiaires) et à d'autres compartiments clés pour les écosystèmes agricoles (eau, climat, biodiversité). Elles s'ouvrent également aux questions d'élevage en prenant en compte leurs liens aux systèmes de culture (élevage et azote, épandage d'effluents organiques, notamment issus des élevages).

Tableau 4.1. Nombre d'opérations réalisées (période 2002-2018).

	Total	Thème agroenvironnemental
ESCo	16	12
Études	11	8

Tableau 4.2. Contributions du département EA (période 2002-2018).

	Nombre total	Nombre d'experts Inra	Nombre d'opérations avec pilotes du département EA	Experts du département EA	
				Nombre	%
ESCo	16	450	5	89	19,6
Études	11	293	5	56	19,2

Il est donc naturel que le département EA soit fortement sollicité comme fournisseur de compétences (tableaux 4.1 et 4.2). Mobilisant moins de 10 % des effectifs des chercheurs et ingénieurs de l'institut, le département EA contribue pour une part double aux ESCo et Études, avec ses collègues des UMR. Il en tire une incontestable reconnaissance de sa pertinence par rapport aux grands enjeux relatifs à l'agriculture, aux fonctions des écosystèmes et aux menaces qui les concernent.

► Les expertises nourrissent la recherche

Le département EA occupe une place importante dans la mission d'expertise et d'étude qu'assume l'Inra avec clarté et volontarisme. Mais ces exercices rendent aussi plus visibles les apports des recherches du département EA. Alors que les relations entre les connaissances scientifiques produites et leur traduction en innovations techniques sont devenues moins perceptibles et centrales qu'elles ne le furent dans la période d'industrialisation agricole, l'apport aux expertises rend visible et lisible sa contribution aux bénéfices de la société dans ses diverses composantes, contribution au moins partiellement évaluable (voir p. 66).

Exercices de synthèse organisés autour des enjeux finalisés de l'Inra, ESCo et Études sont de véritables démarches de progrès. Elles valorisent largement pour les chercheurs eux-mêmes l'investissement lourd qu'elles exigent. En effet, la pratique des ESCo et des Études est généralement source de bénéfices scientifiques :

- l'ouverture pluridisciplinaire : condition indispensable de réduction des risques de biais de l'expertise, elle instaure la pratique d'un dialogue critique entre disciplines, interne aux sciences biologiques et biotechniques mais aussi entre elles et les sciences de la société. Elle incite au dépassement des cultures consanguines des collectifs de recherche et des appartenances d'établissement ;
- la remise en perspective des thèmes de recherche : que ce soit au niveau des chercheurs individuels ou des collectifs (de l'équipe de recherche à l'institut), la vision intégratrice d'une problématique conduit à reconsidérer les périmètres, la hiérarchie et la structure des questionnements. Les témoignages *a posteriori* des experts et l'évolution des axes stratégiques de l'institut en attestent largement. Se combinant à la dynamique endogène des disciplines et des écoles, il s'agit d'un facteur de dynamique du positionnement, de reconception stratégique et de renouvellement thématique.

Documents de référence

Inra, 2011. Charte de l'expertise scientifique institutionnelle, 9 p.

Inra-DEPE, 2018. Principes de conduite des expertises et des études scientifiques collectives pour éclairer les politiques et le débat publics (version 1). Inra, Paris, 52 p.

Sabbagh C., Le Bars Y., Stengel P., 2014. Des expertises scientifiques crédibles en appui à la décision et au débat publics. Retour d'expérience sur les expertises scientifiques collectives de l'Inra. *Natures Sciences Sociétés*, 22, 366-372.

Les recherches ont des impacts

Ariane Gaunand

Pourquoi évaluer les impacts de la recherche ?

L'évaluation des impacts de la recherche est une préoccupation ancienne des pouvoirs publics qui la financent. Mais dans les années 1990 et plus encore 2000, c'est la société tout entière qui se montre attentive aux retombées positives ou négatives de la recherche scientifique. L'Inra, organisme de recherche publique dont la responsabilité va au-delà de la production de connaissances scientifiques, souhaite montrer aux décideurs et aux financeurs, et plus largement aux acteurs socio-économiques, ou encore à la société civile, que ses recherches sont menées dans l'intérêt général et profitent effectivement, d'une manière ou d'une autre, aux différentes composantes de la société. Depuis 2011, la direction de l'Inra, soucieuse de développer une « culture de l'impact » dans ses communautés de travail, a doté l'institut d'un instrument d'évaluation et d'analyse des impacts sociétaux de ses recherches. Une équipe de chercheurs en sciences sociales a élaboré une méthode standardisée, basée sur des études de cas issues de travaux de recherche : la méthode Asirpa®. Elle a été validée par un conseil scientifique international et plusieurs publications. À ce jour, pour l'ensemble de l'Inra, quarante-huit études de cas ont été réalisées, et une douzaine sont en cours. Pour ce qui le concerne, le département EA, particulièrement concerné par les enjeux sociétaux et politiques, a été ou est engagé dans douze études.

La trajectoire, de la recherche à l'impact

Un impact est un effet ou conséquence d'un événement, d'une activité, d'un processus ou d'une infrastructure sur la société. Par « impact de la recherche », on entend donc les effets directs et indirects des différentes composantes de cette activité (production de connaissances, de compétences, d'expertise, de savoir-faire, d'infrastructures) sur l'économie, l'environnement, la santé, les politiques publiques et le capital social. À la différence de ce que sous-tend la sémantique de l'impact (un choc immédiat fortement localisé dans le temps et dans l'espace), les impacts de la recherche sont générés par des processus longs (au-delà de dix-quinze ans) et ils peuvent se propager dans des espaces très étendus. L'impact est rarement attribuable de manière univoque à un seul acteur de la recherche. La compréhension fine des trajectoires d'impact suivies par les recherches passées éclaire les stratégies actuelles et permet d'optimiser l'impact des recherches présentes ou programmées.

La méthode Asirpa® propose trois outils méthodologiques pour mettre en évidence, dans chaque étude de cas, le rôle des différents acteurs impliqués avec l'Inra dans les mécanismes qui génèrent les impacts des recherches :

- le chemin d'impact, qui retrace les étapes qui vont de la construction d'une configuration productive de recherche partenariale à la production de connaissances, méthodes, outils ou autres résultats, qui sont alors transformés et adaptés par différents utilisateurs et produisent sur eux des impacts. Ce continuum recherche-impact n'est pas linéaire ; il est notamment soumis à des changements de contexte parfois déterminants ;
- la chronologie, qui inscrit dans le temps les choix des acteurs et les différentes « bifurcations » du chemin d'impact. La chronologie permet par exemple d'observer l'imprévisibilité des chemins et les délais entre les différentes étapes du chemin ;
- le vecteur d'impact, qui permet de caractériser de manière multidimensionnelle, qualitative et quantitative, les impacts générés par la recherche sur la société. La construction du vecteur d'impact repose sur l'application de barèmes de notation systématiques des impacts. Loin de renseigner une liste d'indicateurs prédéfinis, l'Inra s'intéresse aux impacts tels qu'ils sont exprimés, avec leurs propres arguments, par les personnes directement touchées par les travaux de recherche. Ces descripteurs d'impacts locaux sont recueillis auprès des personnes impactées lors d'entretiens semi-directifs.

Les impacts des recherches du département Environnement et Agronomie

Douze études de cas ont été réalisées dans le département EA, dont sept études (marquées d'un * dans le tableau ci-après) conduites dans le cadre de l'évaluation collective du départe-

ment par un comité d'experts internationaux en 2014. Ces études de cas ont été sélectionnées selon deux critères : l'opportunité (par exemple un impact sociétal important lié aux recherches est effectivement observable aujourd'hui, la contribution de l'Inra à cet impact est importante et identifiable) ; la faisabilité (par exemple les données extérieures pour avérer l'impact existent, un scientifique de l'Inra est à même de conduire cette étude). Les études de cas du département EA montrent la diversité des objets et finalités des recherches du département (eau, sol, changement climatique, systèmes de culture, fertilisation, recyclage), la mobilisation d'outils collectifs comme les essais-système ou les bases de données sur les sols ou le climat, et enfin le rôle des partenariats (unités mixtes technologiques, réseaux mixtes technologiques, groupements d'intérêt scientifique, etc.). Ces études de cas illustrent la manière dont le département EA génère des impacts, à travers des contributions à la formulation, à la mise en œuvre ou à l'évaluation de politiques publiques environnementales, sanitaires ou sociales, ou bien *via* le transfert de technologies industrielles innovantes.

Les douze études de cas réalisées dans le département Environnement et Agronomie.

Fertilisation azotée et outils d'aide à la décision* (OAD Azote)	1999-2002
Des outils de gestion de la pollution d'origine agricole en Bretagne* (Nitrate Bretagne)	
Expertise scientifique collective sur les pesticides (ESCo Pesticides)	2004-2008
Expertise scientifique collective sur les variétés tolérantes aux herbicides (ESCo VTH)	
Un système d'information sur les sols de France* (Infosol)	
Une méthode d'évaluation de l'impact du changement climatique sur les grandes cultures développée dans l'ANR Climator* (Climator)	
Une politique publique de réduction des usages de pesticides : le plan Écophyto* (EcoPhyto)	
La création d'une start-up sur des technologies de méthanisation* (Naskéo)	2011-2015
Une méthode d'inventaire des émissions agricoles de N ₂ O* (Émissions N ₂ O)	
Couples variétés-itinéraires bas intrants blé (Blé Bas Intrants)	
Outils de gestion quantitative territoriale de l'eau (Gestion eau)	
Conception de systèmes de cultures innovants (SDC Innovants)	2016-2020

* études conduites dans le cadre de l'évaluation collective du département EA.

Exemple des impacts des travaux de l'unité Infosol

L'unité Infosol de l'Inra d'Orléans, créée en 2001, a développé un système d'information sur les sols, leur distribution spatiale, leurs propriétés et l'évolution de ces propriétés. Infosol est la « cheville ouvrière » du groupement d'intérêt scientifique (GIS) Sol, composé de l'Inra, de l'IRD, de l'Institut géographique national (IGN), de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), et des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement. Il est en charge de la mise en œuvre de ses programmes concernant : l'Inventaire de la qualité des sols, le Réseau de surveillance de la qualité des sols de France, la Base de données d'analyses de terres, la Base de données des éléments traces métalliques.

Les données d'Infosol ont contribué à la négociation, la formulation, la mise en œuvre ou l'évaluation de diverses actions publiques :

- des politiques agricoles, avec l'établissement de zonages prenant systématiquement en compte les sols : des données ont, par exemple, été mobilisées pour réviser la délimitation des zones défavorisées simples (zones de handicap naturel en dehors des zones de montagne) et les règles d'allocation d'aides de la Politique agricole commune qui prendront *a priori* effet en 2018 ;
- des politiques environnementales de gestion et de préservation des ressources en eau, de la biodiversité des sols : des données ont ainsi été mobilisées pour classer les bassins versants alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires ou produire des cartographies régionales des risques d'érosion ;

- des politiques d'aménagement du territoire, avec l'identification, dans les schémas de cohérence territoriale de l'Indre, des sols à hauts potentiels agricoles à préserver de l'urbanisation, ou encore l'évaluation de l'impact du tracé d'infrastructures comme le projet de ligne à grande vitesse Lyon-Turin ;
- des politiques de gestion des risques sanitaires, par exemple avec la publication d'atlas régionaux des concentrations environnementales, expositions et risques pour quatre éléments traces métalliques qui ont servi à l'élaboration du 2^e Plan national Santé Environnement (PNSE2) ;
- une évaluation de l'impact environnemental : les données d'Infosol ont permis de calculer la recharge de la nappe phréatique de la Beauce et ainsi de déterminer des quotas d'irrigation attribués par la préfecture du département d'Eure-et-Loir ; elles sont également utilisées par l'Ademe pour détecter des contaminations ponctuelles des sols dans des sites industriels.

Pour en savoir plus

Joly P.-B., Gaunand A., Colinet L., Larédo P., Lemarié S., Matt M., 2015. ASIRPA: A comprehensive theory-based approach to assessing the societal impacts of a research organization. *Research Evaluation*, 24 (4), 1-14, DOI:10.1093/reseval/rvv015.

Joly P.-B., Colinet L., Gaunand A., Lemarié S., Larédo P., Matt M., 2015. Évaluer l'impact sociétal de la recherche pour apprendre à le gérer : l'approche ASIRPA et l'exemple de la recherche agronomique. *Gérer et Comprendre*, (122), 31-42, décembre 2015.

Gaunand A., Colinet L., Joly P.-B., Matt M., 2017. Counting what really counts? Assessing the political impact of science. *Journal of Technology Transfer*, DOI: 10.1007/s10961-017-9605-9.

Matt M., Gaunand A., Joly P.-B., Colinet L., 2017. Opening the black box of impact. Ideal-type impact pathways in a public agricultural research organization. *Research Policy*, 46 (1), 207-218, DOI: 10.1016/j.respol.2016.09.016.



PARTIE II

LES RECHERCHES SUR LES AGROÉCOSYSTÈMES : LES NOUVEAUX ENJEUX DU XXI^e SIÈCLE

CHAPITRE 5

La prise en charge de l'enjeu climatique dans les recherches du département

Sylvain Pellerin, Jérôme Balesdent, Philippe Debaeke, Bernard Itier

La plupart des processus étudiés au sein du département Environnement et Agronomie (EA) dépendent de variables climatiques. Bien avant l'émergence de l'enjeu lié au changement climatique, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'étude de la réponse des plantes à la température, au rayonnement incident et à l'alimentation hydrique. Il en a été de même pour l'étude et la modélisation des processus intervenant dans le sol, comme la minéralisation des matières organiques ou les transferts de molécules polluantes des sols agricoles vers les compartiments air et eau. L'hypothèse qui accompagnait ces travaux était celle d'un climat moyen localement constant, mais variable spatialement et caractérisé par une variabilité inter-journalière et interannuelle forte.

À partir de 1990, les rapports successifs du GIEC (1990 ; 1995 ; 2001 ; 2007 ; 2014) ont apporté la preuve, avec de plus en plus d'observations convergentes, d'un changement climatique en cours lié à l'accumulation de GES dans l'atmosphère du fait des activités humaines. L'hypothèse d'un climat constant commençait à être remise en cause. Au sein du département de Bioclimatologie, quelques travaux pionniers étaient alors consacrés à l'étude de la réponse des plantes à des concentrations accrues en dioxyde de carbone (CO₂) croisées avec des températures élevées, parfois avec des contraintes hydriques plus fortes, préfigurant des scénarios climatiques futurs, mais sans qu'une réelle stratégie scientifique ait été élaborée au niveau de l'institut⁷³.

C'est au cours des années 2000 que la prise de conscience de la réalité d'un changement climatique à l'œuvre s'est diffusée au sein de l'Inra. La participation de Bernard Seguin et de Jean-François Soussana au groupe d'experts du GIEC et

73. Bethenod O., Ruget F., Katerji N., Combe L., Renard D., 2001. Impact of atmospheric CO₂ concentration on water use efficiency of maize. *Maydica*, 46, 75-80.

le prix Nobel de la paix qui a récompensé ce collectif en 2007 y ont contribué également. Citons ainsi la mission confiée à B. Seguin en 2002 (Mices, Mission Inra sur le changement climatique et l'effet de serre) et son travail de sensibilisation de la communauté scientifique et agricole par une série d'écrits et de conférences. Dans ces écrits et prises de parole, qui ont eu un écho dans le monde agricole, les éléments mis en avant étaient avant tout d'ordre climatique et phénologique (ex. : l'avancée des dates de vendanges), avec pour objectif d'illustrer la réalité du réchauffement climatique dans un contexte scientifique et médiatique propice aux controverses. Ils traduisaient aussi le faible investissement de l'Inra sur la question à cette époque. C'est en 2008 qu'un rapport a été confié à B. Seguin par le collègue de direction de l'Inra sur les nécessaires recrutements et réorientations à opérer sur la thématique du changement climatique.

La réflexion stratégique qui a suivi a amené l'institut à mieux distinguer plusieurs ensembles de travaux à conduire dans le domaine du changement climatique et de ses relations avec l'activité agricole : les émissions de GES d'origine agricole et la contribution de l'agriculture à l'atténuation du changement climatique (incluant les agrocarburants), l'impact du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes agricoles et forestiers et enfin la mise au point de stratégies d'adaptation.

► Émissions de gaz à effet de serre et atténuation

Des recherches sur les cycles du carbone et de l'azote ont été réalisées par les agronomes avant même la création de l'Inra. On peut citer les travaux de Hénin et Dupuis en 1945⁷⁴, pionniers mondiaux du bilan de carbone des sols. Dans les années 1980, les recherches conduites sur ce sujet dans les départements d'Agronomie et de Science du sol avaient comme motivation de contribuer au développement d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement et économe en intrants, dans l'esprit du rapport Poly « Pour une agriculture plus économe et plus autonome »⁷⁵. L'objectif opérationnel était de gérer l'état organique du sol pour maintenir des propriétés favorables et de mieux raisonner la fertilisation azotée, avec un souci dominant de réduction des fuites de nitrate pour préserver la potabilité de l'eau. Les échelles spatiales considérées étaient principalement les échelles parcellaires et infraparcellaires, hormis le démarrage de quelques travaux à l'échelle du bassin versant hydrologique. Le département de Bioclimatologie était déjà expert sur les échanges de gaz-trace d'oxydes d'azote (NO_x), d'ammonium (NH₄) et d'ozone (O₃) entre agrosystèmes et atmosphère. Au sein du département de Science du sol, quelques travaux pionniers étaient réalisés sur les émissions de protoxyde d'azote (N₂O), mais un peu en marge de l'effort collectif sur la maîtrise du cycle de l'azote, puisqu'il s'agissait d'un poste de perte considéré comme négligeable, et sans effet sur la qualité de l'eau, alors objet de préoccupation majeur.

Un tournant s'amorce au début des années 1990. Les communautés scientifiques de l'atmosphère et de l'océan interpellent celles de la biosphère continentale sur quelques grandes questions que l'augmentation des émissions de GES a fait

74. Hénin S., Dupuis M., 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales agronomiques*, 15, 17-29.

75. Poly J., 1978. Pour une agriculture plus économe et plus autonome. Rapport Inra, 69 p.

émerger : le puits de carbone que constituent les continents de l'hémisphère nord, les émissions de N_2O d'origine agricole, les sources et puits non industriels de méthane et les impacts du réchauffement sur la biosphère, notamment pour les rétroactions sur les GES eux-mêmes. Ainsi l'Inra est interrogé directement sur ces questions, sous l'impulsion de la Mission interministérielle pour l'effet de serre et des programmes nationaux Géosphère-Biosphère. L'Inra édite en 1995 les restitutions des réponses aux premiers appels à projets nationaux (« Effet », « Éclat »)⁷⁶. À partir de 1993, l'atténuation ou l'impact du changement climatique sont systématiquement évoqués dans les publications des départements sur les cycles C ou N. La nécessaire intégration sol-plante-atmosphère pour aborder ces questions, en relation avec la gestion agronomique, a été une des motivations de la fusion des disciplines science du sol, écophysologie, micrométéorologie, agronomie dans un département unique. La mission du département EA à sa création en 1998 définit ainsi explicitement comme objectif finalisé « la limitation de la contribution de l'agriculture à la pollution atmosphérique et à l'effet de serre ». Les enjeux de l'atténuation du changement climatique ont alors suscité un regain d'intérêt pour des recherches sur les cycles C-N, un temps perçues comme relevant d'un sujet « ayant fait son temps » dans un environnement général de la recherche agronomique marqué par la montée en puissance des biotechnologies. Les unités du département ont produit entre 1998 et 2018 environ 900 articles indexés au Web of Science répondant aux mots-clés <soil carbon or N_2O or nitrous oxide>, dont

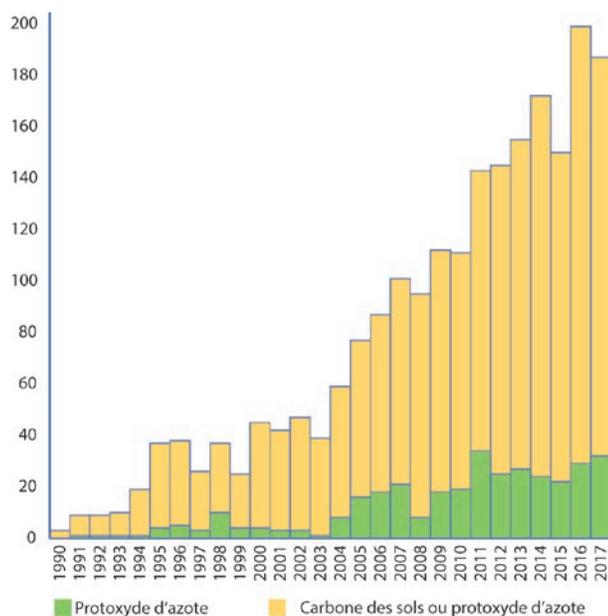


Figure 5.1. Nombre d'articles publiés dans des revues à comité de lecture affiliés à l'Inra, en relation avec le carbone des sols ou N_2O , et avec N_2O seul. Corpus : Web of Science ; critère : <Topic = soil carbon or N_2O or nitrous oxide ; Address content Inra>. La contribution des unités du département EA correspond à environ la moitié de cette production (deux tiers pour N_2O) ; l'autre département principal contributeur est EFPA.

76. Perrier A., Saugier B., 1995. Écosystèmes et changements globaux. *Dossiers de l'environnement de l'Inra*, 8, Paris, 296 p.

60 ont donné lieu à plus de 100 citations (figure 5.1). De surcroît, pour les recherches sur les cycles C-N, la prise en charge de l'enjeu climatique a été à l'origine d'un fort renouvellement des questions traitées et des approches mises en œuvre.

Un effort sur les mécanismes à l'origine des émissions

La mesure des flux ne permettant pas à elle seule de comprendre les émissions, ni de les modéliser, le département EA a entrepris de nombreuses recherches mécanistes sur les biotransformations de carbone et d'azote, faisant appel à la biogéochimie, incluant l'isotopie, l'écologie microbienne et l'écologie de la rhizosphère. On notera plusieurs contributions notables du département EA à la connaissance générique, qui dépassent le cadre de la seule agriculture. Beaucoup sont issues de la synergie entre les savoir-faire en écologie microbienne moléculaire, en mesures des flux et en maîtrise des dispositifs d'observation, réunis dans le département. Les flux de carbone dans la rhizosphère sont alors mieux appréhendés. Concernant la minéralisation du carbone, la notion de *priming effect* implique que des apports de carbone frais stimulent la minéralisation des matières organiques initialement présentes ; dans des cas extrêmes, apporter du carbone au sol peut déstocker du carbone ! Seules les méthodes isotopiques le révèlent. Si le processus est connu depuis la fin des années 1980, notamment grâce à des travaux français, l'étude de Fontaine *et al.* (2007)⁷⁷ a amélioré considérablement la compréhension du phénomène et lui a donné une visibilité exceptionnelle. Au-delà, un changement de paradigme a lieu : les anciens modèles de carbone du sol avec un coefficient de minéralisation fixe et purement pédoclimatique doivent être remplacés par une représentation de l'écologie des organismes régulant la minéralisation du carbone, en relation avec l'acquisition des éléments nutritifs organiques comme minéraux. La contribution des horizons profonds du sol aux flux de carbone est mieux comprise et quantifiée dans les sols agricoles comme à l'échelle globale⁷⁸. L'écologie microbienne explique aussi, au moins partiellement, la variation des émissions de protoxyde d'azote par l'abondance des gènes codant pour l'oxyde nitreux réductase⁷⁹.

Des systèmes d'observation aux bilans de gaz à effet de serre et à leur modélisation

Le département EA se révèle être un acteur majeur de l'observation des stocks de carbone nationaux et des émissions agricoles, maintenant en synergie avec les observatoires nationaux et internationaux des échanges gazeux entre biosphère et atmosphère (*Integrated Carbon Observation System*, ICOS ; Analyse et expérimentation sur les écosystèmes, AnaEE). À la fin des années 1990, le ministère de l'Environnement, l'Ademe et l'Inra avaient mis en place le Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) dans le cadre du GIS Sol. Le RMQS, qui devait contribuer au suivi temporel du carbone national, a permis les premières cartographies

77. Fontaine S., Barot S., Barre P., Bdioui N., Mary B., Rumpel C., 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450, 277-U210.

78. Balesdent J., Basile-Doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z., Hatte C., 2018. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth. *Nature*, 559, 599.

79. « Démonstration d'une origine génétique aux émissions du gaz à effet de serre N₂O par les sols ». Retenu comme « fait marquant » (résultat important, publication remarquable ou événement significatif de la qualité de l'activité d'une unité de recherche, sélectionné pour transmission à la direction générale de l'institut) du département EA en 2011, Microbiologie des sols de Dijon.

des stocks. L'unité Infosol établit également des tendances temporelles de l'évolution des sols grâce à la Base de données des analyses de terre (BDAT).

À partir des années 2000, les efforts portent aussi sur la mesure des émissions de N_2O , leur modélisation et la caractérisation du bilan GES complet des systèmes de culture. Le « développement de chambres automatisées pour le suivi en continu des émissions d'oxydes d'azote (NO , N_2O) d'origine agricole »⁸⁰ et l'équipement de sites avec des tours à flux permettent de multiplier les mesures. L'objectif de connaissance et de réduction des émissions de N_2O stimule des recherches sur l'ensemble du cycle de N et sur la réduction des pertes et fuites des agrosystèmes. Les travaux du département EA en lien avec les émissions de méthane (CH_4) concernent les émissions liées à l'élevage et le traitement et la valorisation des produits résiduels organiques. Peu de travaux sont consacrés aux émissions ou aux puits de méthane directs des sols.

Les évolutions du carbone des sols ne pouvant être suivies que sur des dispositifs dont la durée est de plusieurs décennies, les unités expérimentales de l'Inra s'avèrent précieuses. Certaines se transforment en Observatoires de recherche en environnement (ORE, devenus Systèmes d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement, Soere), qui viennent en appui des bilans de GES et sont des supports privilégiés de la modélisation, notamment Agroécosystèmes, cycles biogéochimiques et biodiversité (ORE ACBB), avec l'ajout des prairies temporaires (à Lusignan) et des grandes cultures (à Estrées-Mons) au réseau d'observation des écosystèmes, et l'ORE Produits résiduels organiques (PRO) sur le suivi d'épandage des produits résiduels.

Les modèles de simulation AMG et l'outil SIMEOS-AMG permettent au secteur d'activité agricole de prévoir et de gérer les stocks de carbone des sols. L'outil Azofert[®] de raisonnement de la fertilisation azotée intègre les émissions de N_2O . L'estimation des émissions de GES des agrosystèmes est opérationnelle pour l'évaluation environnementale⁸¹. Dans les années 2010, les résultats obtenus permettent de proposer des leviers pour l'atténuation des émissions, comme l'introduction des légumineuses, l'utilisation des produits résiduels organiques, les cultures intermédiaires, l'optimisation de la fertilisation bien sûr, et de concevoir des systèmes peu émetteurs (expérimentations-système à Grignon, voir chapitre 18). Outre les systèmes d'observation, modèles et outils d'aide à la décision, des structures et partenariats nouveaux appuient les recherches sur l'atténuation du changement climatique : création de l'unité AgroImpact, alliances au sein du Laboratoire d'excellence Biodiversité, agroécosystèmes, société, climat (Labex BASC), et de l'UMR Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege) ; création de l'unité mixte technologique (UMT) GES- N_2O , des réseaux mixtes technologiques (RMT) Fertilisation et environnement, et Biomasse.

Un élargissement des échelles

La problématique de l'atténuation du changement climatique a fortement contribué à étendre la dimension spatiale des recherches sur les cycles biogéochimiques, amorcée un peu plus tôt par l'étude des transferts d'azote dans les bassins versants hydrologiques. L'évaluation des variations de stocks de C du sol

80. « Fait marquant » du département EA en 2008.

81. « Prise en compte des bilans des émissions de carbone, d'azote et de gaz à effet de serre dans l'évaluation de la durabilité d'un système de culture », « fait marquant » du département EA en 2010.

ou des émissions de N_2O dans un contexte de contribution de l'agriculture aux émissions de GES ou d'atténuation pose *de facto* le problème de l'intégration spatiale des résultats, puisque seules des émissions calculées sur de grandes surfaces font sens vis-à-vis du climat. La question des transferts de pollution se pose également très rapidement : la dénitrification, qui est encore en 1990 la dépollution « parfaite » du nitrate d'origine agricole, devient pollution globale. La théorie de la cascade de l'azote⁸², qui a valu en 2008 à James Galloway le prix Tyler, « Nobel de l'environnement », fait envisager le cycle de l'azote à plusieurs échelles emboîtées, allant jusqu'à l'échelle globale. Du fait de l'utilisation d'engrais azotés de synthèse, l'agriculture est à l'origine d'émissions directes intervenant sur les parcelles agricoles, mais aussi d'émissions indirectes intervenant après transport de nitrate ou d'ammonium vers des milieux non agricoles et d'émissions induites à l'amont ou à l'aval des exploitations liées à la fabrication d'intrants (engrais azotés) ou à la transformation des produits. Il devient évident que le raisonnement de la fertilisation azotée à l'échelle locale reste nécessaire mais ne suffit plus. Parce que le recyclage du carbone comme de l'azote en agriculture et la valorisation énergétique des effluents tendent à minimiser les émissions, atténuation, recyclage et économie circulaire vont de pair. La problématique du recyclage devient essentielle. Il faut connaître et maîtriser le cycle de l'azote et des autres éléments à des niveaux d'organisation englobants, jusqu'à l'échelle globale, puisque c'est à ce niveau que les activités humaines ont perturbé les cycles et que l'enjeu climatique se pose.

L'Inra contribue aux études nationales, européennes et internationales des émissions à des échelles larges (projet ANR Escapade, projet européen NitroEurope, etc.). Par leur contribution aux réseaux de mesures mondiales des flux, des équipes EA et EFPA contribuent à de nombreuses synthèses internationales (par exemple *Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands*, 2004 ; *Atmospheric composition change: ecosystems-atmosphere interactions*, 2009 ; *Biophysical and economic limits to negative CO_2 emissions*, 2016). Des chercheurs du département proposent à la communauté internationale « un nouveau modèle statistique pour l'estimation à l'échelle mondiale des émissions de N_2O dues à la fertilisation azotée »⁸³.

Une implication croissante des chercheurs du département dans l'appui à la décision publique, sur des questions éminemment politiques

Les chercheurs du département ont été pendant cette période de plus en plus sollicités pour l'expertise et l'élaboration de politiques publiques. À l'échelle internationale, la France a toujours été proactive pour la réduction des émissions, avec des motivations diverses. Le protocole de Kyoto en 1990 a inclus les émissions associées au *land use, land-use change and forestry* (LULUCF), y compris dans les permis carbone, mais les méthodes de comptabilité étaient encore à négocier. C'est une des raisons pour lesquelles la Mission interministérielle de l'effet de serre et le ministère de l'Environnement, en charge de la négociation, interpellent l'Inra en 1990 sur cette question non neutre. Face aux *lobbies* gigantesques de l'énergie, le poids de l'agriculture et la biosphère sont facilement manipulés, pour minimiser le poids des émissions fossiles, pour détourner l'attention ou servir d'alibi.

82. Gruber N., Galloway J.N., 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451, 293-296.

83. Retenu comme « fait marquant » du département EA en 2012.

Encadré 5.1. La saga du carbone

Dominique Arrouays

Avant les années 1990, le carbone dans les sols était principalement étudié pour son rôle vis-à-vis de certaines propriétés des sols comme, par exemple, la rétention et la fourniture en éléments minéraux ou la stabilité structurale. Le déclencheur de l'étude du cycle du carbone vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique a certainement été le protocole de Kyoto (1990). Au début de la création du département EA, plusieurs programmes de recherche (Éclat, Agriges) financés par les ministères en charge de l'Environnement et de l'Agriculture ont commencé à aborder le carbone des sols sous l'angle de son stockage et de son potentiel d'atténuation. C'est en 1999 que J. Balesdent et D. Arrouays citent pour la première fois l'exemple du « 4 pour 1 000 ». Schématiquement, ce chiffre suggère qu'il suffirait d'augmenter tous les ans de 4 pour 1 000 les stocks de carbone des sols du monde pour compenser les émissions mondiales. En 2000, le ministère en charge de l'Environnement commandite une des toutes premières expertises collectives de l'Inra sur le thème du stockage de carbone dans les sols agricoles. Les premières évaluations nationales de ces stocks sont produites et une analyse du potentiel de stockage en fonction de changements d'usages ou de pratiques est réalisée. Le département EA est également sollicité pour mettre à disposition du GIEC des experts (J.-F. Soussana, B. Seguin, J.-C. Germon, D. Arrouays).

Les travaux menés par les équipes du département EA sur le cycle du carbone vont alors se multiplier. Ils s'orientent dans plusieurs directions : l'étude de l'effet des pratiques agricoles en mettant à profit les essais de longue durée, l'analyse fondamentale de l'origine et du temps moyen de résidence du carbone à partir d'outils isotopiques, l'affinement des estimations globales et spatialisées des stocks de carbone, les déterminants de la protection des matières organiques vis-à-vis de leur minéralisation, la quantification de « compartiments » ayant des temps moyens de résidence différents — l'exemple le plus marquant étant sans doute celui tiré de l'essai de très longue durée de Versailles, dit des

« 42 parcelles » —, la mise au point et la calibration de modèles de dynamique du carbone, le chiffrage et la spatialisation du potentiel de stockage ou de séquestration. Même si elle reste relativement imprécise, la mesure directe des flux de GES par Eddy Covariance permet de réaliser des bilans de GES et l'Inra s'impose à l'échelle internationale comme un fer de lance incontournable dans ce domaine. En 2013, une nouvelle expertise menée par l'institut permet d'affiner les estimations des potentiels de stockage (figure 5.2).

Aujourd'hui, le département EA se place comme l'un des *leaders* mondiaux sur ce thème, comme en témoignent des articles dans des revues de niveau exceptionnel telles que *Nature*, *Science* ou *Nature Climate Change*. Le chiffre de « 4 pour 1 000 » a été repris en 2015 comme un « slogan » par le ministre de l'Agriculture Stéphane Le Foll* lors de la COP21. Celui-ci a d'ailleurs été ensuite honoré par l'Union internationale des sciences du sol, qui lui a remis un prix lors d'un séminaire dédié organisé à l'Inra début 2016.

* Ministre de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt de 2012 à 2017.

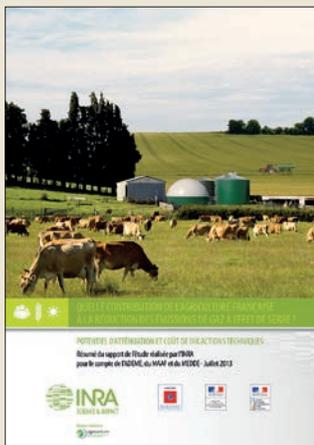


Figure 5.2. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J.-P. et al., 2013. Inra, France, 92 p.

À l'échelle nationale, même si la réduction des émissions est dans les grandes lignes en phase avec le courant écologique (*climate-smart agriculture*), les différentes sensibilités à l'environnement peuvent s'affronter sur le terrain scientifique. Concernant de nombreuses émissions et typiquement celles du méthane par les ruminants, les conduites intensives *vs* extensives peuvent se ranger en ordre inverse selon qu'on comptabilise les émissions par unité de surface ou de produit. Les émissions de N₂O ont stigmatisé l'agriculture intensive, car la première méthode d'estimation des émissions reprise par le GIEC en 1990 (et toujours en cours) fait l'hypothèse que les émissions sont proportionnelles à la fertilisation azotée minérale (méthode « tiers 1 »). Au département EA, les spécialistes de la dénitrification ont l'intuition que cette hypothèse est très approximative ; elle est en tout cas peu porteuse d'innovation. En 2008, une étude de Crutzen *et al.*⁸⁴ invalide le potentiel d'atténuation du réchauffement par les agrocarburants de première génération, les émissions de N₂O, entre autres, annulant le gain de C fossile. Cette remise en cause, associée à la crise alimentaire de 2007-2008 et au débat sociétal croissant sur l'éthique de la production d'énergie sur des terres agricoles, porte un coup d'arrêt aux recherches sur les agrocarburants de première génération. Aujourd'hui encore, l'alternative entre l'exploitation énergétique de la biomasse et sa restitution aux sols reste un point d'achoppement de la décision en agriculture et sylviculture.

Le département participe à l'appui à la décision et à la politique publique pour la réduction des émissions de GES. Très vite la contribution des sols au stockage de C donne lieu à plusieurs questionnements et débats (encadré 5.1). Les sols de la planète contiennent environ 1 500 à 2 000 Gt de carbone, sans compter le permafrost (800 Gt), soit deux fois plus que la biomasse sur pied ou l'atmosphère, ou encore 150 à 200 ans d'émissions de combustibles fossiles. Dès les années 1990, les écosystèmes de l'hémisphère nord sont apparus comme un puits net de carbone, et la question de la réponse de la minéralisation du carbone organique au changement climatique et à l'usage des terres a été posée. À cette époque, l'agriculture était déjà parfaitement consciente du rôle des matières organiques dans la fertilité et la conservation des sols. Selon le ou les enjeux considérés (fertilité du sol et/ou atténuation du changement climatique), la teneur dans l'horizon de surface, le stock dans l'horizon labouré ou sur la totalité de la profondeur du profil doivent être considérés différemment. Des résultats anciens sur l'effet de pratiques agricoles sur la teneur en carbone des sols sont alors revisités avec des débats scientifiques parfois vifs, dont l'exemple le plus emblématique est l'effet du non-travail sur le stockage de C (encadré 5.2).

En 2002, le département coordonne une première expertise collective sur le carbone des sols en lien avec l'atténuation du changement climatique, « Stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? »⁸⁵ (encadré 5.1). En 2012, l'Inra initie le métaprogramme EcoServ sur les services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles et forestiers, incluant le service de régulation du climat global, et des chercheurs du département participent au programme Efese-EA du ministère de l'Écologie, incluant là aussi un volet sur la contribution des

84. Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A., Winiwarter W., 2008. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 389-395.

85. Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.-F., Stengel P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Synthèse, Inra, 32 p.

Encadré 5.2. La trajectoire sinueuse des connaissances de l'impact du travail du sol sur le stockage de carbone et sur les émissions de gaz à effet de serre

Jérôme Balesdent

Au cours des années 1990, les travaux du département de Science du sol et les essais de l'ITCF (devenu Arvalis) avaient montré que le labour conventionnel pouvait accélérer la minéralisation du carbone organique, l'exposition du sol nu aux intempéries combinée avec la très basse teneur en carbone des premiers centimètres favorisant la déstructuration et la déprotection du carbone des sols limoneux (Science du sol, Versailles, 2000). Les premières méta-analyses mondiales concluaient en même temps à un stockage de carbone important par les techniques sans labour, qui sont largement pratiquées dans les deux Amériques. La réduction du travail du sol diminue aussi la consommation énergétique et les coûts de main-d'œuvre. Cependant, l'estimation de la réduction des émissions de GES par abandon du labour va diminuer progressivement en deux décennies. La première expertise collective de l'Inra sur le stockage de carbone (2002) retient un chiffre de stockage de $0,2 \pm 0,1$ t C/ha/an, plus modeste que celui de la littérature. Puis les travaux des unités Agrolmpact et Microbiologie des sols notamment vont montrer que le non-travail peut augmenter les émissions de N₂O (2007-2011). Les méta-analyses mondiales révisent aussi à la baisse le potentiel de stockage de C, en prenant mieux en compte le bilan en profondeur et le compactage, et en séparant l'apport additionnel de carbone des cultures intermédiaires qui accompagnent souvent le *no-till* dans le semis sous couvert. L'excellente étude de Dimassi *et al.* (2014)* montre que l'effet du labour sur le carbone dépend des conditions climatiques, et donc des climats régionaux (« Le travail du sol impacte peu le stockage du carbone », fait marquant 2014). Actuellement, à la fin des années 2010, les pratiques de travail du sol ne doivent plus être considérées comme ayant un effet binaire sur le carbone (stocke, ne stocke pas) mais multi-varié ; et les agro-systèmes européens labourés depuis des siècles ne répondent pas comme ceux tout récemment défrichés des nouveaux mondes. Les autres bénéfices environnementaux du travail réduit, du mulch, du semis sous couvert végétal et des concentrations en carbone élevées dans les premiers centimètres, eux, restent.

* Dimassi B., Mary B., Wylleman R., Labreuche J., Couture D., Piraux F., Cohan J.P., 2014. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 188, 134-146.

écosystèmes agricoles à la régulation du climat. En 2013, l'Inra, dans une expertise collective coordonnée par les départements EA et SAE2, identifie dix actions pour « réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture française », en faisant l'analyse économique (figure 5.2). En 2015, lors de la COP21 à Paris, le ministre en charge de l'Agriculture Stéphane Le Foll, conseillé par la recherche scientifique sur les bénéfices agricoles et environnementaux du carbone des sols, lance l'initiative « 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », qui devient programme international. L'intitulé-symbole provient du rapport entre l'augmentation annuelle du CO₂ de l'atmosphère (4,5 Gt C/an en 2015) et le stock de carbone des 30-40 premiers centimètres des sols (estimé à plus de 1 000 Gt C) : augmenter le stock de 4 pour 1 000 par an stopperait l'augmentation du CO₂. Anecdote et hasard des chiffres, les unités de Science du sol de Versailles et d'Orléans avaient publié en 1999 le même chiffre (« une augmentation annuelle de ce réservoir de seulement 0,4 % par an stockerait autant de carbone que la combustion de carbone fossile n'en émet »), faisant alors allusion à un stock évalué à 1 500 Gt et à une compensation des émissions de 6 Gt C/an en 1995, beaucoup plus basses que celles de 2015. Dans la foulée de l'initiative 4 pour 1 000, une nouvelle étude est demandée à l'Inra en 2017, dont les résultats seront rendus

début 2019, sur les possibilités d'atteindre l'objectif 4 pour 1 000 sur le territoire national et les coûts qu'ils impliqueraient, et dont la démarche a vocation à servir de modèle pour d'autres pays et collectifs.

► Impacts du changement climatique

L'étude des impacts du changement climatique vu comme une évolution tendancielle vers de plus hautes températures, un accroissement du CO₂ atmosphérique et des régimes hydriques plus fréquemment contraints, n'a pas été pendant longtemps un objectif prioritaire pour les agronomes, écophysiologistes et bioclimatologistes de l'Inra. Les premières études d'impact du changement climatique sur le fonctionnement des couverts et sur les rendements sont à mettre au crédit des bioclimatologistes d'Avignon et de Grignon au début des années 1990⁸⁶.

Au niveau de la direction du département EA, il faut attendre le schéma stratégique de département (SSD) 2011-2015 pour que le changement climatique soit pointé comme un enjeu majeur pour les recherches (au-delà des questions relatives à l'atténuation de l'effet de serre) et le SSD actuel (2016-2020) pour que l'adaptation au changement climatique s'affiche explicitement dans les intitulés de certaines priorités scientifiques. Tout ceci concorde avec le décollage des publications de l'Inra sur le changement climatique à partir de 2007 et l'accélération observée depuis les années 2010, elle-même globalement synchronisée des productions internationales par rapport aux productions internationales dans le domaine (figure 5.3).

Pour autant, comme évoqué en introduction, il faut faire état chez les agronomes et les bioclimatologistes d'une longue tradition de travaux sur les effets des facteurs climatiques et édaphiques sur le développement, la croissance et l'élaboration du rendement et de la qualité des productions de grandes cultures, plantes fourragères, cultures maraîchères, vigne et arbres fruitiers. Ces travaux se justifiaient déjà par la variabilité inter-régionale des conditions de production (sols, climats) et par l'occurrence de séquences climatiques exceptionnelles ou d'accidents climatiques (gel, sécheresse de 1976) justifiant un élargissement des gammes explorées.

La bioclimatologie en particulier a mené de longue date des travaux sur les effets du rayonnement, de la température, du gel, de l'eau déficitaire ou en excès (dans le continuum sol-plante-atmosphère), mais également sur la concentration en CO₂ de l'atmosphère dans les principaux processus d'intérêt pour la production et l'agrométéorologie : survie, organogenèse, morphogenèse, échanges gazeux, photosynthèse, allocation de la biomasse, composition des produits récoltés, etc. On peut consulter à ce titre les actes de l'École-Chercheurs du Croisic⁸⁷ ou l'ouvrage *Bioclimatologie : concepts et applications*⁸⁸, qui illustrent la gamme de contraintes explorées et les processus et fonctions étudiés de l'échelle de l'organe au territoire.

86. Delécolle R., Ruget F., Ripoche D., Gosse G., 1995. Possible effects of climate change on wheat and maize crops in France. In: *Symposium on Climate Change and Agriculture. Analysis of Potential International Impacts*, Minneapolis, MN, 4-5 novembre 1992, Book Series, *ASA Special Publication*, 59, 241-257 ; Delécolle R., Soussana J.-F., Legros J.-P., 1999. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *Compte rendu Acad. Agric. Fr.*, 85, 45-51.

87. Cruiziat P., Lagouarde J.-P., 1996. *Actes de l'École-Chercheurs en bioclimatologie*, Le Croisic, avril 1995, Inra, Paris, 670 p.

88. De Parcevaux S., Huber L., 2007. *Bioclimatologie. Concepts et applications*, Éditions Quæ, 324 p.

Tout ceci a contribué à forger un socle de compétences remobilisables sur les questions de changement climatique.

En agronomie, mentionnons les travaux menés par l'unité de Toulouse sur la gestion de la ressource en eau en conditions limitées et incertaines (en collaboration avec les économistes, biométriciens, les instituts techniques et la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne), qui avait anticipé les questions posées par le changement climatique sur les besoins d'irrigation accrus et les ressources en eau plus tendues.

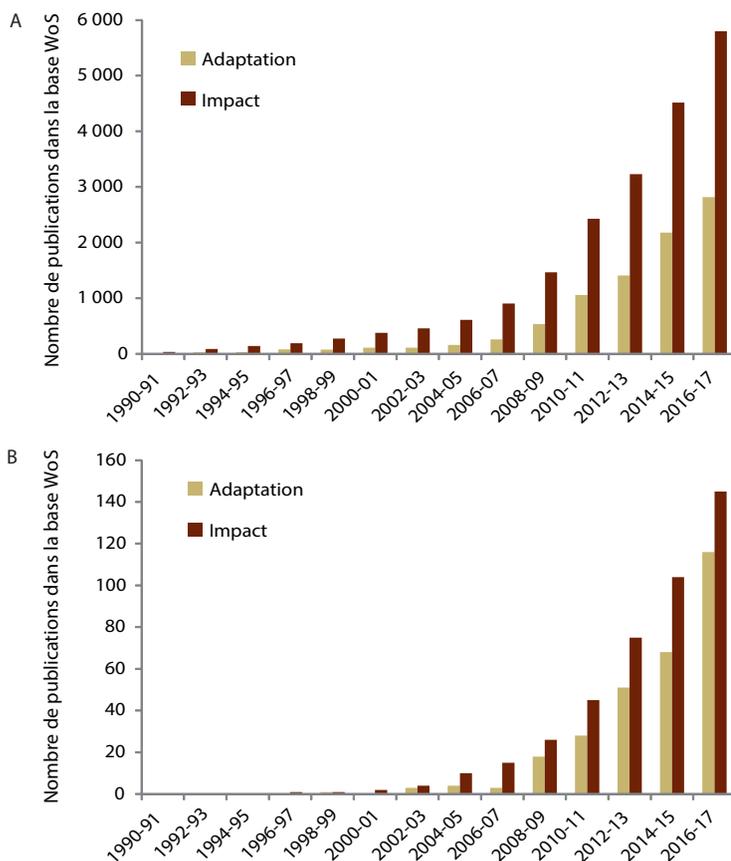


Figure 5.3. Dynamique temporelle du nombre de publications du Web of Science (WoS) sur l'impact du changement climatique en agriculture (équation 1) et l'adaptation (équation 2). (A) Toutes les institutions. (B) Inra uniquement.

L'analyse a été réalisée sur la période 1990-2017 à partir de deux équations de recherche : (1) $TS = (climate\ change\ AND\ impact^*)\ AND\ (TS = (agron^*\ OR\ agric^*)\ OR\ TS = (forest^*)\ OR\ TS = (wine^*\ OR\ vine^*))$ (2) $TS = (climate\ change\ AND\ adapt^*)\ AND\ (TS = (agron^*\ OR\ agric^*)\ OR\ TS = (forest^*)\ OR\ TS = (wine^*\ OR\ vine^*))$ L'équation (1) fournit 20 537 publications, dont 428 (soit 2,1 %) sont signées par au moins un auteur Inra (l'Inra se situe au 8^e rang de toutes les institutions de recherche). L'équation (2) fournit 8 882 publications, dont 292 (soit 3,3 %) sont signées par au moins un auteur Inra (l'Inra se situe au 3^e rang de toutes les institutions de recherche, et au 2^e rang, juste après l'USDA, en considérant la seule période 2016-2017). Le nombre de publications sur l'impact du changement climatique a beaucoup augmenté après 2005, tandis que celui des publications sur l'adaptation a augmenté 4-5 ans plus tard. La même dynamique a été observée pour les publications de l'ensemble des institutions (figure 5.3A) et pour celles de l'Inra (figure 5.3B). La part du département EA n'a pu être quantifiée précisément, mais si l'on examine les deux dernières années, on peut estimer qu'au moins un chercheur EA a participé à 30 % des publications de l'Inra sur le changement climatique.

C'est dans ce contexte de renforcement des travaux sur la tolérance à la sécheresse des plantes que fut créé à Montpellier en 1993 le Laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux (Lepse), dont l'objectif est de produire des connaissances et des méthodologies en vue d'améliorer la productivité des plantes cultivées sous contraintes environnementales, en premier lieu le manque d'eau.

Si les travaux visant à analyser et modéliser les conditions d'adaptation de la plante au climat étaient bien ancrés dans les compétences et les objectifs du département EA lors de sa création, la référence au changement climatique est apparue assez tard au-delà des notions de conditions fluctuantes, accidents climatiques et déficit hydrique structurel déjà mentionnés. Ceci s'est traduit notamment par la prise en compte des hautes températures (à la floraison, au cours du remplissage) et des alternances plus marquées des températures (ex. : lors des phases de dormance et de débournement chez les arbres fruitiers), élargissant la gamme des situations traitées jusqu'alors.

La sécheresse de 1976 avait été vécue comme un événement exceptionnel. Les sécheresses du début des années 1990 et surtout celles de 2003 et de 2005 ont été davantage perçues comme une des manifestations possibles du changement climatique, annonçant un retour plus fréquent de ces « anomalies » qui, de statut de catastrophes, pourraient passer au statut de « normes ». Ainsi, la canicule de 2003 et l'expertise immédiate à laquelle elle avait conduit en raison de son caractère exceptionnel avaient permis de révéler des conditions de températures estivales que les climatologues associaient au climat attendu alors pour 2050 de manière fréquente.

C'est dans ce contexte que fut commanditée en 2005 l'expertise scientifique collective Sécheresse et agriculture. Elle visait à réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau associé à une tension plus forte sur les usages (irrigation), mais aussi au changement climatique⁸⁹. Pilotée par Bernard Itier, elle a mobilisé 25 experts (dont 12 du département EA). Partant du constat d'une raréfaction attendue des ressources en eau au niveau des sols et des aquifères (notamment liée à un déficit pluviométrique plus marqué dans certaines régions), l'expertise a analysé les voies d'adaptation à la sécheresse ouvertes par l'agronomie et la génétique, en considérant plusieurs niveaux d'amélioration agronomique (la génétique de la tolérance à la sécheresse n'offrant pas encore les espoirs actuels) : tout d'abord augmenter l'efficacité de l'irrigation, puis réduire les besoins en eau par un ajustement de l'itinéraire technique (esquive, rationnement), enfin changer le système de culture (ex. : remplacer le maïs par du sorgho). Des simulations agronomiques ont été articulées avec une modélisation économique pour souligner l'intérêt des cultures économes en contexte de changement climatique. Dans le même temps, l'expertise a permis de souligner les verrouillages technologiques qui existent en agriculture, notamment lorsqu'il s'agit de structurer de petites filières comme le sorgho. Elle a conforté l'intérêt pour l'Inra de soutenir des espèces jugées mineures comme le tournesol afin de disposer de cultures à bas niveaux d'intrants comme solutions d'adaptation : cela a conforté le montage d'un programme Tournesol sur Toulouse, combinant agronomie et génétique en association forte avec la sélection privée et le Centre technique interprofessionnel des oléagineux

89. Amigues J.-P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Synthèse de l'expertise scientifique collective, Inra (France), 72 p.

métropolitains (Cetiom), devenu Terres Inovia. Concernant l'action publique relative à la question, une des conclusions les plus importantes a consisté à recommander aux politiques le passage d'une action de compensation *a posteriori* à une action d'appui à la gestion *a priori*, conduisant à des gestions de bassin versant s'appuyant non seulement sur des accords politiques, mais aussi sur des bases physiques.

Depuis cette époque, en raison de fréquents épisodes de sécheresse, l'expertise des agronomes est sollicitée au sein de cellules « sécheresse » pilotées par le ministère de l'Agriculture. Ceci a amené à la création de la veille agroclimatique (VAC) au sein de l'Inra (unité Agroclim, Avignon), destinée à outiller l'expertise des agronomes et à fournir des éléments de prévision des conséquences des sécheresses à l'aide du modèle Stics et du réseau de postes climatiques suivi par l'Inra. Suite à la sécheresse printanière de 2011, une rénovation de la VAC a été opérée. L'exploitation du modèle Stics est désormais complétée par un suivi quotidien d'indicateurs agroclimatiques centrés sur les cycles annuels du blé et du maïs, et sur un grand nombre de sites Inra. Par ailleurs, l'unité Agroclim a aujourd'hui pris un positionnement très marqué sur les outils et méthodes pour les études d'impact et la veille dans le domaine du changement climatique.

La montée en puissance de la modélisation du fonctionnement des cultures dans les années 1990, en particulier au travers de modèles comme Ceres, EPIC, CropGro, CropSyst⁹⁰ (modèles américains adaptés à nos conditions) puis Stics (approche plus fédératrice, faisant émerger une « école » de modélisation française, voir chapitre 9), a permis une intégration plus poussée des facteurs de production, la prise en compte dynamique des processus et un rapprochement plus facile entre agronomes, physiciens et écophysologistes. La modélisation apporte surtout la possibilité de prévoir la production végétale dans des situations non explorées (gammes de facteurs, horizons temporels et spatiaux nouveaux, etc.), et les travaux sur son impact et son adaptation en dépendent directement. L'outil s'avère particulièrement bien adapté à la prise en compte de simulations multiples en climat futur après intégration des effets du CO₂ sur la photosynthèse et l'efficience d'utilisation de l'eau.

Le département EA, dès son premier schéma stratégique, avait voulu afficher une double approche des problèmes à la fois cognitive et « ingénierique ». Pour dépasser la traditionnelle valorisation des résultats, la modélisation systémique avait été affichée comme l'un des outils majeurs de cette approche ingénierique. Elle était présentée comme un « outil incontournable pour effectuer des simulations de scénarios de pratiques agricoles dans des conditions pédoclimatiques variables et dans des contextes socio-économiques divers ».

L'action de la Micces, aidée par la répétition d'événements extrêmes (comme 2003), a contribué à susciter en quelques années un assez grand nombre de travaux dans des domaines divers. Les conditions favorables ont ainsi été créées pour que des projets de grande ampleur s'élaborent et se mettent en place avec le financement de l'ANR : dans le cadre de l'appel d'offres VMC (Vulnérabilité, milieux et climat), ont ainsi été lancés les projets Climator sur les impacts futurs, Imagine et Validate pour le cas des prairies et Dryade pour la vulnérabilité des forêts à la sécheresse, avec une forte composante sur l'aide à la gestion.

90. Ceres : Crop Environment Resource Synthesis (https://www6.inra.fr/basc/content/download/3386/34339/version/3/file/Fiche_modele_BASC_CERES-EGC.pdf) ; EPIC : Environmental Policy Integrated Climate (<https://epicapex.tamu.edu/epic/>) ; CropGro : Module Structure for CROPGRO Model (C.H. Porter, J.W. Jones, P. Wilkens) ; CropSyst : Cropping Systems Simulation Model (http://modeling.bsysse.wsu.edu/CS_Suite/cropsyst/documentation/articles/description.htm).

Rappelons ici le rôle essentiel de Nadine Brisson, à l'origine du modèle Stics et porteuse du projet ANR Climator (2007-2010), qui visait à évaluer par modèle les impacts du changement climatique sur les principales productions agricoles à une échelle multi-locale (12 stations) et nationale, puis à tester de premières adaptations simples pour atténuer les impacts négatifs, voire valoriser certaines opportunités. Ce projet fédérait majoritairement des chercheurs EA (16 sur 30).

Les objets d'étude étaient les grandes cultures (blé, maïs, tournesol, etc.), les prairies, la vigne, les forêts de conifères et de feuillus, les variables d'étude étant le rendement et la qualité, mais aussi les impacts sur l'environnement (sol et eau). L'originalité de l'approche a consisté à utiliser plusieurs modèles (projections climatiques, modèles de culture : Stics + un modèle « spécifique ») appliqués à plusieurs scénarios d'émission des GES et à intégrer les incertitudes dans l'analyse des résultats. Des climatologues étaient donc associés à Climator afin de produire non seulement des projections aux lieux géographiques retenus (régionalisation des modèles climatiques), mais aussi un panel large de données climatiques (rayonnement, évapotranspiration, etc.). Les simulations ont été réalisées sur trois périodes de trente ans : 1970-1999 (appelé « passé récent »), 2020-2049 (« futur proche ») et 2070-2099 (« futur lointain »).

Ces travaux ont été bien relayés vers la profession, tant au niveau des instituts techniques que des chambres d'agriculture (le Livre vert, figure 5.4), et ont fortement contribué à la prise de conscience mais également à la recherche de solutions d'adaptation. On rappelle ici le rôle déterminant également de N. Brisson pour le lancement de l'initiative AgMIP en 2010 (intercomparaison internationale des modèles de culture) et pour le montage du métaprogramme Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt (Accaf).

Par ailleurs, même si cela n'avait pas été programmé initialement, on peut dire que les chercheurs du département EA ont pu mettre en œuvre les études d'impact du changement climatique parce qu'une volonté de développement de la modélisation systémique avait été fortement affichée dès le départ.

Le projet Climator présenté à Versailles en juin 2010 a permis de confirmer et de chiffrer les impacts sur plusieurs processus comme la durée du cycle, fortement réduite pour les cultures de printemps et les cultures pérennes, le besoin accru en irrigation pour les cultures, le taux de recharge des nappes phréatiques (fortement réduit du fait de la baisse des précipitations de l'ordre de 75 %). En raison de conditions thermiques plus favorables et de possibilités d'adaptation, les cultures d'hiver en C3 (blé) bénéficiant de la fertilisation CO₂ pourraient être favorisées par le changement climatique, contrairement aux cultures de printemps, très impactées par la réduction du cycle et par l'augmentation des contraintes thermiques et hydriques estivales.

Le projet concluait sur un ensemble de « dangers-opportunités » selon les régions de l'Hexagone : opportunités pour le Nord-Est et la montagne, qui bénéficieront d'un climat plus chaud sans souffrir du manque d'eau (possibilité d'extension de cultures comme le maïs), tandis que le Sud-Ouest serait plus affecté par des « dangers » liés à la tension sur l'eau, ce d'autant plus que les agriculteurs

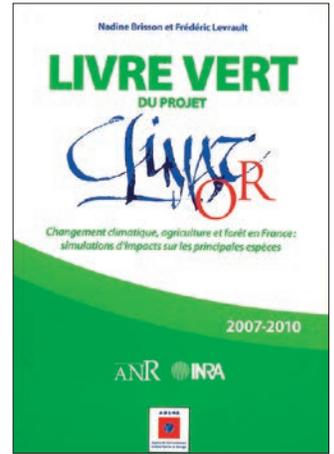


Figure 5.4. Le projet Climator : une contribution collective majeure de l'Inra à l'étude de l'impact du changement climatique sur les principales productions agricoles françaises et le test de leviers d'adaptation.

Encadré 5.3. Sécheresse, fonctionnement des communautés microbiennes et cycles biogéochimiques : un exemple de travaux en cours sur l'impact d'événements extrêmes

Abad Chabbi, Annette Bérard

Il est maintenant reconnu que les événements extrêmes, tels que les vagues de chaleur exceptionnelles, de sécheresses ou les précipitations intenses, sont liés à l'augmentation rapide des concentrations mondiales de GES et à l'élévation de température qui en résulte. L'accroissement des températures attendu au cours des trente à cinquante prochaines années devrait se situer entre 2 et 3 °C. Les vagues de chaleur devraient devenir plus intenses, plus fréquentes et durer plus longtemps. L'intensité, la fréquence et la durée de ces événements extrêmes ont crû depuis le début des années 1980 et devraient augmenter encore à mesure que le climat continue de se réchauffer.

Au cours des dernières années, un nombre exceptionnellement important de vagues de chaleur destructrices a eu lieu dans de nombreuses parties du monde. En 2003, l'Europe a connu son été le plus chaud depuis au moins cinq cents ans. L'an passé, la région Provence a connu des records de sécheresse printanière, estivale et automnale*. Les événements extrêmes relatifs aux précipitations pourraient affecter plus fortement les écosystèmes terrestres que l'évolution moyenne des régimes de précipitations. Ainsi, les fonctions et les structures actuelles des écosystèmes pourraient ne pas pouvoir s'adapter aux changements globaux du XXI^e siècle.

La température et l'humidité du milieu sont connues pour influencer le développement des plantes et leur croissance, ceci en fonction de l'espèce et de la variété. Ces événements extrêmes de type sécheresse et canicule survenant pendant la période estivale pourraient ainsi avoir un impact dramatique sur la productivité végétale. Les sols, également exposés aux événements extrêmes, pourraient subir des modifications durables de leur réactivité biogéochimique. Cette réactivité biogéochimique et physique est très fortement liée à la biologie du sol, en particulier les communautés microbiennes actrices de la fertilité du sol au sein de zones particulières que sont la litière et la rhizosphère. Peu de recherches ont été menées pour documenter l'ensemble de ces effets et leurs interactions. Aborder les impacts des événements extrêmes climatiques sur les productions agricoles implique d'étudier de manière pluridisciplinaire (biologie, physico-chimie, physique de l'eau dans le

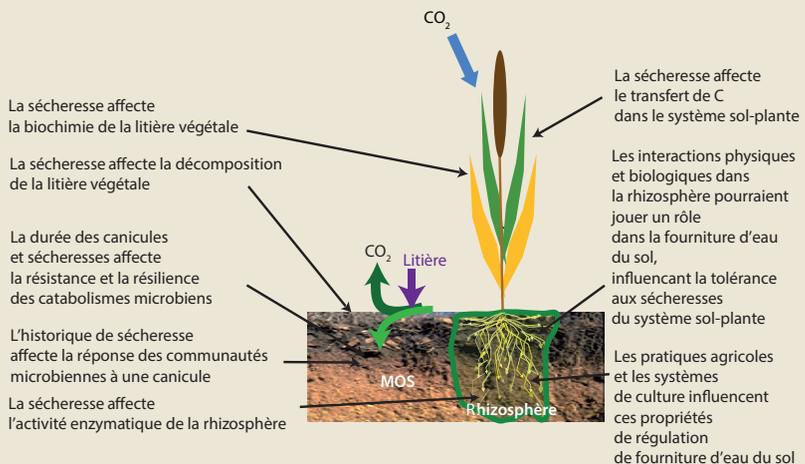


Figure 5.5. Sécheresses extrêmes et canicules, quels impacts sur le système sol-plante ?

La prise en compte de l'ensemble du système sol/plante et de ses interactions permet de mieux comprendre les effets des sécheresses et canicules sur les agrosystèmes, en lien avec le devenir du carbone et de l'eau dans le sol. MOS : matières organiques des sols.

sol) ces effets sur le continuum plante-sol, afin de caractériser des traits d'adaptation/tolérance à la sécheresse du système sol-micro-organismes-plante et de proposer des pratiques agricoles et environnementales novatrices pour atténuer ces impacts. À cet égard, la connaissance de l'impact des événements extrêmes de sécheresses et canicules sur la dynamique des matières organiques des sols (MOS) et le fonctionnement des communautés microbiennes en relation avec les plantes sont un enjeu essentiel au cœur des problématiques actuelles auquel le département EA tente de répondre.

En simulant en laboratoire ces événements extrêmes (sécheresse, température), nous avons montré que la durée de l'événement avait un impact sur la résistance et la résilience des fonctions microbiennes (avec des conséquences sur l'allocation en carbone au travers du quotient métabolique), avec un seuil au-delà duquel il n'y avait plus de résilience observée (voire même un effet négatif retard). Nous avons aussi constaté que le facteur température (comparé au facteur sécheresse) devenait de plus en plus prégnant avec la durée du stress, en particulier pour la composante fongique. Il semble, de plus, que l'historique de sécheresse influence la résilience des communautés microbiennes à un événement de type canicule (concept de *stress-induced community tolerance*). Au-delà des effets directs sur les micro-organismes, nos travaux ont mis en évidence que la sécheresse affectait tout le système sol-plante (figure 5.5). Par son effet sur la physiologie des plantes, elle impacte la composition des litières et leur décomposition** ainsi que l'exsudation racinaire. La sécheresse affecte également le fonctionnement microbiologique des sols par l'assèchement et par son effet sur le flux de carbone au sein des plantes. Les résultats montrent aussi une forte influence de la composition végétale : les mélanges incluant des légumineuses semblent mieux adaptés pour résister au manque d'eau. Plus récemment, c'est au niveau de la rhizosphère de plantes à valeur agronomique que nous nous focalisons pour comprendre les interactions physico-chimiques et microbiologiques en contexte de sécheresse et leurs conséquences sur la résistance de cultures aux déficits hydriques, dans une optique de gestion durable des pratiques agricoles (exemples sur plusieurs échelles : comparaisons spécifiques et variétales, inoculations en champs d'une bactérie PGPR, Plant Growth Promoting Rhizobacteria, successions de cultures/prairies). Nos travaux montrent que l'environnement rhizosphérique présente des propriétés microbiologiques (biomasse, activité catabolique), physico-chimiques (exopolysaccharides, EPS) et hydriques (rétention en eau) particulières, ayant un effet positif sur la résistance microbienne face à une perturbation de type canicule. Nos observations reflètent un possible effet « carbone » : la rhizodéposition, qui est associée à l'activité bactérienne, pourrait influencer les propriétés de rétention en eau de la rhizosphère. Ceci pourrait avoir des conséquences dans le maintien d'une alimentation hydrominérale favorable en cas de déficit.

* Jusqu'à 71 mm dans les Bouches-du-Rhône entre mai et octobre 2017, <http://www.observatoire-eau-paca.org>.

** Sanoullah M., Chabbi A., Girardin C., Durand J.K., Poirier M., Rumpel C., 2014. Effects of drought and elevated temperature on biochemical composition of forage plants and their impact on carbon storage in grassland soil.

Plant and Soil, 374, 767-778.

évolueront vers des variétés plus tardives à plus fort besoin. Ceci n'avait pas anticipé la sélection de variétés de maïs précoces non irriguées se développant depuis quelques années dans les sols du Lauragais.

S'appuyant également sur Stics, on peut mentionner des travaux menés par Françoise Ruget qui ont conduit au modèle ISOP, mis en place par le Service central des enquêtes et études statistiques (Scees) et prédisant de manière spatialisée les potentialités de production des petites régions fourragères en fonction du climat de l'année, des sols et des pratiques de gestion des prairies⁹¹.

91. Ruget F., Novak S., Granger S., 2006. Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, 186, 241-256.

Enfin, les scénarios climatiques fournis par les climatologues prévoyant non seulement une évolution tendancielle du climat, mais aussi un accroissement de la variabilité interannuelle, plusieurs unités du département ont entrepris des recherches portant sur les « événements extrêmes » (tempêtes, canicules...) sortant des conditions de validité des modèles existants (encadré 5.3).

► Adaptation au changement climatique

En 2014, le deuxième volume du 5^e rapport du GIEC a présenté une synthèse des connaissances sur les impacts du changement climatique, sur les questions d'adaptation ainsi que sur la vulnérabilité des écosystèmes naturels et de différents secteurs, y compris la production et la sécurité alimentaires. Bien que certaines régions puissent bénéficier, au moins à court terme, du changement climatique, la plupart en souffriront. Dans de nombreuses régions, une combinaison d'impacts différents pourrait exacerber les vulnérabilités (ex. : dans les régions du sud et du sud-est de l'Europe).

Il est acquis maintenant que l'adaptation est le complément nécessaire à l'atténuation, car l'atténuation à elle seule ne suffira pas à éviter les conséquences négatives des tendances climatiques actuelles. L'expression « adaptation au changement climatique » a été mentionnée pour la première fois par le GIEC dans son 2^e rapport d'évaluation publié en 1996. Dans son 5^e rapport publié en 2014, elle est définie comme « le processus d'ajustement au climat réel ou attendu et à ses effets. Dans les systèmes humains, l'adaptation vise à modérer ou à éviter les dommages ou à exploiter les opportunités bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'ajustement au climat attendu et à ses effets ». L'adaptation implique des changements dans les systèmes socio-écologiques en réponse aux impacts réels et attendus du changement climatique dans un contexte où celui-ci est en interaction avec des changements non climatiques. Les stratégies d'adaptation et les actions qui en découlent peuvent aller d'une adaptation à court terme à une adaptation à plus long terme et à des transformations plus profondes. Elles visent à atteindre plus que les seuls objectifs concernant le changement climatique, et peuvent ou non réussir à limiter les préjudices ou à exploiter les opportunités bénéfiques.

Au début des années 2000, on parlait peu d'adaptation au changement climatique dans les secteurs de l'agriculture et de la forêt. Après avoir cherché à réduire les émissions de GES, il est apparu que l'atténuation ne suffirait pas et qu'il fallait envisager une adaptation profonde du secteur agricole. Alors que de nombreux projets sur les impacts du changement climatique et la vulnérabilité de l'agriculture et des écosystèmes étaient déjà en cours, l'atelier de réflexion prospective (ARP) Adage (Adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés) fut lancé en 2009 par l'ANR sous la coordination de l'Inra (J.-F. Soussana). En se basant sur un état de l'art bibliographique et de l'expertise, Adage identifia les besoins en recherche dans le domaine de l'adaptation au changement climatique des écosystèmes naturels et anthropisés.

Le métaprogramme Accaf fut lancé par l'Inra en 2011 pour relever le défi de l'adaptation au changement climatique des cultures annuelles et pérennes, de l'élevage, des forêts, de la biodiversité, ainsi qu'en ce qui concerne la santé (plantes, animaux) et les ressources hydriques et du sol. Accaf a fortement bénéficié

des deux dynamiques Adage et Climator pour élaborer son cadre d'analyse et sa stratégie initiale.

Conformément à la définition large de l'adaptation donnée par le GIEC, Accaf vise à comprendre les effets combinés de divers changements globaux causés par le changement climatique sur l'agriculture et les milieux naturels. Le métaprogramme associe les aspects biologiques, écologiques, écophysiologiques, génétiques, biophysiques et socio-économiques de l'adaptation en favorisant des approches multidisciplinaires. Il considère les stratégies d'adaptation, leur cohérence avec les mesures d'atténuation ainsi que leurs conséquences environnementales et socio-économiques.

Le département EA s'est particulièrement mobilisé pour répondre aux appels à propositions lancés par Accaf, portant un tiers des projets (1^{er} département). Pour le département EA, le changement climatique n'est plus seulement un élément de contexte, mais il constitue un moteur de l'innovation et pose de nouvelles questions scientifiques sur la résilience des systèmes, la gestion du risque et la réponse des systèmes de culture aux stress multiples. Le département EA a répondu principalement par des travaux d'écophysiologie des stress hydriques et thermiques pour les cultures annuelles, les prairies semées, les arbres fruitiers et la vigne. La plupart des équipes d'écophysiologie s'y réfèrent explicitement dans leur positionnement scientifique. Des travaux sur la conception participative de systèmes de culture et d'élevage plus résilients face à la variabilité climatique ont été également lancés⁹².

En parallèle, les Programmes des investissements d'avenir (PIA) (ex. : Amazing, BreedWheat, PeaMust, Sunrise) ont permis d'accompagner des objectifs de sélection en phase avec des conditions climatiques jugées plus contraignantes dans le futur.

Pour le département EA, l'adaptation au changement climatique offre un cadre propice pour les recherches sur la conception, l'évaluation et le pilotage de systèmes agricoles multi-efficaces, car il permet d'intégrer les questions de vulnérabilité, de résilience, d'incertitude, de compromis...

Le métaprogramme Accaf a soutenu également le développement d'un partenariat international, qu'il s'agisse des modèles d'impact du changement climatique sur le rendement des cultures (réseaux internationaux d'intercomparaison des modèles AgMIP et Macsur) ou de la modélisation intégrée de l'utilisation des ressources en eau (projet Aicha en Inde).

Dans le département EA, la transition agroécologique a été identifiée comme le principal moteur des changements à l'œuvre, avec des conséquences sur les connaissances à produire, la manière de les produire (ex. : approches participatives) et les chantiers d'étude à lancer. L'adaptation au changement climatique est vue comme un objectif sur le long terme et peu comme une priorité en grandes cultures annuelles, excepté lorsque cela concerne la gestion de ressources en eau limitées. L'adaptation à la variabilité climatique (et plus généralement aux incertitudes causées par un marché globalisé) a été plus stimulante, conduisant à des études sur la robustesse et la résilience des systèmes de culture et de production. Par contre, dans certaines filières comme la production fruitière ou la vigne, le changement climatique est perçu comme une menace majeure pour la durabilité des productions, nécessitant des

92. Sautier M., Piquet M., Duru M., Martin-Clouaire R., 2017. Exploring adaptations to climate change with stakeholders: A participatory method to design grassland-based farming systems. *Journal of Environmental Management*, 193, 541-550.

adaptations spécifiques et s'appuyant autant sur les leviers génétiques et agronomiques que sur des procédés innovants de transformation des produits.

La question d'une meilleure adaptation au changement climatique des systèmes agroécologiques (dont l'agriculture biologique) par rapport aux systèmes conventionnels a émergé ces dernières années et mérite l'attention des agronomes. Elle se réfère au rôle de la diversité semée (mélanges, associations, rotations, etc.), à l'échelle du champ ou de la ferme, sur la disponibilité en ressources hydriques et minérales, sur les stocks d'inoculum de bioagresseurs, sur leurs interactions sur la production alimentaire et fourragère et sur la séquestration du carbone.

► Conclusion

Trois étapes, non disjointes, ont marqué la prise en charge des enjeux liés au changement climatique dans les recherches du département EA :

- le renforcement de travaux préexistants, sur la réponse des plantes au stress hydrique et thermique par exemple, avec un élargissement des conditions explorées pour étudier l'impact de conditions futures, mais sans modification fondamentale des questions de recherche traitées et en utilisant des approches expérimentales et des méthodologies classiques, plutôt à des échelles locales, bien maîtrisées au sein du département ;
- le développement d'outils d'observation et d'acquisition de données et de modèles adaptés aux changements d'échelles spatio-temporelles qu'impliquaient ces nouveaux enjeux ;
- le développement de recherches nouvelles et explicites sur l'impact, l'adaptation et l'atténuation.

L'existence d'un socle de compétences disciplinaires (ex. : en écophysiologie, en micrométéorologie, en géochimie) a permis des avancées rapides et dans certains cas remarquables sur des processus clés relatifs à la dynamique du C du sol, aux émissions de N₂O ou à la réponse des plantes à des stress hydriques et thermiques. De même, un savoir-faire préexistant en matière de modélisation (ex. : Stics) a facilité la mise en place de projets ambitieux répondant aux nouvelles questions posées (ex. : Climator). La fusion des trois ex-départements d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol a facilité la prise en charge de l'enjeu climatique qui suppose à l'évidence des approches pluridisciplinaires. Ce nouveau champ de recherche a amené plusieurs équipes à opérer des changements d'échelle, avec un déplacement vers des échelles spatiales larges. Il a aussi conduit à mettre en œuvre de nouvelles approches (simulations sous scénarios climatiques), à développer de nouvelles alliances, notamment avec les sciences de l'environnement, et à s'insérer dans des réseaux et projets internationaux (ex. : Global Research Alliance, GRA ; Joint Programming Initiative on Agriculture, Food Security and Climate Change, JPI-Facce). Plusieurs chercheurs du département ont ainsi contribué aux travaux du GIEC. L'enjeu du changement climatique a conduit à élargir la gamme des conditions abiotiques testées, à développer de nouvelles méthodes de coconception impliquant les acteurs et à intégrer davantage le risque et l'incertitude dans les travaux des agronomes. À l'évolution des échelles, des outils et des questions de recherche s'est ajoutée une implication croissante des chercheurs dans l'appui aux politiques publiques, ce qui a probablement également contribué au renouvellement des questions de recherche sur cet enjeu. Au niveau

international, les rapports du GIEC ont jalonné les travaux des chercheurs, constituant à la fois des incitations à publier sur le sujet et des références solides vu leur portée médiatique et leur exhaustivité, et contribuant de ce fait à une plus forte médiatisation des travaux des chercheurs au sein de larges arènes.

Bien qu'une analyse bibliométrique systématique manque pour l'affirmer plus fortement, les quelques éléments dont on dispose suggèrent que la dynamique de prise en charge de l'enjeu climatique par les chercheurs de l'Inra et du département EA a été synchrone avec celle de la communauté scientifique internationale (figure 5.3). Au sein de l'Inra et du département, l'appropriation de ce sujet a été progressive. Elle n'allait pas de soi, car elle ne s'inscrivait pas naturellement dans la trajectoire scientifique de l'institut et du département, plutôt orientée sur la prise en charge d'enjeux environnementaux locaux et plus spécifiquement liés à l'agriculture. Elle semble avoir résulté à la fois d'actions institutionnelles, auxquelles le département a fortement contribué (ex. : la Micces), et d'initiatives individuelles de chercheurs ayant perçu l'importance future de l'enjeu. L'atténuation des émissions de GES a fait l'objet d'un affichage dans les documents stratégiques du département avant l'adaptation. Bien que les recherches sur l'atténuation, l'impact et l'adaptation mobilisent des compétences disciplinaires et des communautés assez différentes, l'enjeu est désormais de concevoir et d'évaluer des systèmes agricoles à la fois moins émetteurs et adaptés au climat futur, tout en prenant en compte l'ensemble des autres évolutions souhaitées de l'agriculture. Là encore, le département EA dispose d'atouts indéniables pour y contribuer.

Pour en savoir plus

Brisson N., Levrault F., 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces, Livre vert du projet CLIMATOR*, Ademe Ed., 325 p.

Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvåg A.O., Seguin B., Peltonen-Sainio P. et al., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34, 96-112.

Pellerin S., Bamière L., Pardon L., 2015. *Agriculture et gaz à effet de serre. Dix actions pour réduire les émissions*, Éditions Quæ, 198 p.

Soussana J.-F., 2013. *S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires*, Éditions Quæ, 296 p.

Agriculture et qualité de l'air : recherche et appui aux politiques publiques

Sophie Générmont, Carole Bedos, Christophe Fléchar, Paul Robin, Melynda Hassouna, Pierre Cellier

La dégradation de la qualité de l'air ambiant, amorcée dès la révolution industrielle, s'est accentuée de manière exponentielle après le milieu du xx^e siècle. Dans les années 1970-1980, en Europe et en Amérique du Nord, la médiatisation des pluies acides à l'origine du dépérissement des forêts alerte l'opinion publique. La découverte du « trou » dans la couche d'ozone stratosphérique, même si elle ne relève pas directement de la qualité de l'air ambiant, a renforcé, vers la même période et à l'échelle planétaire, la prise de conscience — par les acteurs politiques et la société — de la fragilité et de la finitude de l'atmosphère. Plus récemment, ont émergé dans le débat public des problèmes liés à l'ozone troposphérique, aux particules fines et à des composés tels que les produits phytopharmaceutiques (ou pesticides). Au xxi^e siècle, il est admis que les impacts sur la santé humaine (maladies respiratoires, cardiovasculaires, nerveuses...), dus notamment à la pollution par l'ozone (O₃) et les particules fines (PM2.5), se traduisent par plusieurs millions de morts prématurées par an à l'échelle mondiale, et plusieurs dizaines de milliers en France.

Les premiers accords internationaux visant à résoudre le problème des pluies acides ont cherché à contrôler et à réduire les flux de pollutions transfrontalières, liés principalement à la combustion des énergies fossiles, avec comme première cible le dioxyde de soufre (SO₂), gaz d'origine industrielle. Après la forte décroissance des émissions de soufre consécutive aux mesures prises, l'azote réactif atmosphérique (NH_x et NO_x) devient l'agent principal d'acidification des écosystèmes en Europe. Les oxydes d'azote (NO_x) sont à leur tour réglementés, et des mesures techniques telles que les pots catalytiques sur les voitures permettent de réduire fortement ces émissions. En revanche, pour l'azote réduit, c'est-à-dire l'ammoniac (NH₃), polluant très spécifique de l'agriculture, il faut attendre le protocole

« multi-polluants » (concernant les oxydes de soufre, SO_x , NO_x , NH_x , les composés organiques volatils, COV) et « multi-effets » (acidification, eutrophisation, ozone) de Göteborg (1999)⁹³ pour que des plafonds d'émission nationaux soient imposés. Les impacts environnementaux du NH_3 , masqués jusqu'alors par la pollution acide industrielle, deviennent plus visibles, du fait des réductions des émissions de cette dernière, et ne concernent plus seulement l'acidification, mais aussi l'eutrophisation des écosystèmes, la perte de biodiversité, les émissions indirectes de protoxyde d'azote (N_2O), la formation de particules fines ($\text{PM}_{2.5}$), par combinaison avec les composés acides de l'atmosphère. Les années 1990 voient en parallèle la montée en puissance de la pollution photochimique à l'ozone (O_3).

D'après le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa), la contribution de l'agriculture aux émissions de polluants atmosphériques est indéniable et significative, allant de plus de 95 % pour l'ammoniac à 10-50 % pour les particules primaires selon leur granulométrie, et sans doute plus de 80 % pour les produits phytopharmaceutiques, polluants encore absents des normes nationales ou européennes sur l'air. Initialement masquée par les émissions des autres secteurs d'activité, l'agriculture voit son implication de plus en plus apparente en raison d'une relative maîtrise des émissions de ces autres secteurs, et avec pour conséquence des attentes de plus en plus fortes de réduction des émissions agricoles de la part de la société. Les émissions provenant des activités agricoles incluent également le méthane (CH_4 , puissant GES et aussi maillon important de la production d' O_3 troposphérique) provenant de l'élevage, et le N_2O (GES mais aussi principal destructeur anthropogénique de l' O_3 stratosphérique depuis la quasi-disparition des émissions de chlorofluorocarbures). Mais les cultures agricoles sont aussi le réceptacle de polluants atmosphériques et sont alors impactées en retour par ces dépôts atmosphériques : on estime l'impact négatif de l' O_3 sur les rendements des cultures de l'ordre de - 5 % à - 20 %, selon les cultures, ce qui se chiffre en millions de tonnes de pertes de récolte à l'échelle européenne.

► Une pollution d'origine agricole emblématique : les émissions d'ammoniac

Les recherches sur les liens entre la pollution de l'air et l'agriculture ne semblaient pas être une priorité pour les ministères en charge de l'Agriculture, de l'Environnement et de la Santé jusqu'à la fin des années 1990. Cependant, elles se déploient à l'Inra initialement au sein du département Bioclimatologie, avec une demande spécifique de la direction du département adressée à quelques équipes, assortie de soutiens internes à l'Inra et grâce à des programmes de recherche européens. La motivation ne concernait pas uniquement des questions de qualité de l'air, mais aussi des questions agronomiques : l'évaluation de ces émissions est en effet indispensable pour une meilleure maîtrise des cycles, en particulier celui de l'azote (voir chapitre 13).

La construction de cette thématique s'est fondée sur le cycle des polluants atmosphériques : émission, transfert des « sources » vers les « cibles » (air ou écosystèmes), transformations et impacts (figure 6.1). Les projets ont toujours mené de front des travaux en métrologie et en modélisation. Ils se sont déclinés sur toute

93. http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.html.

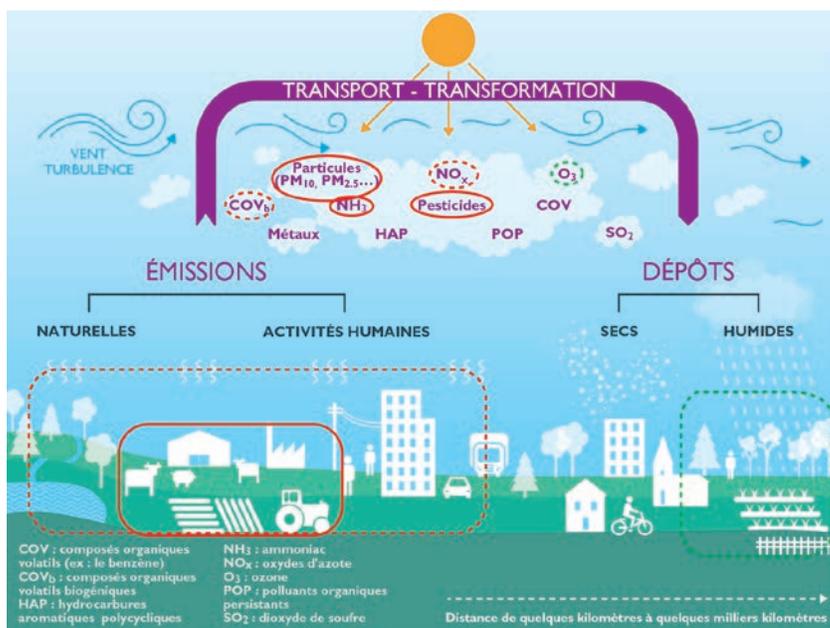


Figure 6.1. Cycle des polluants atmosphériques montrant la place des activités agricoles comme zone source de polluants (cadre rouge continu), dans leurs relations de proximité avec l'environnement rural ou urbain (cadre rouge pointillé) et comme zone impactée par les dépôts atmosphériques de polluants (cadre vert pointillé). Les principaux polluants concernant l'agriculture sont entourés de rouge (source) ou de vert (dépôt, impact).

une gamme d'échelles, en partant généralement de l'échelle de la parcelle pour aller, d'une part, vers des échelles plus fines (feuilles, surface du sol) avec des études de processus et, d'autre part, vers des échelles plus larges (paysage, région, pays), dans une perspective d'évaluation et de soutien aux politiques publiques.

Le polluant qui illustre le mieux la logique de cette démarche dans sa complétude est l'ammoniac, polluant emblématique des activités agricoles, en particulier de l'élevage. En effet, il ressort de la comptabilité des émissions établie tous les ans par le Citepa que, sur les sources d'ammoniac en France et en Europe provenant des activités agricoles, une grande majorité concerne les activités d'élevage (effluents en bâtiments, stockage, pâturage et épandage au champ), le reste provenant de la fertilisation minérale des cultures et des prairies. L'Inra s'intéresse à deux postes contributeurs aux émissions d'ammoniac : les bâtiments d'élevage et l'épandage au champ, les émissions au cours du traitement et du stockage des déjections étant traitées surtout par Irstea.

Estimer les émissions d'ammoniac

Les émissions d'ammoniac en agriculture, d'abord au champ, puis en bâtiments d'élevage, sont considérées à la fois comme des sources de pollution pour l'atmosphère et comme des pertes d'azote pour les agrosystèmes. En effet, tout le long de la chaîne allant des déjections animales jusqu'à l'absorption de l'azote par la plante, les quantités dissipées vers l'atmosphère sous forme d'ammoniac peuvent être du même ordre de grandeur que les pertes d'azote par lixiviation de nitrate.

Le pari des études lancées dans le département Environnement et Agronomie (EA) était que les compétences métrologiques et conceptuelles déployées jusqu'alors

sur l'étude des échanges d'énergie, de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone (CO_2), dans les sols et à l'interface sol-végétation-atmosphère, seraient transposables aux polluants atmosphériques, même présents en faible concentration (on parle à cette période de « gaz-traces »). Cependant, un saut important a dû être fait dans le domaine métrologique pour que les chercheurs puissent d'abord évaluer les concentrations de ces gaz-traces : concentrations pour NH_3 de l'ordre de 10^{-1} à 10^2 ppbv pour l'atmosphère ou de 1 à 30 ppmv dans les bâtiments (figure 6.2). Un saut de complexité supplémentaire a consisté à mesurer les flux d'émission depuis le sol et les cultures (et par la suite de dépôt), car ces flux sont faibles à très faibles (quelques grammes à kilogrammes par hectare et par jour), avec une grande variabilité liée aux conditions environnementales, aux pratiques agricoles, aux modes de gestion des effluents d'élevage et aux modes d'hébergement des animaux. Ces « sauts technologiques » ont pu être conduits en s'associant avec les communautés des chimistes de l'atmosphère et des biogéochimistes, tout en se positionnant assez spécifiquement sur la mesure des flux. Pour appréhender de manière complète la réalité agricole, il a fallu être capable de mesurer des concentrations et des émissions dans toute une gamme de situations (bâtiments, champ à différentes échelles, de la parcelle à des microparcelles de quelques mètres carrés, paysage), tout en contribuant à l'état de l'art de la métrologie dans ces domaines encore peu explorés par la recherche en France et absents des suivis conduits par les acteurs opérationnels (Aasqa⁹⁴, partenaires agricoles). Pour les émissions depuis les bâtiments d'élevage, la priorité a été donnée à une métrologie associant des mesures dans l'air à la quantification des défauts de bilan de masse : N mais aussi C et H_2O pour valider la mesure des débits d'air, et P et K pour valider la représentativité des échantillonnages d'aliments et d'effluents et des modèles de calcul de la rétention corporelle des animaux. Ces méthodes ont été mises au point et évaluées en conditions contrôlées, puis en station expérimentale et en conditions d'élevage.

Pour ce qui concerne la modélisation des émissions au champ après application d'engrais minéraux ou de produits organiques (lisiers, fumiers, composts, etc.), les choix se sont faits dans la tradition, bien présente dans les départements de Science du sol et de Bioclimatologie, de modèles mécanistes de transfert d'eau et de chaleur dans les sols et les couverts végétaux. Ont été adjoints, d'une part, des modules d'équilibres physico-chimiques de l'azote ammoniacal et, d'autre part, des modules de transfert vers l'atmosphère englobant toute la gamme des tailles de parcelles expérimentales, du mètre carré à plusieurs hectares. Ces travaux ont donné lieu à un modèle, Volt'Air⁹⁵ (encadré 6.1), qui permet d'estimer la dynamique fine des émissions d'ammoniac en prenant en compte les conditions de sols et de climat, ainsi que des pratiques agricoles visant à réduire les émissions. Ce modèle est devenu



Figure 6.2. Système de mesure de gradient de concentrations en ammoniac au-dessus d'une culture, en vue de mesurer des flux d'émission ou de dépôt. L'instrument de mesure Rosaa (Robust and Sensitive Ammonia Analyser) a été développé avec le soutien du département EA.

94. Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air ; les Aasqa sont regroupées au sein de la Fédération Atmo-France.

95. <https://www6.inra.fr/basc/Recherche/Modeles/Volt-Air>.

Encadré 6.1. Volt'Air, un modèle pour simuler la volatilisation d'ammoniac ou de produits phytopharmaceutiques après application au champ

Le modèle Volt'Air a pour principal objectif de simuler les flux de volatilisation d'ammoniac après épandage sur sol nu de fertilisants organiques (lisiers, fumiers, etc.) ou minéraux (ammonitrate, urée, solution azotée), ainsi que la volatilisation des produits phytopharmaceutiques, avec éventuellement un travail du sol et/ou une irrigation. Il prend en compte de manière modulaire les principaux facteurs d'influence de deux compartiments distincts — le sol et l'atmosphère : la description explicite des processus impliqués dans le sol (équilibres entre les différentes formes chimiques, transferts dans le sol, les puits et les sources) permet le calcul de la concentration du composé en phase gazeuse à l'interface entre le sol et l'atmosphère ; la description des processus dans l'atmosphère permet, à partir de cette concentration, le calcul du flux de volatilisation. Grâce à un constant travail d'amélioration, doublé d'une démarche de validation par confrontation à des jeux de données expérimentaux acquis spécifiquement dans cet objectif, le domaine d'application de Volt'Air est progressivement étendu (diversification des intrants, des pratiques, des contextes pédoclimatiques, etc.). Il est utilisé pour améliorer la prise en compte des facteurs agroenvironnementaux dans les inventaires nationaux d'émissions, évaluer les techniques et stratégies de réduction des pertes par volatilisation et générer des fonctions ou des modèles simples à intégrer dans des bilans environnementaux, des modèles d'échelles larges et des outils d'aide à la décision, grâce à des approches de métamodélisation par exemple. Le couplage de Volt'Air avec un modèle sol-végétation-atmosphère permet la prise en compte des interactions avec le couvert végétal et leurs effets sur la dynamique et l'amplitude des émissions. Son couplage avec un modèle de dispersion et dépôt à courte distance permet, d'une part, d'évaluer les impacts des émissions sur les écosystèmes non cibles (ex. : étendues d'eau) et, d'autre part, de calculer des émissions nettes à l'échelle d'un territoire et/ou d'une maille des modèles de prévision de la qualité de l'air.

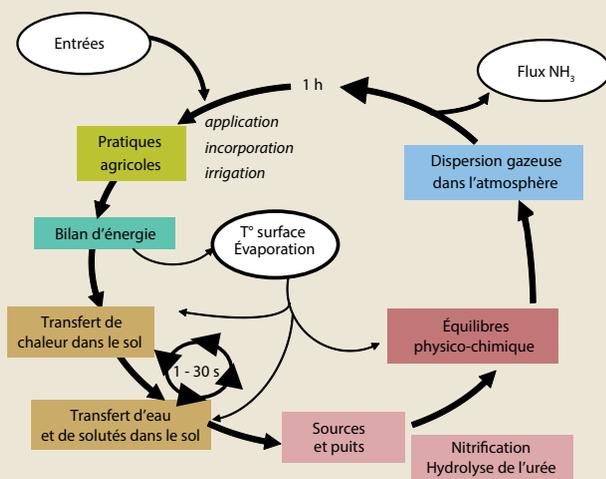


Figure 6.3. Schéma descriptif de l'enchaînement des différents modules du modèle Volt'Air.

un identifiant fort de la contribution de l'Inra à la recherche sur l'ammoniac aux niveaux national et européen. Il a été utilisé pour l'évaluation de pratiques de réduction des émissions et a été étendu au cas des produits phytopharmaceutiques.

En bâtiments d'élevage, la modélisation des émissions s'est heurtée à la difficulté de caractériser les pratiques d'élevage et la gestion des effluents. En développant

des modèles basés, comme pour la métrologie, sur les bilans de masse et d'énergie, puis en y ajoutant une représentation du devenir de l'azote, des modèles adaptés à la diversité des situations rencontrées sur le terrain ont été élaborés (encadré 6.2).

Les questions sur la qualité de l'air couvrent des échelles qui vont du local au global, et les politiques publiques se déclinent à des échelles plus larges que la région. Il était donc essentiel de s'engager sur la voie de la spatialisation des émissions d'ammoniac. Ce travail a d'abord été réalisé sur une partie du Royaume-Uni, puis à l'échelle de la France entière, pour développer un outil de cartographie d'émission à partir du modèle Volt'Air. Ce type d'approche vise à mieux prendre en compte les caractéristiques locales et les pratiques agricoles dans les cadastres d'émission⁹⁶ pour améliorer la prévision de la qualité de l'air, mais aussi à évaluer les variations spatiales et temporelles des émissions depuis l'échelle infrarégionale jusqu'à l'échelle nationale et à décliner des scénarios d'émissions en réponse au changement climatique ou à des modifications des pratiques ou de l'usage des sols.

Encadré 6.2. Les modèles d'émissions des bâtiments d'élevage

La modélisation d'une salle d'élevage pour la durée d'un lot d'animaux a pour objectif de représenter les flux de masse et d'énergie, et par conséquent les émissions, sous la dépendance du climat, du métabolisme animal et des spécificités constructives du bâtiment. La représentation comprend un volet spécifique aux animaux (croissance et rétention corporelle, effectif dans le bâtiment en fonction de la mortalité, des départs vers l'abattoir et/ou des sorties vers un parcours extérieur), un volet spécifique au bâtiment (équilibre thermique, ventilation, équipements de chauffage, refroidissement et récupération de chaleur) et un volet spécifique aux effluents (modèle Moldavi, figure 6.4). Le modèle est utilisé pour comparer des scénarios et évaluer l'effet de différentes combinaisons de processus (ex. : interaction entre un changement d'aliment et un changement de mode d'abreuvement sur l'émission d'ammoniac d'un élevage de poulets de chair).

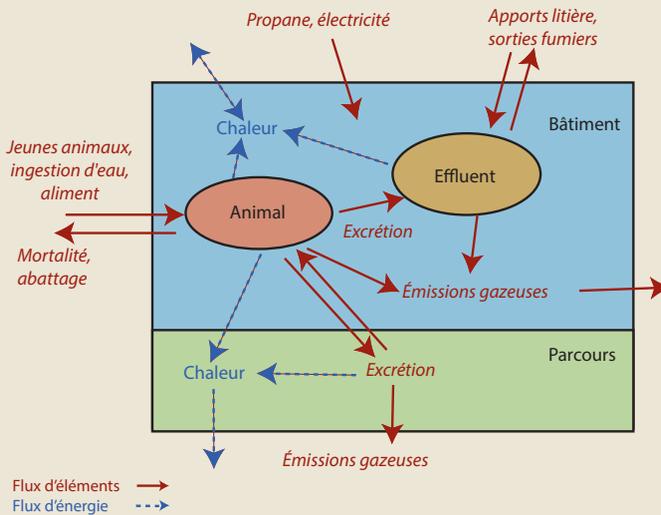


Figure 6.4. Moldavi : modélisation des émissions d'un bâtiment d'élevage avicole.

96. Cadastre d'émission : cartes donnant les émissions d'un polluant atmosphérique, projetées sur une grille régulière et servant de condition à la limite inférieure des modèles de prévision de la qualité de l'air.

La représentation détaillée des processus de transformation des rejets animaux dans les fumiers a été initiée à travers la modélisation des émissions au cours du stockage des fumiers (modèle Megasmoc, figure 6.5). Les processus représentés intègrent les bilans de masse et d'énergie. Ils permettent de calculer la stabilisation de la matière organique et les émissions gazeuses pour la diversité des fumiers observés en élevage à partir de caractéristiques disponibles en élevage (composition, volume) et pour une série climatique connue (température, humidité, pluviométrie). Ce modèle peut être utilisé pour pronostiquer les émissions de différentes alternatives de stockage des fumiers ou pour extrapoler des mesures d'émissions à des situations voisines.

Ces deux types de modèles peuvent également être mobilisés pour optimiser le choix de protocoles expérimentaux dans le but de réduire l'usage des animaux domestiques pour les besoins de la recherche.

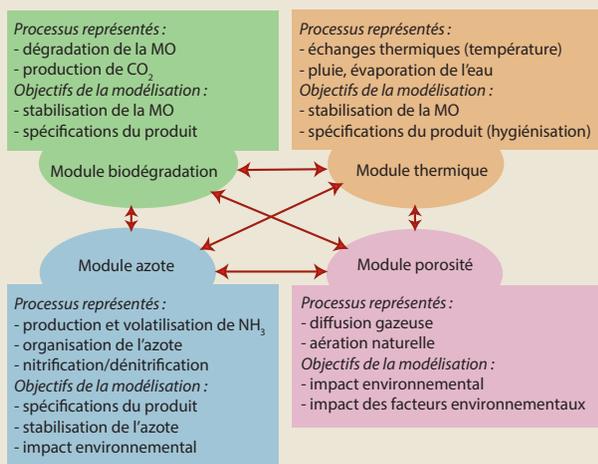


Figure 6.5. Megasmoc : modélisation des émissions gazeuses et de la stabilisation de la matière organique au cours du stockage/compostage des fumiers. MO : matière organique.

Connaître les devenir de l'ammoniac émis

Une part non négligeable de l'ammoniac émis au champ ou dans les bâtiments, sources toutes proches de la surface, est dispersée dans la basse atmosphère, et le panache de dispersion traverse les écosystèmes voisins. Une part importante peut être alors absorbée par la végétation, ce qui va la fertiliser ou affecter l'écosystème (acidification, biodiversité) si les dépôts sont élevés.

La question des échanges végétation-atmosphère a été traitée dans un cadre conceptuel unique, quelle que soit la distance à la source et la concentration en ammoniac dans l'atmosphère. Le choix a été de mobiliser, en les adaptant, les approches classiques utilisées en bioclimatologie, fondées sur les modèles à résistance aux transferts, dans des modèles de couvert végétal à deux couches afin de distinguer le sol de la végétation. Comme pour Volt'Air, ces modèles ont été complétés par des approches prenant en compte les interactions chimiques à la surface (cuticules, sol) et le métabolisme de la plante. Cela a nécessité d'aller vers des échelles plus fines, mobilisant des concepts en physiologie et écophysiologie de la plante, pour mettre au point un modèle original de point de compensation stomatique qui permet, en simulant la concentration interne de la plante en azote

Encadré 6.3. Le projet BTEP : caractériser les émissions d'ammoniac en élevage bovin laitier sur toute la chaîne de gestion

En France, 42 % des émissions d'ammoniac (NH_3) proviennent des élevages bovins laitiers et allaitants. Dans le cadre des mesures proposées pour réduire les émissions gazeuses en élevage, il est nécessaire de prêter attention à leur faisabilité tant du point de vue de leur efficacité environnementale que de leur pertinence par rapport aux conditions de productions et de veiller à éviter les transferts de pollution d'un poste d'émission à l'autre. Le projet BTEP (bâtiment, traitement des effluents, épandage et pâturage), qui s'est déroulé de 2013 à 2017 (financé par l'Ademe, coordonné par l'Institut de l'élevage, impliquant trois partenaires Inra et un partenaire Irstea), visait à quantifier les facteurs d'émission de NH_3 sur toute la chaîne de gestion des déjections sous l'effet de trois stratégies de conduite alimentaire contrastées (100 % en bâtiment et alimentation maïs ; 100 % en bâtiment et affouragement en vert ; 100 % au pâturage).

Le projet s'est déroulé sur l'installation expérimentale Inra de production laitière de Méjusseau, près de Rennes, avec, pour les mesures au bâtiment, deux salles d'élevage conduites en étable libre sur litière paillée accumulée. Ces salles expérimentales ont la particularité de permettre un suivi précis de l'alimentation de 3 à 5 vaches laitières, de posséder une ventilation dynamique constante et de gérer précisément la température ambiante ; les flux de NH_3 ont été mesurés par bilan de masse entre l'air extérieur (entrant) et l'air sortant qui s'est chargé en NH_3 .

Les émissions par le stockage du fumier issu des salles d'élevage ont été mesurées par la méthode des chambres dynamiques disposées sur un tas de fumier placé périodiquement sous une serre ventilée. La mesure des émissions de NH_3 consécutives à l'épandage des fumiers a été réalisée en conditions contrôlées dans le cadre de deux dispositifs indépendants, permettant de confronter les résultats issus de la méthode des tunnels de ventilation mise en œuvre par Irstea et ceux du dispositif d'incubation en conditions entièrement contrôlées développé à l'Inra-EcoSys.

Un volet méthodologique important a consisté enfin à mettre au point un protocole de mesure de la volatilisation d'ammoniac adapté au pâturage des bovins. Plusieurs systèmes de mesures micrométéorologiques ont été déployés pendant deux phases de pâturage et également en conditions de fond, allant de systèmes de tubes à diffusion à la mesure des gradients verticaux par l'analyseur Rosaa développé à Grignon, et à la mesure des gradients horizontaux (concentration en amont et sous le vent de la parcelle) avec des capteurs optiques Mini-DOAS en collaboration avec l'équipe d'Agroscope Reckenholz (Zürich).

L'ensemble de ces mesures a permis d'appréhender de manière plus fine les processus et les facteurs d'émission du système très complexe que représente une exploitation laitière typique de l'ouest de la France, avec alternances bâtiment-pâturage et différentes sources d'alimentation et d'émission, selon la période de l'année.

ammoniacal, d'évaluer un potentiel d'émission ou d'absorption d'ammoniac par la plante. Il est ainsi possible de simuler des flux bidirectionnels, la plante pouvant être, selon son niveau de nutrition azotée, le microclimat et le niveau de pollution, une source ou un puits d'ammoniac.

Concernant la question de la dispersion atmosphérique, l'approche s'est largement fondée sur les modèles micrométéorologiques de simulation des transferts turbulents, couplés avec des modules de dépôt développés spécifiquement pour l'ammoniac. L'objectif était de prendre en compte la complexité des transferts et des interactions au-dessus et dans le couvert végétal conduisant à des dépôts pouvant être très élevés près de la source (plusieurs dizaines de kg/ha) et se réduisant rapidement lorsqu'on s'en éloigne. Ces modèles évaluent les apports aux écosystèmes voisins

depuis une source délimitée (champ, bâtiment) et les impacts possibles résultant de ces dépôts. Ils permettent également de réaliser des bilans nets (émission de la source dont on soustrait la recapture à proximité, ce qui donne des informations sur les quantités qui vont vraiment contaminer l'atmosphère) en prenant en compte les caractéristiques des sources, des écosystèmes cibles et des conditions météorologiques.

Les concepts utilisés relèvent de la micrométéorologie et de la bioclimatologie, mais aussi de l'écophysiologie. Les sorties de ces modèles intéressent également directement l'agronomie (azote récupéré à proximité des sources), l'écologie (impacts) et l'évaluation environnementale. Leur originalité a permis à l'Inra de bien se positionner aux niveaux national et européen sur la problématique du cycle de l'ammoniac atmosphérique.

Les émissions d'ammoniac ne sont que l'une des composantes des flux d'azote réactif dans les systèmes agricoles, à côté des apports d'engrais azotés minéraux et organiques et des autres pertes vers l'environnement sous forme de nitrate, de protoxyde d'azote, d'oxydes d'azote et d'azote organique dissous. De plus, ces pertes gazeuses peuvent conduire à des transformations chimiques, induisant d'autres impacts, et à des émissions indirectes de GES (N_2O) ou d'autres polluants atmosphériques (NO_x , NH_3) ou des eaux. Il est donc apparu rapidement nécessaire d'intégrer les données acquises et les modèles dans des approches plus larges du cycle de l'azote. Des modules simplifiés de volatilisation d'ammoniac ont d'abord été intégrés dans des modèles de culture à l'échelle de la parcelle. Puis, afin de prendre en compte les interactions spatiales, notamment celles qui conduisent aux émissions indirectes⁹⁷ de N_2O , des modèles de transfert d'azote à l'échelle du paysage (quelques kilomètres carrés) ont été élaborés avec des agronomes et des hydrologues du département.

► La complexité de la pollution atmosphérique vue du côté de l'agriculture

Ainsi, le département de Bioclimatologie de l'Inra s'est emparé au début des années 1990 de la question de la contribution de l'agriculture aux émissions de composés gazeux polluants en s'intéressant d'abord à l'ammoniac (NH_3). C'est aussi à cette époque que l'Inra s'attelle à la caractérisation des émissions de composés azotés à effet de serre, comme le protoxyde d'azote (N_2O), d'abord dans le département de Science du sol, puis dans celui de Bioclimatologie. La dimension pluridisciplinaire de cette thématique s'exprime dès son émergence, avec l'implication conjointe des départements Agronomie (Rennes) et Bioclimatologie (Rennes et Grignon) et diverses collaborations aux niveaux national et européen. Ces démarches complémentaires sont en grande partie fondées sur la modélisation et les développements météorologiques et associent des concepts de bioclimatologie et de la science du sol, mais également de l'écophysiologie végétale, voire de la physiologie. Des apports à l'agronomie et aux sciences de l'atmosphère ont permis de construire des démarches cohérentes et englobantes des cycles des polluants atmosphériques d'origine agricole, de la parcelle à la région.

97. Les émissions indirectes sont celles qui se produisent en dehors des zones où des engrais ont été appliqués, dans des endroits où l'azote réactif est arrivé par voie atmosphérique ou hydrologique suite par exemple aux pertes d'ammoniac ou de nitrate dans les zones cultivées.

Une multiplicité de composés et de processus

À partir du socle de compétences en métrologie et en modélisation construit autour de l'ammoniac, les recherches sur la qualité de l'air dans le domaine agricole ont été étendues à d'autres composés contribuant à la pollution de l'air. Les approches développées sur les émissions et les échanges sol-végétation-atmosphère, tant du point de vue expérimental (méthodes micrométéorologiques, méthodes de chambres) que de la modélisation (modèles de transfert à résistance, incluant la résistance stomatique et le lien au métabolisme de la plante ; modélisation au sein des bâtiments d'élevage), ont été étendues aux cas d'autres polluants atmosphériques, d'origine agricole ou non. Cette extension visait à traiter la question de la pollution de l'air dans sa globalité dans le domaine de l'agriculture sous ses différentes formes et pour considérer ses liens avec d'autres problèmes environnementaux tels que la qualité des eaux et le climat.

Dès la toute fin des années 1990, à la suite des travaux sur le NH_3 et le N_2O , des travaux sur les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) par les sols ont été initiés. Ces émissions étaient en effet mal prises en compte dans les cadastres d'émission utilisés par les modèles de prévision de la qualité de l'air, alors qu'elles jouent un rôle majeur comme précurseur d'ozone dans les zones rurales. Il faut noter que ces études sont difficilement dissociables de celles sur le protoxyde d'azote N_2O , les NO_x étant produits par les mêmes processus microbiens (la nitrification et la dénitrification), impliquant alors la science du sol, et notamment la microbiologie du sol. À la charnière des années 1990 et 2000, des travaux ont été ensuite engagés sur le passage vers l'atmosphère des produits phytopharmaceutiques. La prise en compte scientifique de ces questions par l'Inra a largement bénéficié, voire a vu le jour grâce à des collaborations favorisées par la réunion au sein du département EA des équipes de bioclimatologie et de science du sol de Grignon.

Après 2015, cette prise en considération s'est poursuivie par la quantification des émissions de COV depuis les cultures, les produits résiduels organiques, les sols et l'élevage, notamment en bâtiment. C'est assez récemment que l'intérêt s'est porté sur les processus de production chimique d'aérosols minéraux ou d'aérosols organiques secondaires à partir des composés gazeux d'origine agricole comme les NO_x , le NH_3 , les COV dans un environnement plus ou moins contaminé, typiquement en milieu périurbain.

L'extension du champ des recherches a concerné ensuite, au début des années 2000, des travaux sur les dépôts d'ozone et leurs impacts sur les cultures, notamment en termes de baisse de rendements ou de puits de GES. Ces travaux s'intéressent tout à la fois à des processus écophysiologiques à des échelles très fines (détoxication au sein de la plante) et à des indicateurs globaux de dépôt et d'impact.

Enfin, une particularité des recherches du département EA est le développement de modèles de dépôt sec sur les surfaces terrestres et de modèles d'échanges bidirectionnels de polluants destinés notamment à être inclus dans des modèles atmosphériques locaux (voisinage de la source) jusqu'à continentaux.

La dimension territoriale des pollutions

L'évaluation des impacts des polluants émis par les activités agricoles demande de faire le lien entre les sources, origines des polluants, et les puits, zones où se manifestent les impacts. Ces émissions polluantes se produisant à la surface du sol ou à faible hauteur (bâtiments d'élevage), la question du devenir des composés

émis se pose particulièrement à proximité des sources, sur des distances de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres. L'approche développée à l'échelle locale pour modéliser la dispersion atmosphérique et le dépôt d'ammoniac, approche plus spécifique du département Bioclimatologie (transfert convectif aérien, modèles de dépôt gazeux), a été progressivement étendue à d'autres composés, à savoir les particules biotiques (dissémination de pathogènes et de pollens) et les produits phytopharmaceutiques. Puis cette démarche a été appliquée à l'échelle du paysage en considérant simultanément l'ensemble des voies d'émission, les transformations, la dispersion et les dépôts des composés étudiés, et le couplage avec les transferts équivalents dans le compartiment hydrique, ainsi que le fonctionnement des écosystèmes semi-naturels ou cultivés (figure 6.6.). Les outils intégratifs construits pour l'évaluation environnementale des pratiques agricoles ont été développés grâce à l'association de compétences en métrologie et en modélisation, mais aussi de disciplines couvrant les différents compartiments concernés (sols, cultures, climat, hydrologie, exploitation agricole, etc.).

Dans le contexte de la cascade de l'azote (voir chapitre 13), ils ont été obtenus par couplage de modèles de gestion de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole, de modèles de culture (incluant les transformations biogéochimiques de l'azote dans le sol et la plante) et de modèles de transfert par voie atmosphérique d'ammoniac ou hydrologique (nitrate). Ces modèles de paysage permettent de tester et d'évaluer l'efficacité d'aménagements à des échelles plus larges que celle de la parcelle. Les mêmes approches sont en cours de développement pour les produits phytopharmaceutiques.

L'évaluation des pollutions à large échelle

Les travaux de spatialisation des émissions de polluants d'origine agricole ont été initiés dès le milieu des années 2000, sur la lancée des travaux menés sur la spatialisation des émissions de composés contribuant au réchauffement climatique (CO_2 , N_2O). L'approche commune menée, tant pour la pollution de l'air que pour les GES, consiste à combiner les données géoréférencées sur les sols, le climat et les pratiques culturales avec des modèles biophysiques décrivant les processus conduisant aux émissions d'un composé, et prenant donc en compte les principales composantes de leur variabilité temporelle et spatiale (voir chapitre 9). Elle associe donc des compétences en agronomie, science du sol et bioclimatologie, mobilisant fortement bases de données et modélisation. Les premières études utilisant un modèle de culture avec des sorties environnementales portaient sur les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) en Île-de-France, milieu fortement anthropisé dont la source principale de pollution est le trafic routier en zones urbaines et périurbaines, puis les sols agricoles dès qu'on s'en éloigne. Ce n'est qu'un peu plus tard que les études porteront sur l'ammoniac, en mobilisant cette fois l'utilisation du modèle Volt'Air pour développer un outil de calcul de cadastre d'émission d'ammoniac évoqué plus haut. Leur implémentation dans des modèles de chimie-transport (typiquement Chimere, développé et utilisé par l'IPSL⁹⁸ et l'Ineris⁹⁹ pour la recherche et la prévision opérationnelle de la qualité de l'air) vise à améliorer la prédiction de la qualité de l'air. Elle doit aussi permettre une évaluation de la mise

98. IPSL : Institut Pierre Simon Laplace.

99. Ineris : Institut national de l'environnement industriel et des risques.

en œuvre de pratiques agricoles visant à la réduction des émissions tant sur le niveau de pollution de fond que sur les pics de pollution. Le principal verrou à un déploiement des modèles est la disponibilité des données sur les pratiques de fertilisation ou de protection des cultures. Le développement des systèmes d'information à l'Inra devrait pallier ces difficultés à moyen terme.

Par ailleurs, les travaux du département EA ont été utilisés dans les analyses environnementales de type analyse du cycle de vie (ACV) pour calculer non seulement les émissions directes, mais aussi les émissions indirectes.

Des collaborations scientifiques intenses

La thématique des pollutions de l'air d'origine agricole s'est largement développée, à l'Inra, avec la participation à des projets européens concernant d'abord l'ammoniac (Graminae¹⁰⁰), puis, plus généralement, l'azote (NitroEurope¹⁰¹). Elle s'est ensuite élargie à l'ensemble des polluants concernant l'agriculture

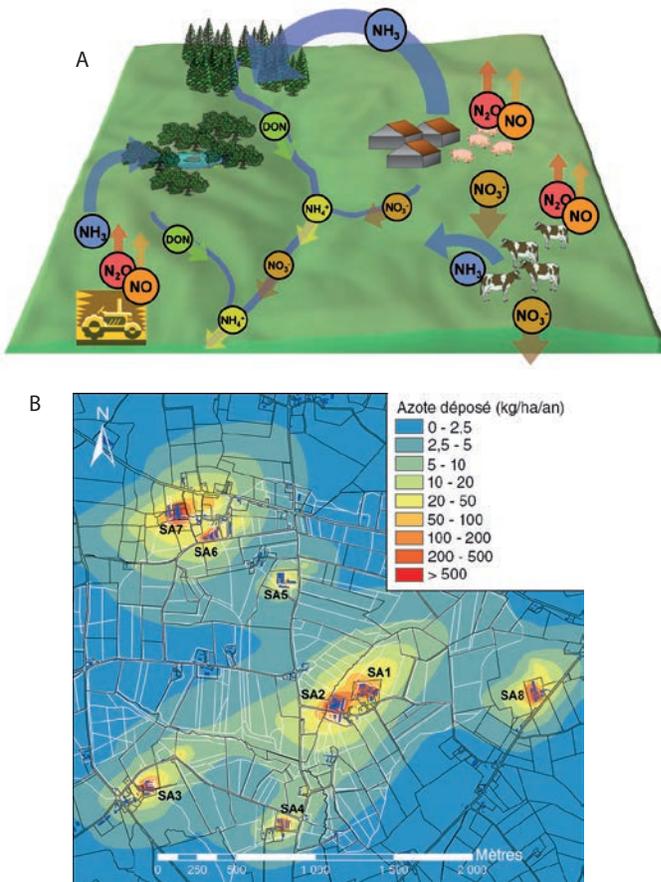


Figure 6.6. (A) Transferts d'azote par voies atmosphérique, hydrologique et anthropique (gestion agricole) dans un paysage rural. (B) Quantités d'azote atmosphérique déposées depuis les bâtiments d'élevage au sein d'un paysage agricole.

100. https://www.cordis.europa.eu/project/rcn/45694_en.html.

101. www.nitroeuropa.eu/.

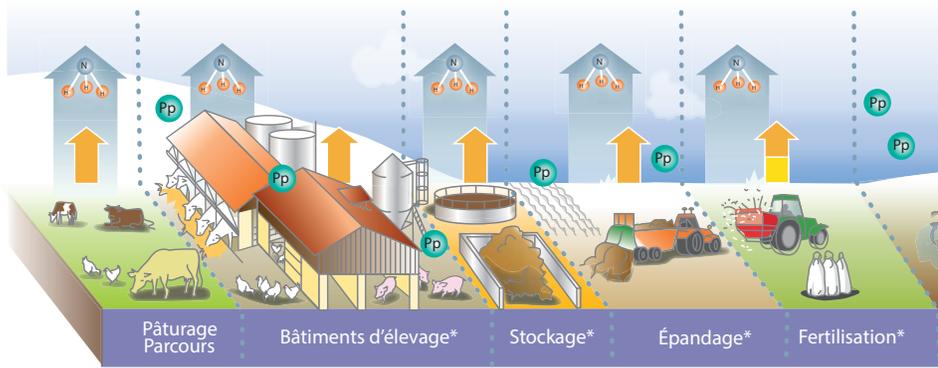


Figure 6.7. Les sources agricoles de polluants (Ademe, 2012).

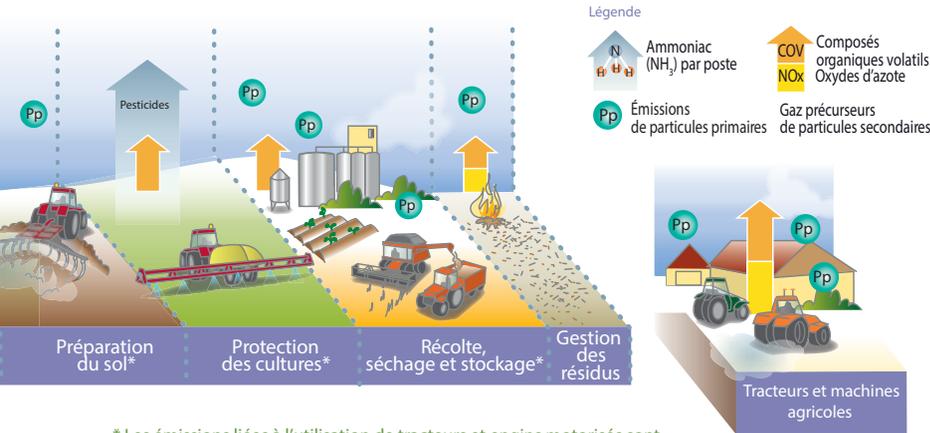
(Accent-NoE¹⁰², Eclairé¹⁰³). Ces projets ont permis une insertion rapide dans la communauté scientifique européenne, sans doute la plus en avance au niveau mondial à la fin du xx^e siècle. Il a fallu trouver dans ce paysage les niches que les spécificités de l'Inra pouvaient occuper. C'est surtout dans le domaine de la modélisation mécaniste des émissions et de la dispersion/dépôt que l'Inra a pu valoriser ses atouts. Au sein de l'Inra, les départements Phase (émission en élevage, au bâtiment et au champ) et EFPA (impact de l'ozone sur les forêts) ont investi significativement le domaine de la qualité de l'air, avec toutefois moins d'ampleur que le département EA.

Un deuxième milieu fondateur de cette thématique à l'Inra se situe au sein de la communauté scientifique française, avec, dès la fin des années 1990, la participation aux conseils scientifiques de programmes de recherche sur la qualité de l'air du ministère de l'Écologie, de l'Ademe et du CNRS (programme de recherche inter-organismes pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale, Primequal¹⁰⁴, programmes nationaux de l'Institut national des sciences de l'univers, INSU, sur la chimie atmosphérique, PNCA/LEFE-CHAT). La place de la problématique agricole a cru en importance dans les programmes du ministère de l'Écologie et de l'Ademe, d'abord par l'inclusion des volets concernant les écosystèmes et l'agriculture, jusqu'à un programme spécifique sur l'agriculture et la qualité de l'air en 2016. Dans les programmes nationaux du CNRS, un volet Interaction surface-atmosphère a pris en compte de plus en plus explicitement l'agriculture. Les projets conduits dans ces programmes se sont traduits par le développement de collaborations étroites avec les laboratoires universitaires et ceux du CNRS ou de l'Ineris impliqués dans l'étude de la chimie atmosphérique, mais également avec l'École des hautes études en santé publique (Rennes) et Irstea en ce qui concerne l'émission de produits phytosanitaires. Dans le cas des bâtiments d'élevage, une dynamique scientifique s'est appuyée sur un partenariat entre les départements EA et Phase, et le CNRS-Université de Rennes, pour initier des recherches sur les émissions

102. https://cordis.europa.eu/project/rcn/74255_en.html.

103. https://cordis.europa.eu/result/rcn/92971_fr.html.

104. <http://www.primequal.fr/pages/public/index.php>.



* Les émissions liées à l'utilisation de tracteurs et engins motorisés sont synthétisées dans la case de droite « Tracteurs et machines agricoles ».

d'ammoniac en conditions contrôlées. Une autre dynamique, dont le département EA est un pivot, mobilise l'Inra, le Cirad, les instituts techniques et des chambres d'agriculture pour développer des méthodes appropriées aux études en conditions de production réelles en bâtiment.

Une contribution au développement agricole et aux politiques publiques

En parallèle, au début des années 2000, émerge la prise de conscience par les acteurs agricoles (instituts techniques, chambres d'agriculture) et institutionnels (Ademe, ministères, régions avec les plans régionaux pour la qualité de l'air) de l'importance de la pollution de l'air dans le domaine agricole. Cette préoccupation commençait alors à dépasser la question des impacts sur les cultures ou la forêt et l'environnement (écosystèmes, climat) pour s'étendre aux impacts sanitaires liés aux émissions agricoles de particules, de produits phytopharmaceutiques et de précurseurs d'ozone.

Des liens privilégiés se sont tissés avec l'Ademe, qui a identifié les activités agricoles comme importantes émettrices de polluants atmosphériques dès la fin des années 2000. Cette agence a souvent favorisé les interfaces entre la recherche à l'Inra et les partenaires agricoles (instituts techniques, chambres d'agriculture). Elle a notamment sollicité l'Inra pour réaliser des synthèses ciblées (« Particules », « Émission de pesticides vers l'air » (figure 6.7 ; encadré 6.4). Souvent par l'intermédiaire de l'Ademe, les relations avec les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement, très marginales dans les années 1990, se sont développées selon différentes voies : expertises sur des questions spécifiques à l'agriculture (Corpen, Écophyto) ou au niveau international (ex. : Task Force on Reactive Nitrogen, TFRN¹⁰⁵), programmes de recherche (ex. : le programme Pesticides du ministère de l'Environnement, ou les programmes Casdar du ministère de l'Agriculture).

Les relations avec les instituts techniques et les chambres d'agriculture se sont rapidement renforcées à partir de la fin des années 1990, avec notamment des demandes fortes d'expertises, d'appui et de transferts de compétences, notamment en métrologie. Les projets Casdar du ministère en charge de l'Agriculture, puis les

105. <http://www.clrtap-tfrn.org/>.

Encadré 6.4. Les produits phytopharmaceutiques et l'atmosphère

La présence de produits phytopharmaceutiques (PPP) dans l'atmosphère est une source de préoccupation croissante des citoyens et des pouvoirs publics. Les premières données de concentrations en PPP dans l'atmosphère en France émanent d'équipes de recherche dès la fin des années 1990 et des Aasqa au début des années 2000. De son côté, l'Inra s'est penché sur la compréhension des émissions par volatilisation depuis la toute fin des années 1990, les transferts par dérive étant étudiés à Irstea. L'intérêt s'est accru dans les années 2010, comme en témoigne notamment l'expertise Anses (2017), mais également une demande à l'Inra de la part de l'Ademe en 2015 pour réaliser une synthèse bibliographique sur les émissions de produits phytosanitaires dans l'air. Il s'agissait en particulier de faire une synthèse des facteurs d'émissions (FE) existants ou d'outils qui pourraient permettre de les déterminer, d'identifier des leviers d'action pour limiter ces émissions et de proposer des perspectives de recherche. D'après cette synthèse, menée en collaboration avec Irstea et le Cirad (pour les pratiques en outremer), si des FE existent, les conditions de leur élaboration (anciennes et sur des composés pour la plupart interdits à l'heure actuelle) rendent leur utilisation dans le contexte actuel des pratiques peu pertinente. Certains des modèles existants pourraient être déployés pour estimer des FE à partir des caractéristiques physico-chimiques des matières actives, même si des verrous perdurent, tel l'effet de la formulation. En ce qui concerne les jeux de données, il en existe peu sur la dérive aérienne (contrairement à la dérive sédimentaire, beaucoup mieux renseignée), et s'il en existe concernant la volatilisation, l'hétérogénéité des protocoles utilisés rend difficile leur exploitation pour en dériver des FE un tant soit peu génériques. Ce dernier constat a amené la communauté scientifique à se réunir en France en 2018, dans le cadre d'un projet coordonné par l'Inra, Irstea et l'université de Wageningen, lors d'un atelier européen (appuyé par deux experts américains et soutenu par le département EA) pour élaborer des protocoles standard de mesures de la dérive aérienne et de la volatilisation. Enfin, si des leviers d'action ont pu être identifiés pour limiter les pertes par dérive lors de la synthèse présentée ci-dessus, les leviers pour limiter la volatilisation restent difficiles à clairement établir au vu des multiples interactions en jeu, hormis une incorporation du produit au sol quand cela est possible. Il est important de noter qu'une communauté d'acteurs s'est constituée et qu'une dynamique forte s'est engagée, se concrétisant par plusieurs projets d'envergure en cours au niveau national.

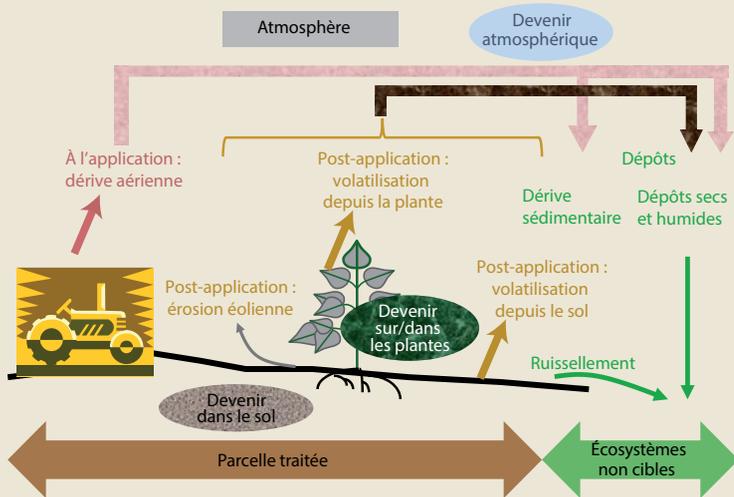


Figure 6.8. Voies de contamination vers l'air pendant et après l'application de produits phytosanitaires et devenir dans l'atmosphère.

programmes thématiques de l'Ademe ont été moteurs pour concrétiser ces collaborations. Il en est de même des unités mixtes technologiques telles que Alter'N et des réseaux mixtes technologiques Fertilisation et environnement et Élevage et environnement, pour lesquels la question de la qualité de l'air était prégnante. Des projets de recherche et des thèses ont été menés avec un pilotage soit de l'Inra, soit de ces partenaires, sur les émissions depuis les épandages d'engrais minéraux, depuis les bâtiments d'élevage ou suite à l'application au champ des effluents d'élevage ou autres produits résiduels organiques.

La collaboration avec ces partenaires se concrétise aussi dans le cadre de groupes de travail animés par les ministères ou l'Ademe ou dans la réalisation d'ouvrages ou de brochures de vulgarisation issus notamment des synthèses, en lien avec l'Ademe, par exemple sur les méthodes de mesure des émissions depuis les bâtiments d'élevage, les émissions de particules en agriculture, l'agriculture et la qualité de l'air¹⁰⁶.

► Perspectives

Les travaux sur les interactions entre l'agriculture et la qualité de l'air ont démarré dans les années 1990 à l'Inra, alors que ce domaine était largement vierge en France, avant même la création du département EA. Ils sont ensuite montés en puissance pour couvrir l'ensemble de la chaîne allant du processus d'émission, en passant par le transport et la dispersion ainsi que par la transformation, jusqu'aux processus de dépôt, voire d'impact quand il s'agit des cultures. L'émergence de cette thématique a été portée par la bioclimatologie, mais a commencé sur la base de préoccupations agronomiques puisqu'il s'agissait d'évaluer les pertes importantes d'azote lors des épandages de lisier. Ils se sont rapidement étendus aux départements de Science du sol et d'Agronomie, mais aussi aux départements Phase pour les questions relatives à l'élevage et EFPA pour les forêts. Très vite, les motivations se sont élargies aux questions de la qualité de l'air et à ses impacts, en particulier par le biais de participations à des projets européens sur l'ammoniac et autres composés (oxydes d'azote, ozone, produits phytopharmaceutiques, composés organiques volatils, particules).

Les approches ont été de plus en plus intégrées, soit en considérant des familles de composés plutôt qu'un composé isolé, et en conséquence une diversité d'impacts (qualité de l'air, effet de serre, biodiversité, qualité des eaux de surface, etc.), soit en prenant en compte des échelles d'espace ou des niveaux d'intégration plus larges (paysage, région, pays). Fondés initialement sur des approches expérimentales au champ et des modèles de transfert (sol et atmosphère) et de transformations chimiques, ces travaux ont ensuite fait appel à une large gamme de disciplines : physiologie, écophysiologie, science du sol, microbiologie, agronomie, économie, maths appliquées, chimie... La priorité a d'abord été donnée à des développements métrologiques (mesures de concentrations à très bas niveaux en polluants atmosphériques dans l'environnement ou en bâtiments) et à la modélisation des

106. Ademe, 2012. Les émissions agricoles de particules dans l'air : état des lieux et leviers d'action, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/82370_7416_emissions_agricoles_particules-2.pdf ; Ademe, 2015. Agriculture et pollution de l'air : impacts, contributions, perspectives. État de l'art des connaissances, <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/agriculture-et-pollution-air-primequal-vf.pdf>.

mécanismes d'émission et de dépôt. La modélisation des processus d'émission et de dépôts à différentes échelles et leur intégration à l'échelle du paysage sont un identifiant majeur des travaux conduits dans le département EA sur la qualité de l'air.

Tout en poursuivant les recherches sur des processus à des échelles fines avec des chimistes de l'environnement et des écophysioles, la tendance reste d'aller vers un élargissement des composés étudiés, afin d'avoir une vision toujours plus intégrative de la pollution de l'air dans les espaces ruraux, dont les caractéristiques de profils de composés et de concentrations sont bien spécifiques (généralement faibles, sauf pour les polluants directement liés aux intrants utilisés en agriculture). Cela positionne le département EA à la pointe de la recherche dans ces espaces. L'autre tendance est à la poursuite de l'intégration des processus dans un contexte à la fois spatial à l'échelle du paysage, de niveau d'organisation (intégration de l'atmosphère dans les grands cycles, évaluations environnementales), d'aide à la décision des acteurs de l'élevage (éleveurs, recherche-développement, filières) et d'aide à la décision publique (Citepa, Ineris, références sur les émissions, outils de cadastres d'émission).

Le développement de cette thématique illustre la capacité d'un département de recherche associant des disciplines diverses dans le domaine de l'agronomie (au sens large) et de l'environnement à traiter les questions de l'impact de l'agriculture sur la qualité de l'air. Les outils développés permettent d'aborder à présent la question de l'impact sanitaire des polluants atmosphériques, notamment en ce qui concerne l'azote et les produits phytopharmaceutiques, requérant de nouvelles collaborations vers les toxicologues et/ou épidémiologistes.

Pour en savoir plus

Bedos C., Généromont S., Castell J.-F., Cellier P., 2019. *Agriculture et qualité de l'air*, Éditions Quæ, Versailles (à paraître).

Corpen, 2007. *Les produits phytosanitaires dans l'air. Origines, surveillance et recommandations pratiques en agriculture*, 122 p., http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/Infodoc/ged/viewportalpublished.ashx?eid=IFD_FICJOINT_0002753&search.

Delmas R., Mégie G., Peuch V.-H., 2005. *Physique et chimie de l'atmosphère*, Éditions Belin, Paris, 640 p.

Guiral C., Bedos C., Ruelle B., Basset-Mens C., Douzals J.-P., Cellier P., Barriuso E., 2016. Les émissions de produits phytopharmaceutiques dans l'air. Facteurs d'émissions, outils d'estimation des émissions, évaluations environnementales et perspectives de recherche. Synthèse, Ademe, 47 p., <https://www.ademe.fr/synthese-bibliographique-emissions-produits-phytopharmaceutiques-lair>.

Hassouna M., Eglin T. *et al.*, 2015. Mesurer les émissions gazeuses en élevage : gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d'azote. Inra-Ademe, 314 p.

Mills G., Harmens H., 2011. Ozone pollution: A hidden threat to food security, CEH, <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/15071/1/N015071CR.pdf>.

Sutton M., Reis S., Baker S. (eds), 2009. *Atmospheric Ammonia. Detecting Emission Changes and Environmental Impacts*, Springer, The Netherlands, 464 p.

Sutton M.A., Howard C.M., Erismann J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B., 2011. *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives*, Cambridge University Press, 664 p., <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>.

La dissémination des OGM dans les paysages agricoles

Antoine Messéan

L'amélioration des plantes a été un vecteur essentiel d'augmentation de la productivité agricole au cours du siècle dernier. La transition agroécologique invite à repenser la place des innovations variétales, qui doivent désormais accompagner la conception de systèmes de culture économes en intrants de synthèse et délivrer différents services aux agro-écosystèmes. Il en résulte un changement de paradigme dans la coconception de systèmes de culture diversifiés. En parallèle, les biotechnologies végétales ont eu un essor important au cours des quarante dernières années, et débouchent aujourd'hui sur des techniques comme Crispr¹⁰⁷, qui ouvre un champ des possibles considérable. Les premières plantes issues des biotechnologies végétales de type OGM, fondées sur la transgénése, ont principalement été développées dans une optique de poursuite du modèle productiviste du xx^e siècle. La remise en cause de ce modèle ainsi que le potentiel considérable des nouvelles techniques limitent actuellement le développement des applications en France et en Europe. Les nouvelles techniques ont-elles le potentiel d'accompagner la transition agro-écologique et pourraient-elles connaître un nouvel essor après l'échec des premiers OGM ? Quelle que soit la réponse à cette question, les travaux conduits ces deux dernières décennies pour évaluer les impacts écologiques et économiques des premiers OGM ont permis de développer un cadre méthodologique et des outils d'évaluation des impacts des systèmes de culture à l'échelle du paysage qui seront utiles pour mieux anticiper les impacts des innovations variétales de demain et, le cas échéant, pour accompagner leur déploiement dans des systèmes durables.

La question des OGM, de leur contribution potentielle à la conception de systèmes de culture innovants et de leurs impacts agronomiques et environnementaux n'a jamais été considérée en tant que telle dans les schémas stratégiques du département EA. Pourtant, des chercheurs du département avaient, dès avant sa création en 1998, pris assez vite la mesure de l'importance de cette question.

Alors que les premières variétés transgéniques (maïs Bt résistant aux lépidoptères, colza tolérant à un herbicide) étaient en cours de mise au point au début des années 1990, les agronomes ont mis en avant, avant même l'émergence de la question des OGM dans le débat public, la nécessité d'analyser les changements induits par cette innovation de rupture à l'échelle du système de culture. L'introduction d'une variété tolérante à un herbicide total comme le glyphosate ne se limite pas à un simple changement de régime herbicide, elle s'accompagne également d'une évolution des pratiques agricoles, à commencer par la possibilité de réduire le travail du sol, voire de supprimer le labour, et également par la volonté de raccourcir les rotations au travers d'un contrôle accru des adventices, au moins à court terme.

Dès 1994, des expérimentations pluriannuelles au champ conduites par le Cetiom (désormais Terres Inovia), l'ITB, AGPM-technique (désormais Arvalis) et l'Inra se donnent pour objectif d'évaluer les effets agronomiques à moyen terme des cultures transgéniques (notamment impact sur la diversité floristique, passage des caractères introduits vers des populations d'adventices apparentées) et de sensibiliser acteurs économiques et décideurs à la nécessité de considérer la dimension « système de culture »¹⁰⁸. L'unité d'agronomie de Dijon est un des partenaires majeurs du dispositif, et le département d'Agronomie participe à son pilotage. La question des effets agronomiques induits par les cultures transgéniques est également évoquée lors d'un conseil scientifique du département Agronomie : il faut évaluer les impacts des OGM à l'échelle des systèmes de culture, et on a besoin des agronomes pour cela !

107. Clustered Regular Interspaced Short Palindromic Repeats.

108. Messéan A., Angevin, F., Champolivier J., Colbach N., 2005. Impact of GMO's within cropping systems: Towards a more systemic approach. *Aspects of Applied Biology*, 74, special issue GM crops – Ecological dimensions, 191-196.

Les unités d'agronomie de Grignon et de Dijon s'engagent sur le sujet et lancent le développement du modèle GeneSys¹⁰⁹ sur colza. Le modèle prend explicitement en compte les successions de culture et l'ensemble des pratiques agricoles qui affectent le devenir des repousses de colza dans les agrosystèmes. Il est ainsi confirmé l'importance cruciale des rotations et des conduites de culture, qui constituent en retour autant de leviers qui peuvent être exploités pour minimiser la persistance des repousses et leur potentiel de réservoir pour le transfert des gènes introduits vers la flore adventice et les populations sauvages.

Le questionnement sur l'impact des OGM sur les systèmes de culture et sur l'environnement au sein de l'Inra aboutit au lancement en 1998 d'une Action incitative programmée OGM et environnement, coordonnée par Jean Boiffin et Yvette Dattée (de l'ancien département Génétique et amélioration des plantes), qui financera de nombreux projets associant les équipes du département EA. Réunissant agronomie, bioclimatologie et science du sol, le nouveau département élargit les compétences disciplinaires : au-delà de l'effet des pratiques sur la persistance des OGM dans les agroécosystèmes, le transfert de gènes de résistances à la flore adventice, le devenir des herbicides associés aux plantes tolérantes (ex. : le glyphosate) ou le transfert de gènes à la microflore du sol sont abordés conjointement avec les équipes de science du sol de Grignon et de Dijon. En parallèle, les OGM sont utilisés comme un outil de connaissance du fonctionnement de la plante dans de nombreuses unités de l'Inra.

La création du département EA coïncide également avec l'émergence de la problématique des OGM dans le débat public à la suite des premières importations de soja transgénique, en 1996, en provenance des États-Unis, ainsi que des premières autorisations de mise en culture de maïs résistant aux lépidoptères par l'Union européenne en 1997-1998. Alors que l'analyse des impacts s'était focalisée jusqu'alors sur l'évaluation des risques environnementaux et sanitaires, une problématique nouvelle fait son apparition : celle de la « faisabilité et de la pertinence » de la coexistence entre systèmes de culture et filières, conventionnelles, biologiques et biotechnologiques. Alors que seuls des OGM ne présentant pas de risque pour la santé et l'environnement peuvent être autorisés, le législateur instaure également le principe de liberté de choix du consommateur pour des produits non OGM ou biologiques, qui doivent ainsi être identifiés sur le marché et étiquetés en tant que tels. Or, en pratique, il est difficile de séparer totalement les circuits de collecte et de transformation, et il est impossible de prévenir les flux de gènes entre parcelles d'une culture donnée au sein d'un territoire.

Après avoir édicté le principe de liberté de choix pour les consommateurs et défini un seuil de tolérance pour la présence « fortuite » d'OGM (techniquement inévitable), la recherche a alors été sollicitée pour produire les connaissances nécessaires à la mise en œuvre de cette coexistence. Dans ce contexte, l'Inra et le département EA ont pris le *leadership* dans les projets d'études européens qui ont traité des divers aspects de la coexistence « OGM vs non-OGM » entre 1999 et 2015.

Après la participation à une étude française sur la « faisabilité de la coexistence dans les filières et les paysages », commanditée par le ministère en charge de l'Agriculture, les agronomes ont coordonné deux études successives pour le compte de l'Institut de prospective de la Commission européenne. Dans ces études, l'approche de modélisation spatio-temporelle initiée avec le modèle GeneSys sur colza a été étendue au maïs¹¹⁰, puis à la betterave, afin d'évaluer la faisabilité de la coexistence en considérant explicitement l'ensemble des facteurs environnementaux (paysage, climat) et les pratiques agricoles qui l'affectent. Des unités travaillant sur la dispersion atmosphérique de particules (EGC Grignon, Ephyse Bordeaux), issues d'unités de l'ancien département Bioclimatologie, ont également mis leurs compétences au service d'une connaissance plus fine de la dispersion tridimen-

109. Colbach N., Clermont-Dauphin C., Meynard J.M., 2001. GENESYS: A model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers. I. Temporal evolution of a population of rapeseed volunteers in a field. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83, 235-253.

110. Angevin F., Klein E., Choimet C., Gauffreteau A., Lavigne C., Messéan A., Meynard J.-M., 2008. Modelling impacts of cropping systems and climate on maize cross pollination in agricultural landscapes: The MAPOD model. *European Journal of Agronomy*, 28, 471-484.

sionnelle du pollen, illustrant ainsi la valeur ajoutée d'avoir associé agronomie, science du sol et bioclimatologie pour traiter d'une innovation comme les OGM.

Cette approche de modélisation a permis de développer une évaluation *ex ante* de scénarios de gestion de la coexistence et de proposer aux pouvoirs publics des recommandations de mesures de gestion à l'échelle des paysages agricoles : distances d'isolement adaptées à chaque contexte, stratégies d'évitement par décalage de semis ou précocité différentielle, sélection de variétés émettant moins de pollen... Ces travaux ont été conduits dans des projets européens dans lesquels des chercheurs et équipes Inra étaient fortement impliqués, comme coordinateurs ou partenaires (Sigmea¹¹¹, Price¹¹²). La collaboration avec d'autres départements a été forte : avec le département MIA, des méthodes bayésiennes originales pour rendre compte du risque de présence fortuite à l'échelle du paysage agricole ainsi que des stratégies d'échantillonnage ont été développées¹¹³ ; avec le département SAD, des scénarios de gestion à l'échelle régionale et des stratégies d'allocation optimale pour les filières ont été étudiés.

L'ensemble de ces travaux de modélisation des flux de gènes liés aux OGM a permis de développer un cadre conceptuel, des méthodes et des outils qui ont été appliqués au-delà de la question de la coexistence entre systèmes de production. C'est le cas de l'impact du changement de régime de gestion des herbicides dans les systèmes de culture sur la biodiversité et la résistance aux herbicides, ou encore de l'impact de la dispersion de particules sur des populations non cibles (dispersion du pollen de maïs Bt sur les papillons protégés), deux questions traitées dans le cadre du projet européen Amiga¹¹⁴.

Ces études d'impact ont mis en évidence les limites du système réglementaire actuel d'évaluation des innovations en agriculture. Ce système s'appuie essentiellement, sinon exclusivement, sur une analyse des impacts directs d'une innovation et sur des dispositifs *ex situ* qui ignorent les nombreuses interactions existantes dans les agroécosystèmes, ainsi que les effets induits par une innovation particulière sur les pratiques agricoles. En affirmant la nécessité d'une approche « système » (voir chapitre 18) dès l'origine et en proposant des outils d'évaluation *ex ante* qui prennent en compte les interactions ainsi que les effets induits, c'est à une refonte complète de ce système d'évaluation que les travaux conduits par l'Inra sur les OGM invitent. Cette refonte suppose un changement de paradigme dans l'expertise publique d'évaluation des risques, puisqu'il ne s'agit plus de rendre seulement des avis qualitatifs (« l'OGM présente un risque environnemental ou non »), mais de construire les outils d'évaluation qui permettent ensuite aux gestionnaires d'évaluer les risques dans leur contexte particulier. Ce changement implique donc de compléter l'évaluation du risque, essentiellement conduite *a priori*, par une surveillance post-commercialisation qui est seule à même de tenir compte de la diversité des agroécosystèmes et de leur dynamique temporelle. Compte tenu de la complexité des agroécosystèmes et de son coût potentiel, la surveillance nécessite un cadre conceptuel et une optimisation des stratégies d'échantillonnage que les travaux conduits par le département EA permettent de fournir.

Même si leur culture est désormais interdite ou limitée en Europe, les OGM ont été un modèle pour traiter des questions génériques autour de l'évaluation et de la gestion d'innovations agronomiques et pour produire un cadre conceptuel et des outils novateurs que le département EA doit contribuer, en lien avec d'autres départements, à valoriser pleinement et à intégrer dans un cadre réglementaire pour l'ensemble des innovations en agriculture.

111. FP6 Sustainable Introduction of GM crops into European Agriculture, <https://www6.inra.fr/sigmea/>.

112. FP7 Practical Implementation of Coexistence in Europe.

113. Bensadoun A., Monod H., Makowski D., Messéan A., 2016. A Bayesian approach to model dispersal for decision support. *Environmental Modelling and Software*, 78,179-190.

114. FP7 Assessing and Monitoring Impacts of GM crops in Agrosystems.

La biodiversité : menaces et ressources

Laurent Lapchin, Françoise Lescourret, Philippe Lemanceau

L'histoire de l'agronomie et de la biodiversité est une suite de paradoxes... Dès l'origine, l'agriculture est bien entendu une valorisation de la biodiversité puisqu'elle a choisi, domestiqué, sélectionné des espèces végétales et animales au profit de l'alimentation humaine et d'autres services comme l'habillement, la construction ou le chauffage. Pourtant, dès qu'il s'est agi d'améliorer les performances de production, l'agriculture a réduit la biodiversité, en simplifiant le milieu pour mieux le contrôler : par le travail et la fertilisation du sol, l'élimination des espèces compétitrices ou antagonistes, la transformation des paysages pour faciliter le machinisme... Le paradigme de l'agriculture intensive était alors d'installer des productions, et notamment des variétés très uniformes génétiquement — réduisant donc au passage un autre compartiment de la biodiversité —, dans un environnement le plus contrôlé, constant et homogène possible, de l'échelle de la plante à celle des régions de production. Cette stratégie permet d'exprimer au mieux le potentiel génétique de variétés sélectionnées à cet effet. Elle semble pourtant avoir atteint le maximum de ses possibilités et se heurte aujourd'hui à beaucoup d'obstacles. En effet, les pays les plus pauvres n'ont pas les moyens de l'appliquer, sauf à vendre ou louer leurs surfaces cultivables à des entreprises ou des États plus riches. Quant aux pays qui ont les moyens de pratiquer l'agriculture d'une façon intensive, ils voient les rendements stagner pour leurs principales productions. Ils sont également soumis aux effets non intentionnels de l'intensification agricole, comme les pollutions provoquées par les intrants chimiques de synthèse, la détérioration de l'environnement, de la biodiversité et des paysages, la compétition pour l'usage de l'eau ou de l'espace. Le changement de paradigme est donc inéluctable : il s'agit désormais de produire le plus possible — et le mieux possible, en termes de qualité nutritionnelle, sanitaire et gustative des produits — pour répondre aux besoins alimentaires croissants de la planète, tout en assimilant les contraintes liées aux conséquences de la production agricole comme au partage des priorités de l'usage des terres.

Belle ambition ! Mais pour être inéluctable à terme, ce changement de paradigme ne s'en heurte pas moins à des difficultés considérables. D'ordre biotechnique tout d'abord : comment définir, trouver et mettre en œuvre une gamme de solutions cohérente qui à la fois préserve et valorise la biodiversité ? Les pistes existent, de plus en plus nombreuses et efficaces, qui illustrent la faisabilité de stratégies alternatives. Et l'agriculture n'a pas que des effets délétères sur la biodiversité : la diversification des paysages et l'impact des prairies au sein de certains territoires, favorisés par exemple par la polyculture-élevage, permettent une biodiversité particulière, associée aux agroécosystèmes et aux interfaces avec les espaces semi-naturels, qui peut s'avérer très riche. Les principaux freins sont donc probablement ailleurs, qu'il s'agisse de l'efficacité technique de l'agriculture intensive, de son poids économique et politique et de son potentiel d'inertie, ou bien d'une perception culturelle de la notion de « progrès » qui privilégie les solutions simples et spectaculaires, rentables à court terme, en dépit de leurs conséquences possibles. La révolution de l'agriculture et de ses liens avec la biodiversité constitue donc un enjeu considérable pour la recherche agronomique, enjeu que le département Environnement et Agronomie (EA) de l'Inra a fait sien, progressivement, au cours de ces vingt ans.

► **Agronomie et biodiversité : l'émergence des grandes orientations**

Nous avons vu que l'agriculture est née de la biodiversité mais que son intensification n'a pu se faire que par une réduction de cette biodiversité. L'autre paradoxe de l'histoire houleuse de l'agronomie et de la biodiversité est le suivant : aujourd'hui, un changement de paradigme ne peut advenir sans retour en force de la biodiversité, par la valorisation de ses nombreuses fonctions au sein des agroécosystèmes. Le sol n'est plus considéré comme un support inerte, mais comme un environnement vivant contribuant à la productivité primaire et fournissant également de nombreux services ; les couverts végétaux sont compétiteurs des adventices ; les communautés d'organismes auxiliaires régulent les ravageurs et maladies ; le fonctionnement et l'homéostasie des agroécosystèmes sont favorisés par la diversification, voire l'association, des productions et par la préservation des espaces semi-naturels à l'échelle des paysages. Les idéotypes variétaux devront désormais viser l'optimisation des productions dans ces environnements complexes, variables et moins artificialisés, même si, sur ce plan, nous sommes encore assez loin du compte. La compréhension, l'évaluation et la modélisation des processus écologiques qui interviennent aux différentes échelles de temps et d'espace sont à leur tour indispensables à la prévision et donc à la gestion des services de toutes sortes que les populations humaines retirent des agroécosystèmes. Ici encore, changement de paradigme : la biodiversité n'est plus seulement une ressource génétique pour l'agriculture ou un patrimoine à préserver, mais aussi le cœur du fonctionnement des agroécosystèmes.

En accolant les termes « environnement » et « agronomie » à sa création, le département EA de l'Inra s'insérait d'emblée dans la remise en question d'une production agricole intensive exclusive et fermée sur elle-même. Dès la définition de ses futures missions, en 1998, le département avait pour objet de valoriser les ressources et les milieux pour les productions agricoles, tout en minimisant les

perturbations qu'elles provoquent, y compris dans les milieux non cultivés. Néanmoins, la biodiversité y était considérée surtout comme récepteur des effets non intentionnels de l'agriculture, et pas encore comme l'un de ses moteurs essentiels. Le sol faisait déjà exception puisqu'il était question de ses activités biologiques, en particulier par le fonctionnement de la rhizosphère. Les missions du futur département évoquaient également les transferts d'échelles et ce que l'on commençait à appeler les « paysages ». En élargissant les questions posées au-delà de la parcelle agricole, la voie était ainsi ouverte pour ce qui se rattacherait quelques années plus tard au concept de services écosystémiques. La « biodiversité » n'était pas encore évoquée d'une façon explicite. Mais cette absence n'est pas propre au département EA de l'Inra : la biodiversité était alors considérée — y compris au CNRS et dans les sphères universitaires — comme relevant quasi exclusivement du domaine de la conservation. Même lorsque des recherches avaient justement pour objet de valoriser des propriétés de la biodiversité, comme dans le cas de la lutte biologique pour le département Zoologie puis SPE de l'Inra, les fonctions biologiques comme la compétition ou la prédation étaient souvent traitées comme de simples substituts aux intrants chimiques. Les approches globales, sur la « durabilité » des cultures ou les productions intégrées par exemple, restèrent longtemps bien difficiles à conceptualiser et formaliser.

Une animation scientifique transversale sur la biodiversité

C'est donc un niveau intégratif différent — une direction scientifique de l'Inra — qui prit l'initiative de reconnaître et d'aborder la biodiversité d'une façon globale. Au sein de la direction scientifique Econat, Pierre Stengel confia à Jean-Baptiste Bergé la mission de mener à bien ce travail de pionnier. Les questions de recherche émergèrent alors rapidement, donnant naissance au programme fédérateur Écologie pour la gestion des écosystèmes et de leurs ressources (Ecoger) qui, de 2005 à 2008, a rassemblé les travaux de 53 équipes, regroupées en neuf projets dont deux étaient coordonnés par des chercheurs du département EA. Il s'agissait de rapprocher les agronomes des écologues qui, en France et en Europe, commençaient à s'intéresser de près aux particularités écologiques des agro-écosystèmes. Le séminaire final d'Ecoger, en mars 2009, mettra l'accent sur l'importance des échelles spatiales et du paysage et sur les aspects fonctionnels de la diversité biologique et leur participation aux services écosystémiques. Dans le même temps, la conférence de Paris *Biodiversité, science et gouvernance* et l'appel à projets ANR Biodiversité de 2006 qui s'ensuivit insistaient sur la nécessité de changer de braquet dans l'ambition scientifique et la structuration de la communauté scientifique.

Ces travaux et les discussions et réflexions animées qu'ils ont suscitées ont rapidement fait ressortir la carence d'une analyse approfondie des connaissances sur les relations entre biodiversité et agroécosystèmes. Ce fut donc l'objet d'une expertise scientifique collective (ESCo) qui s'est déroulée en 2007 et 2008 sous la direction de Xavier Le Roux¹¹⁵. D'emblée, l'ESCo Agriculture et biodiversité a distingué les impacts de l'agriculture sur la biodiversité et les services écologiques que la biodiversité rend à l'agriculture, puis l'intégration de ces deux volets dans

115. Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E. *et al.* (eds), 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, Inra, France.

les systèmes de production. L'expertise a mis en évidence le champ scientifique que constituait cette intégration, champ scientifique qui, pour l'essentiel, restait à construire. Mais déjà, l'analyse des publications permettait de mettre en évidence la rétroaction entre impacts et services écologiques et l'importance de l'échelle des paysages, avec trois facteurs clés de la dégradation des impacts et services : la diminution de la diversité des productions, l'intensification et l'homogénéisation des méthodes de production et la réduction de la proportion des espaces semi-naturels.

Constituant l'une des six conférences internationales organisées en 2008 dans le cadre de la présidence française de l'Union européenne, *Biodiversité et agricultures*, présidée par Robert Barbault, a représenté un autre temps fort de l'animation scientifique transversale sur la biodiversité. Elle visait à illustrer l'importance stratégique des recherches sur les interactions entre agriculture et biodiversité, tant au niveau des impacts environnementaux que de la valorisation des fonctions écologiques. Structurée en séances plénières et en tables rondes, la conférence a réuni des *leaders* mondiaux de la recherche dans ce domaine pour un auditoire constitué de chercheurs, de décideurs politiques et de porteurs d'enjeux économiques et associatifs. Elle s'est tenue à Montpellier et a été précédée d'ateliers préliminaires organisés à Tilburg aux Pays-Bas, à Reading au Royaume-Uni, et à Strasbourg. Les conférenciers ont mis l'accent à nouveau sur les rétroactions entre impacts et valorisations et sur les transferts d'échelles spatiales. Ils ont insisté également sur les complémentarités disciplinaires, notamment entre sciences biologiques et sciences humaines et sociales. Ils ont aussi souligné les convergences scientifiques entre les questions relatives à la biodiversité des espèces spontanées ou sauvages et des espèces domestiquées.

Durant la même période, et à la suite du Grenelle de l'environnement, sept organismes de recherche français concernés par ces thématiques (BRGM, Cirad, CNRS, Ifremer, Inra, IRD et MNHN) ont organisé la transformation de l'Institut français de la biodiversité pour en faire une fondation de recherche novatrice, la Fondation pour la recherche sur la biodiversité, interface entre la communauté scientifique, la société civile et le monde de l'entreprise. Cette fondation a également repris les activités du Bureau des ressources génétiques, concrétisant ainsi la convergence entre biodiversité spontanée et domestiquée.

C'est donc dans cette période féconde que les thématiques de recherche désormais centrales des interactions entre agriculture et biodiversité — indispensables au changement de paradigme des productions agricoles — ont émergé : valorisation des fonctions écologiques, structures spatio-temporelles, complémentarités et antagonismes entre services écosystémiques...

La biodiversité dans les enjeux du département Environnement et Agronomie

Dans le même temps où ces réflexions et animations scientifiques transversales précisaient les objectifs généraux et les concepts, chacun des départements de l'Inra concernés s'appropriait progressivement les questions de recherche relatives à la biodiversité. Pour le département EA, la montée en puissance de ces questions transparait dans les schémas scientifiques directeurs (SSD) successifs. Nous avons vu que dès la définition des missions du département, l'écologie du sol était évoquée sous un angle fonctionnel, aux côtés des impacts des stratégies agronomiques sur la biodiversité. Conformément à ces missions, le premier SSD

comportait déjà un champ thématique consacré à l'écologie du sol et de la rhizosphère ainsi qu'un autre dédié à l'organisation spatiale et au fonctionnement des agroécosystèmes. Un autre champ thématique portait sur l'écophysiologie des plantes cultivées et leur adaptation au milieu. Ainsi, une partie importante des objectifs du département couvrait des domaines reliés à la biodiversité — et à son potentiel pour le changement de paradigme agricole — dont la cohérence d'ensemble n'apparaîtrait que plusieurs années plus tard.

Pour la session suivante, 2004-2008, le SSD prend en compte les nouvelles contraintes qui pèsent sur le modèle intensif, avec notamment la confirmation du changement climatique et les enjeux environnementaux. Les thématiques de recherche relatives au sol, qu'il s'agisse des processus physico-chimiques ou biologiques, sont approfondies. Le schéma ajoute à l'étude des idéotypes variétaux la notion d'adaptation au changement climatique et insiste à nouveau sur la connaissance et la maîtrise des impacts environnementaux de l'agriculture. Les notions de paysage et d'aménagement de l'espace pour optimiser les processus abiotiques et biotiques sont de plus en plus présentes. Le schéma directeur privilégie néanmoins, dans sa présentation générale, la juxtaposition dans l'utilisation des terres de zones dédiées à une agriculture intensive et technologiquement avancée et de zones de préservation environnementale. Ainsi la question des compétitions entre les usages des terres est-elle considérée implicitement comme réglée, retardant l'appropriation par le département de la thématique des services écosystémiques. Elle réapparaît dans le SSD 2011-2015 : il prend en compte les recommandations issues de l'évaluation du département réalisée en 2008 pour mieux aborder les questions à caractère intégratif, afin de répondre aux défis liés aux changements globaux. Il s'agit alors de faire évoluer les missions et les champs d'activité du département. En particulier, « l'intensification écologique » — qui consiste à piloter des processus biologiques des agroécosystèmes, et notamment les interactions biotiques, pour en optimiser l'exploitation — devient une priorité. Le département ambitionne de s'approprier davantage les concepts fondamentaux de l'écologie (écologie fonctionnelle, des communautés, évolutive, des paysages...). Le SSD 2016-2020 amplifie ces tendances en faisant de la valorisation et de la gestion de la biodiversité l'un de ses cinq enjeux structurants et en situant parmi les défis à relever l'étude des services des agroécosystèmes.

► **Agronomie et fonctions écologiques de la biodiversité : les mains dans le moteur**

Quelles sont ces « fonctions écologiques de la biodiversité » qui reviennent en force au cœur des stratégies agronomiques ? On peut les caractériser selon trois axes. Le premier définit les interactions entre communautés de niveaux trophiques différents. En schématisant quelque peu, les plantes cultivées (producteurs primaires) sont en interaction de type symbiotique avec les communautés de micro et macro-organismes du sol. Elles interagissent avec des communautés du même niveau trophique compétitrices (adventices), avec des communautés de consommateurs primaires antagonistes (bioagresseurs) ou symbiotiques (pollinisateurs), avec des communautés de consommateurs secondaires « auxiliaires des cultures »... Le deuxième axe est spatial, avec l'emboîtement à différentes échelles de ces interactions, de l'environnement immédiat de la plante au paysage, voire aux zones

écoclimatiques, et avec les processus de transfert d'échelles, de migrations, de bio-invasions. Le troisième axe est temporel et concerne les processus évolutifs à court terme, comme la durabilité des résistances ou les mécanismes de résilience.

Nous avons vu que les thématiques relatives à la biodiversité, et en particulier aux fonctions écologiques qu'elle exerce, ont émergé progressivement dans le département EA. Jusqu'à l'évaluation du département en 2008 et l'expression d'un besoin de conceptualisation en matière d'écologie, il ne s'agissait pas d'une démarche structurée autour des fonctions évoquées. Les recherches en relation avec la biodiversité dans le département peuvent ainsi apparaître comme quelque peu disparates, recoupant néanmoins la notion de « durabilité » de l'agriculture. Il est toutefois un domaine où le département — issu notamment de l'ancien département Science du sol de l'Inra — a développé une approche globale dès sa création : c'est l'écologie du sol.

Écologie du sol

À la création du département EA, la connaissance de la biodiversité des sols était extrêmement limitée. La plupart des recherches, en particulier au sein du laboratoire de microbiologie des sols de Dijon, portaient sur les cycles du carbone et de l'azote ou la biodégradation des pesticides, sans que les micro-organismes à l'œuvre soient nécessairement connus et identifiés. Les recherches sur la rhizosphère portaient par contre sur des groupes microbiens particuliers comme les *Rhizobia*. Au cours des vingt dernières années, les travaux des départements EA, SPE et EFPA ont contribué à une avancée considérable de l'écologie microbienne du sol (voir p. 177). Cette révolution a reposé sur des progrès méthodologiques qui ont rendu possible le passage de l'étude de souches particulières à celle des populations puis des communautés (figure 7.1). Ainsi, avec le développement des outils d'extraction, de quantification et d'analyse de l'ADN du sol, on peut maintenant s'affranchir de la phase de culture des micro-organismes, dont on réalise qu'elle représentait un biais important puisque seule une faible proportion d'entre eux est cultivable. La baisse spectaculaire du coût du séquençage haut débit (de 5 292 \$ à 0,12 \$ par mégabase d'ADN entre septembre 2001 et septembre 2017) permet d'envisager à moyen terme l'accès à l'ensemble de la biodiversité du sol. La politique du département a fortement contribué à ces avancées décisives par la création de l'UMR Microbiologie et géochimie des sols à Dijon, en associant ses recherches avec celles du département SPE sur les pathologies d'origine tellurique et les micro-organismes assurant leur contrôle. Le réseau Écologie microbienne des sols et des milieux aquatiques, qui associe également le département EFPA, vise à animer, organiser et structurer les recherches en écologie microbienne. Il a permis en particulier un rapprochement avec les laboratoires d'écologie microbienne de Lyon et de Nancy et abouti à un programme de recherche majeur sur la microbiologie du sol en milieu agricole et forestier (Microger) dans le cadre de l'appel d'offres Ecoger, puis à la construction d'un projet européen, EcoFinders, dans le cadre du 7^e Programme-cadre (2007-2013), rassemblant 23 partenaires de laboratoires européens plus la Chine. Pendant cette période, un autre programme de biogéographie (ANR Ecomic-RMQS, initié en 2006) visait à mieux comprendre les relations entre propriétés pédoclimatiques et biologiques des sols. C'est surtout à partir de 2010 que les résultats marquants émergent, d'abord avec la cartographie nationale des communautés microbiennes telluriques (2010), suivie en 2011 par

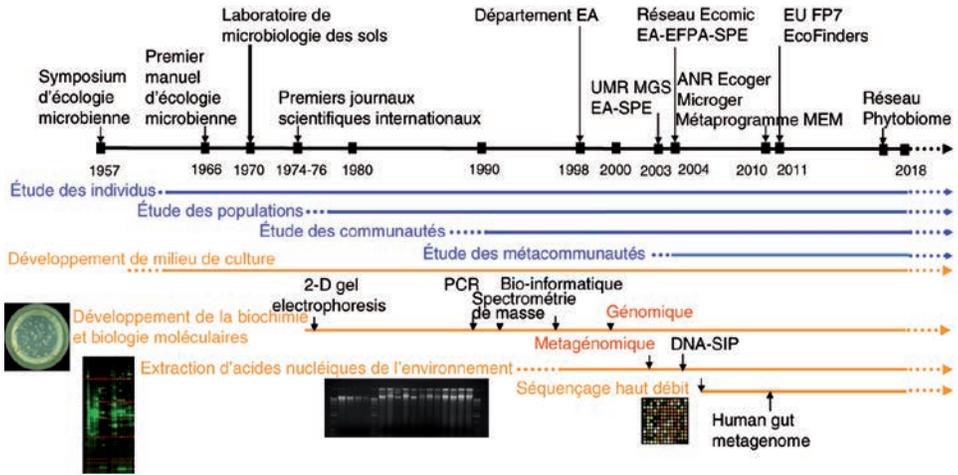


Figure 7.1. Les progrès des méthodes d'étude du microbiote des sols.

la publication par le GIS Sol du rapport sur l'état des sols de France, puis par l'analyse des processus de diversification des communautés bactériennes du sol à grande échelle (2013). Les outils de travail et d'ingénierie à grande échelle, comme la mise en place du Conservatoire européen des échantillons de sols et de la plateforme Genosol puis le Programme des investissements d'avenir (PIA) AnaEE, voient le jour. Ces programmes et dispositifs permettent de faire progresser de façon significative notre connaissance de la biodiversité des sols et de sa régulation par les filtres environnementaux, ainsi que les relations entre biodiversité, fonctions et services écosystémiques fournis par les sols. D'un point de vue opérationnel, ces progrès débouchent sur la proposition de bio-indicateurs et de référentiels pour l'établissement d'un diagnostic de la qualité biologique des sols à destination des utilisateurs des sols (agricoles et urbains), diagnostic qui doit alimenter le conseil agroécologique de demain (PIA2 AgroEco Sol).

Les recherches sur les sols et leur écologie s'intègrent donc pleinement dans celles de l'agroécologie, qui visent à développer des systèmes durables, résilients, qui préservent et valorisent la biodiversité et les interactions biotiques. Les avancées obtenues grâce à la continuité et à la cohérence des logiques de recherche dans ce domaine, les dispositifs de mesure et d'observation, la mise au point d'indicateurs, permettent d'envisager à court terme une ingénierie du sol évolutive, adaptée au nouveau paradigme de l'agriculture. L'enjeu est en effet de proposer *in fine* des outils d'aide à la décision pour préserver et valoriser la biodiversité pour la fourniture des services attendus dans les agroécosystèmes. Dans ce contexte, la plante, *via* sa rhizosphère, et de façon plus générale les pratiques agricoles représentent des leviers essentiels d'orientation des communautés microbiennes et de leur fonctionnement.

Des fonctions écologiques diversifiées

Les « faits marquants » du département — recensés depuis 2005 — illustrent quelques étapes de la montée en puissance des travaux liés à la biodiversité et des résultats obtenus par ses chercheurs, souvent en collaboration avec d'autres

départements ou d'autres organismes de recherche. Pour la production primaire, celle des espèces végétales domestiquées, les chercheurs du département avaient participé à la conception d'outils d'évaluation des variétés, en partenariat avec d'autres départements et des acteurs de la sélection. À nouveau, c'est à partir de 2010 que les résultats marquants sont relevés, avec la création des plateformes de phénotypage PhenoArch (2010), puis Pheno3C (2015, plateforme au champ sous contraintes climatiques) ou Phenome. Les résultats concernant la plasticité phénotypique, en relation avec l'adaptation aux environnements changeants ou fluctuants, se multiplient à partir de 2012, à propos de la réponse des arbres au vent ou de l'adaptation de la transpiration nocturne de la vigne au changement climatique. Sur le fond de cette question de l'adaptation végétale, des progrès ont été réalisés récemment en modélisation pour orienter l'adaptation des cultures vers les nouveaux défis sanitaires et environnementaux. Pourtant, l'enjeu essentiel pour une conception différente de l'agriculture que constitue la sélection variétale manque encore d'un souffle déterminant et d'une stratégie élaborée.

Malgré la priorité portée depuis 2008 à l'avancée des connaissances en écologie générale, les résultats sont restés longtemps peu nombreux. Toutefois, dès 2007, une approche de modélisation avait tenté de fusionner les concepts de l'écologie et de la physique. Par la suite, le réseau Accaf-CLIF, grâce à l'interaction disciplinaire entre acteurs de la recherche (parmi lesquels quatre départements de l'Inra) et du développement, a permis la modélisation de l'action du climat passé ou futur sur plusieurs pathosystèmes.

Sur le plan des interactions écologiques, la plupart des résultats ont été produits en collaboration avec des chercheurs d'autres départements, notamment SPE ou EFPA. Au milieu des années 2000, beaucoup de résultats intéressants ont porté sur des interactions symbiotiques, et notamment la pollinisation, par exemple en 2006 sur la relation entre la biodiversité des interactions plantes-pollinisateurs et la stabilité des communautés végétales. Ici encore, c'est à partir de 2012 que l'accent mis sur les processus écologiques commence à porter ses fruits, pour les interactions antagonistes (effet local et effet de voisinage pour l'influence du mode de production biologique *vs* conventionnel sur les bioagresseurs du blé), compétitrices (pour une meilleure cohabitation des espèces cultivées et des mauvaises herbes) ou pour l'action des auxiliaires (vers de terre contre le piétin-verse du blé ; biodiversité des auxiliaires en verger de pommiers, en relation avec les pratiques en agriculture biologique). Parmi ces interactions, la gestion des adventices représente un point déterminant pour l'agriculture. Les conditions écologiques de la compétition entre plantes annuelles sont ici atypiques : en un même point, elle concerne des espèces de production, qui changent avec les rotations, et des espèces spontanées, qui persistent par graines, bulbes ou rhizomes. Ces conditions écologiques et évolutives particulières nécessitent à la fois des dispositifs expérimentaux pluriannuels et des modélisations combinant les processus écologiques et les stratégies de gestion. Les travaux et la structuration des recherches du département dans ce domaine sont évoqués dans l'encadré 16.1. Ce domaine clé des compétitions et des synergies végétales — par ailleurs étroitement associé aux stratégies de travail du sol — mériterait une démarche de recherche aussi approfondie et aussi cohérente que l'écologie du sol, associant à l'agronomie des approches fondamentales d'écologie des communautés végétales, des dispositifs expérimentaux d'envergure et le développement d'outils de diagnostic et de modélisation.

Encadré 7.1. Les cultures intermédiaires : une approche multiservice

Éric Justes

La notion de culture intermédiaire a clairement évolué historiquement en fonction du service recherché. Engrais vert ou piège à nitrate dans les années 1970 à 1990, elle aboutit aujourd'hui à la conception de services écosystémiques multiples en période d'interculture. Ce sont des cultures intermédiaires multiservices (CIMS) qui ne sont pas récoltées : elles sont enfouies ou laissées à la surface du sol. Les services visés sont variés : gestion de l'azote (effet piège à nitrate), protection physique du sol, stockage de carbone, réduction des bioagresseurs et adventices, pollinisation, esthétique du paysage. Ces services sont produits avec plus ou moins d'efficacité en fonction des espèces ou du mélange d'espèces semées, de leur mode de gestion, de la situation pédoclimatique et de la succession de cultures de vente dans laquelle elles sont insérées.

Le bouquet des services visés et l'éventuel compromis recherché entre les services produits doivent être définis explicitement afin de choisir la bonne espèce ou de concevoir l'assemblage d'espèces à implanter, correspondant à une biodiversité planifiée. Un grand nombre de familles botaniques peuvent être utilisées comme CIMS (crucifères, graminées, légumineuses, composées, autres familles). Bien entendu, il convient de choisir des espèces non hôtes des maladies et ravageurs des cultures principales. Pour maximiser les services écosystémiques rendus par les mélanges d'espèces, il est aussi nécessaire que l'association permette une bonne complémentarité de développement et de croissance. Enfin, nous faisons l'hypothèse que les CIMS, avec des espèces bien choisies et gérées avec des itinéraires techniques adaptés, sont un levier efficace pour l'écologisation des systèmes de culture français, sans nécessairement avoir besoin de transformer radicalement le système, ni le niveau et le type de travail du sol.



Figure 7.2. (A) Mélange de crucifère (moutarde éthiopienne) et de légumineuse (vesce velue) visant un bon compromis de services en interculture longue.

(B) Mélange bispécifique de navette (crucifère avec une croissance très rapide en fin d'été et en automne) et de féverole (légumineuse à croissance rapide en automne) pour maximiser les services à l'automne en interculture courte.

(C) Mélange bispécifique de moha (très sensible au gel mais poussant en été) et de trèfle incarnat (résistant au gel et poussant en hiver) pour avoir des effets « piège à nitrate » et « engrais vert ». Ils sont produits en relais avec une couverture du sol longue de fin d'été jusqu'au printemps suivant, sans avoir de dysservice de « faim en azote » pour la culture suivante.

En matière de transferts d'échelles, la mise en place des Observatoires de recherche en environnement, comme l'ORE ACBB pour évaluer les effets de l'alternance prairies-cultures et des modes de conduite des prairies sur la biodiversité, a suscité des avancées notables en écologie du paysage. Une approche de l'analyse des attaques d'un ravageur du colza et de sa régulation à l'échelle du paysage est présentée en 2010. En 2011, c'est le rôle des bandes enherbées dans la gestion des agroécosystèmes qui est abordée, démontrant qu'elles favorisent l'action des auxiliaires sans augmenter la pénétration des espèces adventices. Le rôle de la structure du paysage et de l'emboîtement spatial des pratiques, et notamment de l'usage des pesticides, est démontré dans le cas des vergers de pommiers. Dans le rapport pour l'évaluation du département sur la période 2008-2012, une analyse des relations entre paramètres abiotiques, fonctionnement de la biodiversité, structures spatiales emboîtées et dispersion est proposée, sur la base du concept de niche écologique. En 2017, une analyse mondiale des successions de cultures en agriculture conventionnelle ou biologique est présentée. Deux éléments dynamisent et fédèrent, au travers de la coopération avec d'autres départements de l'Inra, ce courant de recherches sur le paysage. Le premier est le dispositif Sebiopag de suivi de services écosystémiques relevant du contrôle biologique, qui fait partie du Soere Écoscope et réunit cinq paysages cultivés de grandes cultures, de bocage et de vergers. Le second est le réseau de recherche Payote pour la caractérisation, l'analyse et la modélisation de paysages et territoires agricoles.

C'est dans le domaine de la conception des systèmes de production que les acquis de longue date du département EA sont les plus spectaculaires, se focalisant progressivement autour du concept d'agroécologie. Dès 2005, l'accent est mis sur l'agroforesterie, à l'occasion de son entrée dans la PAC. Par la suite, les associations ou successions d'espèces en production ou en cultures intermédiaires ou bien en « plantes compagnes » (encadré 7.1) ont été beaucoup étudiées dans le département. Son expertise a suscité des collaborations européennes en matière d'agroforesterie, des projets d'expérimentation d'agroécologie à l'échelle de territoires ou même des formations, *via* la création d'une université virtuelle sur l'agroécologie¹¹⁶.

Ces résultats foisonnants illustrent le dynamisme du département dans le domaine des fonctions écologiques liées à la biodiversité, même si la cohérence de l'ensemble reste perfectible : les unités du département ont amorcé un mouvement important vers des domaines de recherche concourant à l'intensification écologique de l'agriculture. Elles ont assuré la coordination de plusieurs grands projets de recherche nationaux et internationaux comme EcoFinders ou PURE¹¹⁷. Et c'est donc tout naturellement que l'application de ces concepts à l'échelle des territoires — où le potentiel agronomique doit désormais être mis en perspective avec les contraintes environnementales, économiques et sociales — a conduit le département EA à jouer un rôle particulier dans l'étude des services écosystémiques.

116. <https://www6.inra.fr/uvae>.

117. EcoFinders : <http://projects.au.dk/ecofinders/> ; PURE : <http://www.pure-ipm.eu/project>.

► Des fonctions écologiques aux services écosystémiques : les bases de l'avenir

Mis en lumière par le MEA de 2001 à 2005, le concept de service écosystémique est un point de vue particulier sur le fonctionnement des écosystèmes modulé par les activités humaines, et les biens et services (commerciaux et non commerciaux) que les populations en retirent. Par nature, ce concept fait donc appel à la fois aux sciences humaines et sociales, pour la notion de services, et aux disciplines de l'écologie, pour le fonctionnement des écosystèmes. Après quelques évolutions de leur définition, trois familles de services sont aujourd'hui caractérisées : les services d'approvisionnement comprennent nutrition, matériaux, énergie. Les services de régulation et de maintenance concernent les toxiques, déchets et autres nuisances, les flux de masses, de liquides, de gaz, et la préservation des conditions physiques, chimiques et biologiques. Les services culturels s'attachent aux interactions entre l'environnement et les composantes physiques, intellectuelles, spirituelles ou symboliques des modes de vie. La biodiversité tient un rôle décisif dans toutes ces catégories : nous avons vu qu'elle est à la fois réceptrice des activités humaines et productrice de fonctions essentielles pour la fourniture des services écosystémiques.

Le changement de paradigme de l'agriculture s'appuie d'une façon implicite sur la notion de service écosystémique : la production agricole, qui procure des services d'approvisionnement, y est confrontée et mise en balance avec l'ensemble des autres services, tout en sachant que des compromis doivent aussi être trouvés entre ces différents services eux-mêmes qui peuvent être parfois contradictoires l'un avec l'autre. L'émergence du concept de service écosystémique, à l'Inra et dans le département EA, et son inscription dans les stratégies de recherche se sont faites progressivement. L'appropriation du concept par les sciences biotechniques a dû s'accompagner d'avancées conceptuelles et d'une réflexion de fond sur l'écologie, notamment sur les fonctions de la biodiversité ; cette appropriation a dû aussi franchir l'obstacle de la difficulté historique de dialogue entre les disciplines écologiques ou agronomiques et les sciences humaines et sociales.

Au sein du département EA, l'amorce de ce virage a eu lieu au travers des impacts environnementaux de l'agriculture intensive, en particulier sur la biodiversité sauvage ou spontanée : les faits marquants du département relèvent en 2005 l'érosion de la diversité floristique dans les champs cultivés et s'intéressent au diagnostic environnemental de systèmes de production agricole. Diagnostic qui sera également intégré dans l'étude *Écophyto R&D*¹¹⁸, à laquelle les chercheurs et ingénieurs du département ont largement contribué. Nous reviendrons sur cet enjeu particulier. Remarquons au passage que ce sujet illustre le besoin conceptuel et les bases théoriques qui restent à approfondir : les impacts environnementaux de l'agriculture entrent-ils dans le cadre des services écosystémiques ? Pas directement, si l'on s'en tient aux nuisances immédiatement induites par l'activité humaine. Pourtant, ces modifications induisent à leur tour des changements fonctionnels des agroécosystèmes qui modifient les autres services, parfois d'une façon considérable.

118. Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M. *et al.*, 2010. *Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport de l'étude.* Inra, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, 90 p.

On pourrait poser la même question à propos de la notion de « durabilité » de l'agriculture : les stratégies dites durables sont utilisatrices des fonctions de la biodiversité et elles modifient en même temps l'impact de l'agriculture sur les services écosystémiques. C'est d'ailleurs ce concept de durabilité qui a préparé le terrain à l'entrée des services écosystémiques dans le département, par exemple avec le modèle MASC pour l'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de culture, et plus tard la création de la plateforme Means¹¹⁹ d'analyse multicritère de la durabilité des systèmes de culture.

Au rang des paradoxes et des rétroactions qui nous incitent à nous méfier des conceptions manichéennes et simplistes, on peut citer également certains « dysservices » liés à la préservation ou à la valorisation de la biodiversité. Par exemple, la protection des grands prédateurs — quelles que soient les parts respectives des réalités biologiques et des jeux d'acteurs — peut accentuer la disparition de l'élevage extensif, notamment en moyenne montagne, et donc favoriser la fermeture des paysages, elle-même très nuisible à la biodiversité. Dans un autre domaine, l'utilisation des cultures intermédiaires dans une optique multiservice peut favoriser des attaques de champignons ou de nématodes, voire d'insectes. Ici encore, une perception à la fois plus globale et plus précise des mécanismes et des interactions en œuvre s'avère nécessaire.

L'expérience acquise par le département dans le domaine de l'émission des GES liée aux activités agricoles en fait un autre champ d'action privilégiée. On peut évoquer notamment le développement d'outils moléculaires pour quantifier et identifier aussi bien les populations microbiennes impliquées dans la production de protoxyde d'azote (N_2O) que celles qui sont associées à l'élimination de ce GES dans les sols. Ces outils permettent ainsi l'étude de l'écologie de ces populations et de leurs effets sur le niveau d'émission du gaz N_2O .

Le terme de « services » fait son apparition en 2010 dans les faits marquants du département, à propos des prairies permanentes et plus tard dans l'élaboration d'un projet de territoire pour réconcilier élevage et littoral, ou encore dans l'inventaire des services écosystémiques rendus par les enherbements viticoles.

Dans le même temps, l'appropriation par le département du thème des services écosystémiques et de leur relation avec le fonctionnement écologique lié à la biodiversité progresse rapidement. Dans le schéma stratégique directeur en cours (2016-2020), l'un des « enjeux structurants » du département est dédié à la valorisation et à la gestion de la biodiversité dans les agroécosystèmes. Il fait explicitement référence à l'évaluation des services des agroécosystèmes relatifs à la fourniture d'éléments minéraux et au contrôle des bioagresseurs. Ces avancées s'appuient sur des travaux et des publications importants en matière de concepts et de modélisation, coordonnés par des chercheurs du département (voir « Pour en savoir plus »). Ces travaux abordent notamment la cascade des liens entre pratiques culturales, biodiversité, processus écologiques et services écosystémiques, la prise en compte simultanée de différents services pour la gestion des territoires, associant de nombreux chercheurs des disciplines biotechniques et des sciences humaines et sociales, ou l'intégration des processus écologiques biotiques et abiotiques et des activités humaines dans des modèles spatialement explicites d'agroécosystèmes.

119. <https://www6.inra.fr/means>.

En quelques années, le département EA a donc acquis un *leadership* certain dans le domaine des services des agroécosystèmes. Ce *leadership* thématique au sein de l'Inra s'est concrétisé par la coordination du métaprogramme EcoServ. Partant du constat que les services écosystémiques fournissent un cadre rationnel pour l'optimisation de l'usage des écosystèmes et que cette logique a rarement été utilisée pour les agroécosystèmes, l'Inra a lancé ce métaprogramme et en a confié la coordination au chef du département. Il est structuré autour de quatre axes principaux : la modélisation de la cascade biodiversité-fonctions écologiques-services écosystémiques ; la quantification et la cartographie des services ; l'assistance à la prise de décision socio-économique des acteurs locaux dans le contexte des *trade-offs* entre services d'un même écosystème ; et l'assistance à la décision politique à différents niveaux. Il est largement interdisciplinaire, puisque le congrès de lancement en avril 2014 rassemblait des chercheurs de douze des treize départements de l'Inra. Son comité de pilotage comprend des chercheurs de sept de ces départements, associés à des personnalités d'autres organismes de recherche. Après les premiers travaux, des résultats importants ont déjà été acquis et publiés dans des revues internationales prépondérantes. Ils portent principalement sur le cadre conceptuel pour l'analyse des services des agroécosystèmes et sur la quantification et la cartographie de ces services.

En l'espace de deux décennies, le département EA a donc su comprendre l'importance des fonctions écologiques liées à la biodiversité pour l'émergence d'une agriculture productive et mieux adaptée aux contraintes nouvelles, qu'elles soient environnementales ou sociétales. C'est bien en s'appuyant sur ses propres acquis, comme l'écologie du sol ou l'écologie fonctionnelle, et en y associant les connaissances obtenues par d'autres départements de l'Inra, puis en transgressant les barrières entre les disciplines biotechniques et les sciences humaines et sociales, que le département atteint aujourd'hui un potentiel important d'animation et de coordination thématique sur la relation entre les fonctions écologiques de la biodiversité dans les agroécosystèmes, les services écosystémiques qui en découlent et leur gestion. Pour accompagner le changement de paradigme de l'agriculture, les défis auxquels le département EA fait face aujourd'hui sont d'envergure. Si la valorisation des fonctions écologiques associées à la biodiversité est désormais au cœur de ses préoccupations, il reste par exemple au département à parfaire la cohérence des travaux dans certains domaines — comme l'écologie des couverts végétaux ou la prise en compte des transferts d'échelles. Dans l'espace, pour traiter de la diversité à l'échelle des territoires et de la complémentarité des milieux cultivés et semi-naturels. Dans le temps, en s'insérant dans une vision historique de l'impact de l'agriculture sur la biodiversité, qui évalue les effets catastrophiques de l'agriculture intensive à l'échelle des territoires, mais aussi les effets très positifs d'une agriculture intégrée dans un fonctionnement équilibré et diversifié des agroécosystèmes (voir p. 123). Au-delà des travaux spécifiques comme ceux qui concernent l'effet des pesticides sur les pollinisateurs, le département est ainsi armé — avec d'autres — pour aborder la responsabilité des techniques de production agricole dans l'un des enjeux majeurs pour l'avenir : la crise de la biodiversité. Le département EA de l'Inra : vingt ans d'histoire et des promesses pour l'avenir...

Pour en savoir plus

- Briat J.F., Job D., 2017. *Les sols et la vie souterraine. Des enjeux majeurs en agroécologie*, Éditions Quæ, 328 p.
- Gaba S., Lescourret F., Boudsocq S., Enjalbert J., Hinsinger P., Journet E.P. *et al.*, 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, 607-623.
- Lescourret F., Magda D., Richard G., Adam-Blondon A.F., Bardy M., Baudry J. *et al.* 2015. A social-ecological approach to managing multiple agro-ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 68-75.
- Vinatier F., Lagacherie P., Voltz M., Petit S., Lavigne C., Brunet Y., Lescourret F., 2016. An unified framework to integrate biotic, abiotic processes and human activities in spatially explicit models of agricultural landscapes. *Front. Environ. Sci.*, 4, 6.
- Expertise Inra Agriculture et biodiversité : <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Agriculture-et-biodiversite>

Impacts de l'agriculture sur la biodiversité

Vincent Bretagnolle

Au cours des trois derniers siècles, l'empreinte mondiale de l'humanité sur les écosystèmes terrestres a augmenté de 5 % à plus de 60 % pour ce qui est de l'utilisation des terres émergées, nous faisant entrer dans l'ère de l'Anthropocène. Avec la révolution dite « verte », les agriculteurs ont remplacé les mécanismes de régulation interne de l'écosystème par des contrôles externes, en utilisant largement les engrais chimiques, les pesticides et la mécanisation. En raison de la transformation des paysages qu'elle a engendrée, l'agriculture intensive est la deuxième cause du risque d'extinction planétaire de la biodiversité, juste après l'exploitation directe des ressources naturelles ; le changement climatique est relégué à la 7^e place, loin derrière le changement d'usage des sols. D'innombrables études montrent la raréfaction de nombreuses espèces de plantes, insectes, oiseaux et mammifères à l'échelle européenne ou nationale dans les espaces agricoles. La raison de l'impact très fort de l'intensification de l'agriculture sur la biodiversité est triple : premièrement, les agroécosystèmes constituent de loin le mode d'usage des terres majoritaire en Europe mais aussi en France (l'agriculture occupe 55 % du territoire français). Deuxièmement, et contrairement à une idée reçue, les espaces cultivés ne sont pas « pauvres » en termes de biodiversité. Les terres agricoles accueillent une grande partie de la biodiversité mondiale : en Allemagne, 75 % des espèces menacées dépendent des surfaces gérées par l'agriculture, et les paysages agricoles européens abritent la communauté la plus riche en nombre d'espèces d'oiseaux (près de 50 % des espèces d'Europe habitent les espaces cultivés, soit plus de 250 espèces). Enfin, l'intensification de l'agriculture a entraîné un couplage entre processus de fragmentation des habitats naturels et utilisation massive de pesticides et d'engrais inorganiques, identifiés tous deux comme les causes majeures des extinctions des populations animales et végétales. À l'inverse, l'agriculture biologique constitue une contre-expérimentation à l'intensification agricole : elle impacte localement et régionalement la composition, la richesse et l'abondance de la flore sauvage (adventices) dans les céréales, et de divers groupes d'insectes (carabes, abeilles sauvages). Du point de vue écologique, un agroécosystème est une mosaïque d'habitats discontinus dans l'espace mais aussi dans le temps (rotation des cultures). Cette discontinuité est partiellement prédictible, car la matrice paysagère est structurée par les fragments pérennes (haies, prairies, etc.) et l'assolement des parcelles est soumis à des règles de rotations culturales. Pratiques agricoles et composition et configuration de la matrice paysagère, notamment en habitats pérennes, impactent la dynamique de la biodiversité aux échelles locales mais aussi paysagères.

Certaines espèces parmi les plus emblématiques comme les oiseaux, autrefois pourtant considérées comme banales (voire nuisibles), ont ainsi fortement régressé à travers les plaines agricoles de toute l'Europe : c'est le cas par exemple de la perdrix grise ou de l'hirondelle de cheminée. L'augmentation des rendements de céréales entre 1960 et 2000 explique

30 % de la diminution des populations d'oiseaux de plaine. En fait, la moitié des espèces d'oiseaux des milieux agricoles européens sont en fort déclin, et une étude estime que 460 millions d'oiseaux ont disparu en vingt ans. En France, entre 1989 et 2017, ces populations d'oiseaux ont perdu 35 % de leur effectif, un chiffre identique étant constaté au niveau local, dans le sud des Deux-Sèvres. Les populations d'oiseaux des milieux agricoles déclinent du fait du manque de ressource en nourriture, à la fois invertébrés et graines, qui résulte lui-même de la perte d'hétérogénéité du paysage (diminution des haies, cultures pérennes et différents modes de gestion) causée par l'intensification de l'agriculture. Différentes études menées en France montrent que l'implémentation de prairies et l'extensification des pratiques agricoles favorisent la richesse en plantes, mais aussi en insectes (soit directement, soit indirectement à travers l'augmentation de la diversité des plantes, ressources trophiques de nombreuses espèces d'insectes).

Le principal défi de l'agriculture pour les prochaines décennies est donc de répondre aux besoins alimentaires d'une population mondiale croissante, sans sacrifier davantage l'intégrité des paysages ni l'environnement global. Les mesures agroenvironnementales, l'agriculture biologique, l'écoagriculture, l'agroécologie, l'ingénierie écologique, l'intensification durable et l'intensification écologique sont plusieurs formes d'agriculture qui tentent de concilier production alimentaire et préservation des écosystèmes. Cependant, l'efficacité relative de ces systèmes pour nourrir l'humanité sans conversion des terres, et leur viabilité économique, restent très débattues. Ces modèles sont par ailleurs essentiellement conceptuels (Gaba *et al.*, 2014), du fait des lacunes dans les connaissances sur le fonctionnement des agroécosystèmes (Balvanera *et al.*, 2014), sur les liens entre biodiversité et fonctions (Reiss *et al.*, 2009 ; Wood *et al.*, 2015 ; Funk *et al.*, 2016), entre fonctions et services (Swift *et al.*, 2004), ou sur les compromis entre services (Bennett *et al.*, 2009). Enfin, l'intégration de la conservation de la biodiversité dans les politiques publiques repose sur la mise en œuvre d'un ensemble de décisions individuelles et collectives, et représente un véritable défi soulevant la question de la gestion des biens communs.

Pour en savoir plus

Balvanera P., Siddique I., Dee L., Paquette A., Isbell F., Gonzalez A. *et al.*, 2014. Linking Biodiversity and Ecosystem Services: Current Uncertainties and the Necessary Next Steps. *Bioscience*, 64 (1), 49-57.

Bennett E.M., Peterson G.D., Gordon L.J., 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12 (12), 1394-1404.

Funk J.L., Wolf A.A., 2016. Testing the trait-based community framework: do functional traits predict competitive outcomes? *Ecology*, 97 (9), 2206-2211.

Gaba S., Bretagnolle F., Rigaud T., Philippot L., 2014. Managing biotic interactions for ecological intensification of agroecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2 (29).

Reiss J., Bridle J.R., Montoya J.M., Woodward G., 2009. Emerging horizons in biodiversity and ecosystem functioning research. *Trends in Ecology and Evolution*, 24 (9), 505-514.

Swift M.J., Izac A.M.N., Van Noordwijk M., 2004. Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes: are we asking the right questions? *Agriculture Ecosystems and Environment*, 104 (1), 113-134.

Wood S.A., Karp D.S., Declerck F., Kremen C., Naeem S., Palm C.A., 2015. Functional traits in agriculture: agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology and Evolution*, 30 (9), 531-539.



PARTIE III

DES INSTRUMENTS POUR L'ÉTUDE DES AGROÉCOSYSTÈMES

CHAPITRE 8

Les infrastructures d'observation et d'expérimentation : vers une dynamique européenne

*Laurent Ruiz, Gilles Lemaire, Abad Chabbi,
François Tardieu, André Chanzys, Guy Richard*

► Des travaux en agronomie historiquement basés sur des expérimentations de longue durée

La recherche dans le domaine de l'agriculture s'est initialement dotée d'outils d'expérimentation et d'observation *in situ* afin d'analyser les effets des techniques agricoles, appliquées sur un champ cultivé, sur les processus déterminant la production. Le sol étant la composante la plus permanente de l'agroécosystème, les expérimentations et observations mises en œuvre concernaient surtout les caractères du sol intervenant directement dans les processus de production végétale et définissant les composantes de la fertilité. Ainsi des dispositifs expérimentaux de longue durée ont été mis en place un peu partout dans le monde pour étudier l'évolution de la fertilité des sols en fonction de pratiques agricoles bien identifiées : amendement organique, fertilisation minérale, rotation des cultures, travail du sol.

Le plus ancien de ces dispositifs expérimentaux toujours en activité est celui de Rothamsted, en Angleterre (1843) ; en France, ce sont les dispositifs expérimentaux « Dehéraïn » à Grignon (1875) et les « 42 parcelles » de Versailles (1928). Ces essais de longue durée ont souvent associé des dispositifs de lysimétrie, permettant d'étudier les transferts verticaux d'eau, d'éléments minéraux et de matières organiques à la base des sols cultivés. Ces infrastructures, certes très finalisées et fragmentées, ont joué un rôle essentiel dans l'élaboration des connaissances

scientifiques indispensables à l'agronomie du champ cultivé. En particulier, l'analyse comparative des résultats provenant de dispositifs de ce type dans le monde entier a fourni et continue de fournir les bases pour la compréhension de la dynamique d'évolution des composantes de la fertilité des sols, sans lesquelles nos connaissances resteraient largement limitées aux conditions contextuelles locales, ainsi que l'établissement de références permettant de prévoir la réponse des cultures aux apports d'éléments fertilisants à partir des analyses de sol.

Depuis les années 1990, la reconnaissance de la multifonctionnalité (économique, sociale et environnementale) de l'agriculture (sommet de Rio, 1992) a incité la recherche agronomique à prendre en compte l'environnement de façon explicite, à la fois comme ensemble de facteurs interagissant sur la production agricole et comme ensemble de fonctions ou services, directement ou indirectement affectés par les pratiques mises en œuvre dans les agroécosystèmes. Or, les dispositifs expérimentaux existants ne suffisaient plus pour répondre à ces nouvelles problématiques, car ils étaient le plus souvent conçus et construits en fonction de la seule problématique de production agricole, en réponse à des modifications monofactorielles (en dehors des expérimentations dites « système » ayant vocation à tester un ensemble de connaissances pour la conception et le pilotage de systèmes de culture, voir chapitre 18). Ces dispositifs étaient souvent restreints à l'analyse de processus locaux (parcelle agricole) ne permettant pas d'aborder les processus spatiaux plus larges et de changement d'échelle qu'implique l'étude de l'environnement. Enfin, ils étaient le plus souvent conçus et gérés par des communautés scientifiques monodisciplinaires, ce qui rendait souvent leurs résultats difficilement valorisables par des communautés scientifiques interdisciplinaires concernées par l'étude des relations entre agriculture et environnement. Ainsi, même si certains dispositifs historiques méritaient d'être maintenus pour assurer la continuité des séries de données, la recherche agronomique a dû concevoir et mettre en place de nouveaux types d'infrastructures de recherche intégrée.

► L'émergence de nouvelles infrastructures de recherche

À la fin des années 1990, les communautés scientifiques de différents pays du monde concernés par l'étude des surfaces continentales constataient que la compartimentation des connaissances et la trop grande contextualisation des données d'observation ne permettaient pas de générer les fonctions génériques et globales nécessaires pour comprendre l'impact des changements globaux sur l'environnement. Il est apparu nécessaire de les doter d'outils permettant d'agréger leurs disciplines autour de problématiques environnementales plus intégratives¹²⁰, à l'instar des grandes infrastructures de recherches partagées qui ont profondément structuré des disciplines scientifiques comme l'astrophysique, l'océanographie ou la météorologie. Les années 1990 sont aussi celles du développement de la modélisation du sol et des cultures. Ceci changeait la conception des dispositifs d'observation, qui n'étaient plus seulement destinés à décrire des relations plante-milieu dans des conditions particulières, mais aussi à établir les paramètres de modèles qui permettent d'étendre la portée des résultats observés.

120. De Boeck H.J Vicca S., Roy J., Nijs I., Milcu M., Kreyling J. *et al.*, 2015. Global change experiments: challenges and opportunities. *Bioscience*, 65 (9), 922-931.

En France, le concept d'ORE (Observatoire de recherche en environnement) a été formulé et explicité par le ministère de la Recherche en 2001 sous l'impulsion de l'INSU (André Mariotti) afin de doter la communauté scientifique travaillant sur les problèmes d'environnement d'outils d'observations, de mesures et de modélisation adaptés à l'étude des dynamiques d'évolutions à moyen et long terme des différents systèmes continentaux (écologiques, hydrologiques, atmosphériques, pédologiques et géologiques) en fonction des forçages directs qu'ils subissent du fait des activités humaines, ou indirects *via* les changements globaux. L'objectif principal des ORE est de générer et de fournir à la communauté scientifique des données fiables et de qualité, répétées régulièrement et sur des durées longues, issues de l'observation de variables de différentes natures (physiques, chimiques, biologiques) sur le long terme, mais aussi d'expérimentations sur les écosystèmes également sur le long terme. En 2010, l'INSU a confirmé l'intérêt de ces outils et étendu le concept en mettant en place les Systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement (Soere), en mettant l'accent sur l'importance de la mise en réseau des observatoires élémentaires. À l'Inra, dès 2001, la direction scientifique Environnement, forêt et agriculture (Jean Boiffin et Pierre Stengel) a vu dans le concept d'ORE un moyen de consolider les recherches de l'institut en matière d'environnement en utilisant le rôle structurant et fédérateur de tels outils partagés dans le domaine des agroécosystèmes. Certains dispositifs expérimentaux pilotés par l'Inra ont donc été inscrits dès 2002 dans la démarche de labellisation proposée par l'INSU, mais surtout une réflexion globale a été engagée pour adapter la démarche aux spécificités des sciences agronomiques (choix des forçages qui répondaient aux pratiques de gestion agronomique telles que la maîtrise de la fertilité des sols et de la biodiversité, choix des variables suivies couvrant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du milieu, etc.).

La problématique environnementale liée à l'activité agricole implique une association étroite entre :

- l'observation, l'acquisition, l'enregistrement, la conservation, la mise à disposition de séries de données sur le long terme, couvrant une large gamme de processus ;
- l'application expérimentale de forçages sur les agroécosystèmes considérés, afin de différencier des séries de données entre elles pour en faciliter une interprétation causale ;
- la modélisation, qui permet d'étendre, à partir d'interprétations causales, la portée des observations au-delà des sites d'observation.

Ces fonctions « observation *vs* expérimentation *vs* modélisation » sont, bien entendu, pondérées entre elles de manière différente selon les entités spatiales prises en compte (ex. : plantes individuelles, parcelles agricoles ou bassins versants), pour lesquelles l'approche expérimentale est plus ou moins aisée, et en fonction des objectifs mêmes du dispositif : « monitoring *in situ* » *vs* « analyse mécaniste ». Les outils et dispositifs permettant d'acquérir de telles données sont maintenant conçus pour nourrir des modèles qui pourront intégrer ces données. Il s'agit alors soit de fournir des bases de données pour alimenter des modèles existants à des fins de calibrage et ensuite de simulations, soit de permettre la formulation et le test d'hypothèses dans le cadre de l'évolution de modèles de fonctionnement des agroécosystèmes. Au sein du département Environnement et Agronomie (EA), cette réflexion a été précisée en distinguant les deux grands types de questions qui

se posent dans le domaine des agroécosystèmes : « Que se passe-t-il si ? », qui concerne la réaction de l'agroécosystème à un forçage extérieur, et « Que faut-il faire pour ? », qui concerne la manière d'agir sur l'agrosystème en vue d'obtenir le résultat espéré. Autant les dispositifs expérimentaux et infrastructures « classiques » basés sur une approche factorielle permettent en général d'aborder le premier type de question, autant il importe aussi de se doter des outils expérimentaux permettant d'aborder ce deuxième type de question.

La phénomique est apparue un peu plus tard, au début des années 2000. Elle répondait à un triple besoin. Pour les agronomes, il s'agissait d'intégrer la diversité des génotypes en établissant les lois de variation des rendements et des bilans environnementaux associés à une culture dans un milieu donné avec le génotype. Pour les modélisateurs, il s'agissait d'identifier des paramètres spécifiques pour chaque génotype. Pour les généticiens, il s'agissait d'analyser le contrôle génétique de nouveaux caractères qui déterminent le rendement et les bilans environnementaux. Pour les modélisateurs, la phénomique porte un potentiel de remise en cause des modèles de culture. Les progrès de l'imagerie, des réseaux de capteurs et des traitements de l'information permettent maintenant de réaliser, sur des centaines de génotypes, les mesures qui n'étaient réalisées que sur quelques-uns. À l'Inra, la direction générale a souhaité développer une infrastructure de phénomique à partir d'installations déjà existantes ou à créer. Cela s'est traduit par la création de l'infrastructure Phenome (encadré 8.1), la spécialisation de certaines unités expérimentales dans le phénotypage et, au-delà, des changements de pratiques dans d'autres unités expérimentales, en particulier la caractérisation environnementale et le traitement de l'information.

► Les infrastructures d'observation et d'expérimentation du département Environnement et Agronomie

Les infrastructures de recherche du département EA ont pour objectif de répondre à des enjeux scientifiques au travers de l'évaluation de l'impact des changements globaux sur le phénotypage des plantes cultivées et sur le fonctionnement des agroécosystèmes, et à des enjeux de partenariat aux niveaux national et européen. Elles répondent à un cahier des charges commun qui repose sur plusieurs piliers :

- une problématique multifactorielle permettant réellement de coupler fonctions de production agricole et fonctions environnementales dans toutes leurs dimensions ;
- un dispositif partagé pluridisciplinaire, dans la conception et la gestion duquel on implique une communauté scientifique large et donnant un accès le plus ouvert et le plus large possible aux données produites ;
- une exigence de qualité dans l'acquisition, l'archivage et la traçabilité des données et échantillons, ainsi qu'une politique de veille et d'actualisation technologique en matière de capteurs et de traitement des données ;
- un interfaçage explicite avec les plateformes de modélisation et de simulation susceptibles de valoriser les données acquises ;
- une capacité à travailler en réseau.

Dans le cadre de ce cahier des charges, chaque infrastructure comporte des spécificités marquées (tableau 8.1). Bien identifier ces spécificités les unes par

Tableau 8.1. Les infrastructures de recherche du département Environnement et Agronomie.

Type d'activité principal	Thématique de recherche	Échelles spatiales	Échelles temporelles	Dispositifs	Insertion dans des structures reconnues au niveau	
					National (IR)	Européen (Esfri)
Expérimentation	Interactions génome des plantes et environnement	Organe, plante entière, peuplement végétal	De la seconde au cycle de culture	Plateformes de phénotypage (serre et champ), réseaux de parcelles	Phenome (encadré 8.1)	Emphasis
	Conception de systèmes de culture	De la parcelle au système de culture	De l'heure à la décennie	Expérimentations-système au sein des unités expérimentales de Toulouse, Dijon, Grignon, Lusignan		
	Interactions entre cycles biogéochimiques, biologiques, hydrologiques et activités humaines	Parcelle agricole	De la minute à la pluridécennie	ORE ACCB ORE PRO	AnaEE (encadré 8.2)	AnaEE
Paysage		De la journée à la décennie	Zone-atelier Sebiopag			
Observation		De la parcelle au bassin versant élémentaire	De l'heure à la pluridécennie	ORE AgrHys ORE Omere	Ozcar	Elter
		Variations spatiale et temporelle des paramètres environnementaux	Mesures ponctuelles à l'échelle nationale	De l'heure à la pluridécennie	Stations ICOS (flux vers l'atmosphère)	ICOS
	Réseau RMQS (sol) Réseau Agroclim (climat)					

ORE : Observatoire de recherche en environnement ; ACCB : Agroécosystèmes, cycles biogéochimiques et biodiversité ; PRO : Produits résiduaire organiques ; AgrHys : Temps de réponse dans les agrohydrosystèmes ; Omere : Observatoire méditerranéen de l'environnement rural et de l'eau ; IR : infrastructure de recherche ; Sebiopag : Services écosystémiques assurés par la biodiversité dans les paysages agricoles ; RMQS : Réseau de mesures de la qualité des sols ; Esfri : European Strategy Forum on Research Infrastructures ; AnaEE : Analyses et expérimentations sur les écosystèmes ; Ozcar : Observatoires de la zone critique applications et recherches ; Elter : Long-Term Ecosystem Research in Europe ; ICOS : Integrated Carbon Observation System.

Le département EA soutient également des laboratoires d'analyses centralisés sur les végétaux (Bordeaux) et les sols (Arras, Versailles et Dijon), qui assurent la majeure partie des analyses chimiques, biochimiques et biologiques de ces dispositifs (<http://www.ea.inra.fr/Les-outils-collectifs/outils-analytiques>).

rapport aux autres permet de les interfacer dans des dispositifs opérationnels plus complémentaires. Lieux de conception et/ou de test de méthodologies innovantes, supports pédagogiques, les infrastructures de recherche sont aussi des plateformes d'accueil pour des équipes de recherche diverses où se construit une science pluridisciplinaire autour d'un objet commun. Naturellement, la confrontation des résultats issus des différentes infrastructures est nécessaire pour assurer la généricité des connaissances produites. Aussi, le département EA a encouragé les interactions puis la construction de réseaux formels entre infrastructures (encadré 8.2). Cet important effort de structuration se traduit par une meilleure visibilité nationale et rend possible l'intégration des dispositifs de l'Inra dans les réseaux internationaux (tableau 8.1).

► L'ouverture et la diffusion des données

L'impératif de mettre à disposition de la communauté scientifique de la façon la plus large possible les données générées par les infrastructures de recherche était présent dans la philosophie des ORE dès leur mise en place en 2001. Le cadre

réglementaire régissant les données publiques était alors encore embryonnaire et mal connu. Si dès 1998, la convention d'Aarhus pose le principe du droit d'accès du public aux données environnementales publiques, il faut attendre 2007 et la directive européenne Inspire (Infrastructure for Spatial Information in Europe) pour que soit posée l'obligation de permettre au public de « trouver, voir, télécharger » les données géographiques publiques. En France, une volonté politique d'ouvrir l'accès aux données publiques et administratives a conduit en 2011 à créer le site data.gouv.fr, qui offre un support pour faciliter la diffusion de ces données. En 2016, le principe de l'*open data* est inscrit dans la loi Lemaire et rend obligatoire, sauf exception, la mise à disposition des données publiques. La communauté internationale s'est mobilisée sur la question de l'*open data*, ce qui a conduit à la formalisation du principe Fair (*findable, accessible, interoperable, reusable*), désormais fortement encouragé, notamment au niveau européen.

Les infrastructures de recherche du département EA ont suivi et parfois anticipé ce mouvement. Initialement, les objectifs principaux étaient à la fois d'archiver et de partager les données au sein des équipes productrices, et d'informer la communauté scientifique de l'existence des données (métadonnées). Le rapide développement des techniques de traitement de grands jeux de données (*big data*) d'une part et la mise en place de plateformes de modélisation¹²¹ d'autre part ont renforcé la prise de conscience de l'intérêt de diffuser non seulement les métadonnées, mais aussi les données brutes, accompagnées de métadonnées précisant comment interpréter ces données, de sorte qu'elles soient exploitables, c'est-à-dire lisibles par un ordinateur et structurées pour permettre leur traitement automatisé.

Cependant, les différentes infrastructures présentent encore aujourd'hui des situations contrastées vis-à-vis de l'ouverture de leurs données. Les raisons en sont multiples.

La première est d'ordre technique. Structurer et diffuser des systèmes d'information demande des compétences, du temps et un financement dans la durée. Pour les données spatiales, les standards proposés par l'Open Geospatial Consortium ont permis dès les années 2010 de proposer des infrastructures de données spatiales pour diffuser données et métadonnées sur internet, de façon « libre, modulaire, interopérable ». Pour les données temporelles, les standards sont plus récents et moins faciles d'accès. La Cellule éco-informatique a été mise en place en 2009 à l'Inra pour tenter de lever cette contrainte. Les infrastructures nationales travaillent activement dans cette direction, ce qui nécessite :

- d'identifier tous les objets présents dans une installation (caméras, capteurs, plantes ou parcelle) avec un identifiant unique ;
- de conserver de manière organisée les métadonnées de provenances diverses afin de réanalyser les données, par exemple les étalonnages, les caractéristiques spatiales des champs étudiés ainsi que les positions spatiales des parcelles expérimentales, et les outils d'analyse utilisés ;
- de définir des référentiels sémantiques constitués de vocabulaires contrôlés et d'ontologies afin de décrire précisément et sans ambiguïté le contenu d'une donnée : grandeur, objet auquel se rattache la grandeur, méthodes, caractéristiques spatio-temporelles, d'objets, d'événements et de caractères permettant d'interpréter les données, avec une triple définition des variables (définition, unité, méthode).

121. <http://www.ea.inra.fr/Les-outils-collectifs/plateformes-de-modelisation>.

Encadré 8.1. L'infrastructure française de phénomique et ses déclinaisons européennes

En 2011, la phénomique était présente dans quelques sites Inra et Arvalis. Le Programme d'investissements d'avenir a permis de la développer au travers d'un projet spécifique, Phenome, financé à partir de 2012 (ANR-INBS, 24 M€). Phenome fournit les moyens pour l'analyse de la variabilité génétique des réponses de centaines de génotypes à des conditions environnementales explicitement définies. Il a pour cela une stratégie multi-échelles en combinant :

- des installations :
 - en conditions contrôlées mesurant sur quelques minutes ou heures la croissance des feuilles et des racines (deux installations), la croissance journalière (feuilles/racines), l'architecture, la transpiration, l'interception lumineuse et le développement reproducteur de milliers de plantes entières (deux installations),
 - en conditions semi-contrôlées de champ (abris anti-pluie et enrichissement en CO₂) mesurant toutes les semaines la mise en place de la surface foliaire, l'architecture, et l'interception lumineuse (deux installations),
 - en conditions non contrôlées de champ cultivé, réalisant les mêmes mesures à haut débit sur des gradients environnementaux (trois installations) ;

• des réseaux de parcelles agricoles pour la mesure du rendement (travaux méthodologiques). Toutes les installations bénéficient d'un même réseau de capteurs environnementaux, si bien que des analyses trans-échelles sont possibles. Phenome bénéficie de services communs, en particulier une installation pour la métabolomique haut débit et une pour la structure des grains et des plantes. Des outils d'imagerie communs équipent toutes les installations, au champ (drones, phéno-mobile, caméras multispectrales et Lidar) ou en conditions contrôlées (représentation 3D de plantes), des applications d'analyse d'image et de calculs de caractères phénotypiques sont disponibles. Un système d'information commun a été développé, qui permet de tracer l'ensemble des événements, des conditions environnementales et des calibrations et positions de capteurs, ainsi que d'organiser les données phénotypiques de façon à ce que des réanalyses et des méta-analyses soient possibles. Enfin, des applications statistiques et des liens avec des plateformes de modélisation ont été développés.

Phenome a été moteur pour une infrastructure européenne de phénomique, Emphasis, sur la feuille de route Esfri et bénéficiaire d'un projet européen Horizon 2020 pour sa préparation (coordination U. Schurr, Allemagne, responsabilité Inra pour le Working Package sur le système d'information). Une autre déclinaison européenne est le projet « infrastructure » EPPN2020 (coordination F. Tardieu, Inra, 11 partenaires), qui finance des accès aux installations européennes et permet le développement d'applications communes, en particulier le système d'information qui a pour ambition de devenir européen. Le principal objectif de ces déclinaisons européennes est de créer une communauté de phénomique capable de développer des projets communs et de fournir un outil unique d'accès aux installations et aux données générées à l'échelle européenne. C'est aussi le lieu pour interagir avec d'autres communautés : article* sur la complémentarité entre Emphasis et AnaEE, travaux en cours avec les communautés de génomique (infrastructure européenne Elixir**) et de modélisation (projet international The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project***).

* Roy J, Tardieu F, Tixier-Boichard M., Schurr U., 2017. European infrastructures for sustainable agriculture. *Nature Plants*, 3, 756-758.

** A distributed infrastructure for life-science information, <https://www.elixir-europe.org/>.

*** AgMIP, <http://www.agmip.org/>.

Le web sémantique offre désormais des technologies pour organiser et exploiter ces métadonnées de manière flexible et efficace, et faciliter ainsi l'interopérabilité.

La deuxième raison est d'ordre « éthique ». Les porteurs d'infrastructures craignent de diffuser des données soumises à des contraintes légales (données

Encadré 8.2. L'infrastructure de recherche pour l'Analyse et l'expérimentation sur les écosystèmes (AnaEE)

L'idée fondatrice a été portée au niveau européen dès 2005 par Gilles Lemaire et Abad Chabbi, de l'Inra, et par Jacques Roy, du CNRS. L'objectif était d'offrir un accès aux meilleurs dispositifs d'expérimentation sur les écosystèmes afin d'appuyer la communauté scientifique internationale dans les sciences de l'environnement (écologues, agronomes) pour mieux comprendre la dynamique de la biodiversité et des écosystèmes terrestres et aquatiques dans un contexte de changement global, et définir ainsi des modalités de gestion durable des milieux. Le concept de l'infrastructure est de rassembler des dispositifs fortement contrôlés et de taille suffisante pour manipuler un écosystème (Ecotrons de quelques mètres cubes), des dispositifs *in natura* avec la possibilité de manipuler plusieurs facteurs avec répétition ainsi que des plateformes analytiques et de modélisation. Il s'agit de consolider des coopérations avec d'autres infrastructures de recherche européennes (ICOS et Lifewatch) et de tisser des liens avec des infrastructures comparables aux États-Unis (NEON) et en Australie (TERN). AnaEE a été inscrite sur la feuille de route européenne Esfri en 2010, portée par Abad Chabbi de l'Inra, et est actuellement en phase de mise en œuvre avec la création d'une structure de gouvernance (Eric) prévue en 2019 dont la France hébergera la direction centrale.

Parallèlement, au niveau français, l'infrastructure AnaEE-France a reçu le soutien du Programme d'investissements d'avenir dans le cadre des infrastructures nationales en biologie et santé. Le projet, essentiellement porté par l'Inra et le CNRS, a permis de structurer le nœud français. AnaEE-France regroupe une trentaine de plateformes expérimentales couvrant les principaux biomes (forêts, cultures, prairies, lacs), plateformes analytiques (laboratoires d'analyses ou équipements mobiles partagés) offrant des capacités d'analyse originales et adaptées à la caractérisation des écosystèmes et des plateformes de modélisation. Le financement a permis de mettre à niveau les services et d'instaurer une gouvernance afin de faciliter l'accès aux plateformes et la réutilisation des données. Le département EA est un contributeur important d'AnaEE, avec les dispositifs expérimentaux des Soere ACBB (pour l'analyse des agrosystèmes) et PRO (pour l'étude de l'impact à long terme de l'épandage des produits résiduels organiques), quatre plateformes analytiques (Biochem-Env, GenoSol, spectroscopie mobile pour la caractérisation des isotopes du carbone et de l'azote, et les composés organiques volatils) et les plateformes de modélisation (Record* et Sol Virtuel). Les fonctions essentielles de l'infrastructure sont de proposer une offre claire, lisible et actualisée des services expérimentaux**, de contribuer à l'animation de la communauté scientifique dans le champ spécifique de l'expérimentation sur les écosystèmes pour optimiser l'utilisation des plateformes, de garantir des mesures de qualité et de faciliter la réutilisation des données. Ce dernier point nécessite le développement d'outils informatiques (systèmes d'informations, catalogues de données) et la mise en place de référentiels sémantiques interopérables avec les autres initiatives internationales. Toutes ces tâches ont vocation à s'harmoniser au niveau européen lorsque l'infrastructure sera opérationnelle.

* Record : Rénovation et coordination de la modélisation de cultures pour la gestion des agrosystèmes.

** www.anaee-france.fr.

personnelles, secret industriel...). Un document récent¹²² clarifie le cadre légal de la diffusion des données de recherche. Par ailleurs, les producteurs de données sont souvent réticents à diffuser des données qui n'ont pas été rigoureusement validées par les équipes scientifiques. Une telle validation prend du temps, à l'heure où les capteurs et les outils informatiques permettent de diffuser les données en

122. Becard N., Castets-Renard C., Chassang G., Dantant M., Freyt-Caffin L., Gandon N. *et al.*, 2017. Ouverture des données de la recherche. Guide d'analyse du cadre juridique en France, 45 p.

« temps réel ». La diffusion de plusieurs versions successives des jeux de données, accompagnées de dates, est une solution qui se répand actuellement.

La troisième raison est liée à la priorité donnée à la valorisation des données par les producteurs. Dans ce but, certaines infrastructures imposent un « embargo » parfois de plusieurs années. D'autres mettent en place des procédures de traçabilité de l'utilisation des données (identifiant, partage sur demande, etc.). Si la reconnaissance des producteurs de données est légitime, ces procédures de traçabilité limitent les possibilités d'utilisation et de traitement des données, en particulier pour les inter-comparaisons entre infrastructures. Des règles optimisant les contraintes sont en train d'être édictées. De plus, des moyens de reconnaissance du travail des producteurs de données se développent, comme par exemple les *data papers*, qui permettent de publier des jeux de données et/ou d'attribuer un identifiant pérenne et citable (DOI).

► Conclusion

Au cours des deux dernières décennies, la construction des infrastructures de recherche à l'Inra a profondément modifié la façon dont sont pensés, mis en place, gérés et exploités les dispositifs d'acquisition de données scientifiques. Le département EA a accompagné cette révolution. Mieux structurés, mieux partagés, mieux valorisés, les dispositifs actuels ont un rayonnement national et international. Les défis pour l'avenir sont doubles.

L'évolution et la structuration des infrastructures de recherche doivent se poursuivre avec une ambition européenne affirmée. Elles ont demandé et demanderont encore un important effort organisationnel de la part des agents impliqués dans ces dispositifs, qui expriment souvent le sentiment de s'éloigner de leur « vrai métier ». Il est donc essentiel de maintenir un bon équilibre entre les moyens et les efforts consacrés aux dispositifs de base (activités scientifiques et techniques) et ceux consacrés aux activités administratives et organisationnelles.

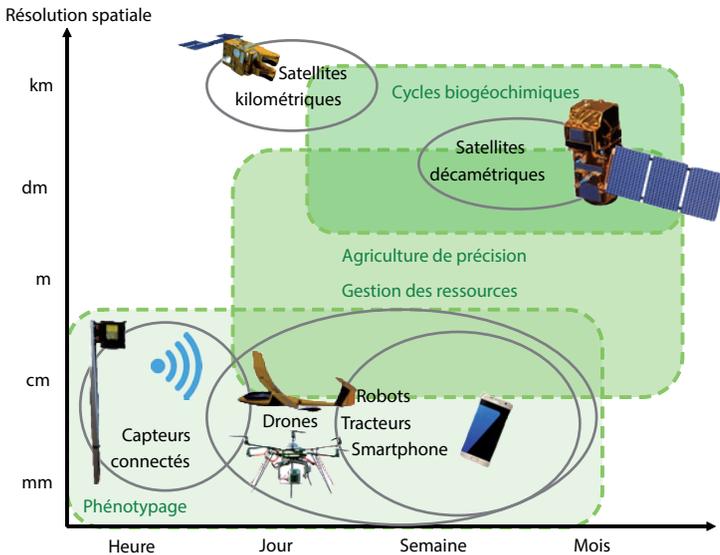
Il s'agit d'inventer une « nouvelle science », qui utilisera pleinement le potentiel des réseaux, du partage des données, des nouveaux outils d'analyse des données et de modélisation. Pour cela, il conviendra de trouver les moyens d'assurer à la fois la diffusion la plus rapide et complète des données (dans l'esprit du mouvement *open data*) et le maintien de la rigueur et de la qualité nécessaire à la démarche scientifique. L'attractivité de ces dispositifs et le soutien institutionnel dans la durée sont désormais indissociables.

La télédétection, proche ou lointaine, pour le suivi des ressources agricoles et environnementales et l'amélioration variétale

Frédéric Baret, Jacques-Éric Bergez, Laurent Prévot

La télédétection satellitaire permet de suivre la végétation sur de larges étendues et ainsi de répondre à quelques grandes questions scientifiques abordées par le département EA : c'est le cas en particulier de la description et de la modélisation des cycles de l'eau, du carbone et de l'azote. Il est ainsi possible de réaliser des bilans spatialisés sur de grands éléments du paysage et de comprendre les variations observées liées à la gestion des ressources, à l'occupation du sol, aux pratiques et au climat.

Les échelles spatiales et temporelles associées aux différentes applications abordées par le département EA sont représentées par les boîtes colorées sur la figure ci-après : cycles biogéochimiques, gestion des ressources et agriculture de précision, phénotypage. Ces applications sont servies par un ensemble d'outils d'observation (représentés par les ellipses noires sur la figure) allant du satellite au capteur fixé au sol en passant par le drone, le robot ou le smartphone. Les activités de recherche en télédétection ont accompagné les développements technologiques très rapides observés au cours des quatre dernières décennies, caractérisées par une amélioration constante de la résolution et de la fréquence des observations.



Fréquence de revisite et résolution spatiale des différentes applications satellitaires utilisées dans le département EA.

En commençant à l'échelle du globe...

Depuis les années 1980, la surface terrestre et la végétation qui en recouvre la majeure partie sont suivies grâce aux premiers satellites ayant une résolution spatiale de l'ordre du kilomètre. Leur grande largeur de trace au sol permet une fréquence de revisite quotidienne. L'Inra a très tôt développé des algorithmes d'estimation de caractéristiques de la surface très utilisées pour la description des cycles biogéochimiques, en particulier l'eau et le carbone, mais aussi pour l'évaluation des productions aux échelles larges (nationales, continentales, globales) et la prévision météorologique. La surface foliaire, la fraction de rayonnement intercepté par la végétation, l'albédo, l'évapotranspiration et l'humidité du sol sont les princi-

pales caractéristiques estimées par télédétection. La fréquence temporelle des observations permet de suivre la phénologie et de cartographier l'occupation du sol. Les trente-cinq années d'archive permettent d'évaluer les impacts du changement climatique et de la pression anthropique sur la végétation.

Les algorithmes développés restent relativement simples, car la quantité d'information disponible est faible. En particulier, l'hétérogénéité des pixels kilométriques composés d'éléments variés du paysage (champs, zones urbaines ou naturelles) limite la précision des estimations des caractéristiques de la surface. Des méthodes de désagrégation spatiale ont été proposées par l'Inra dès les années 1990, qui combinent des observations peu fréquentes de satellites décimétriques aux données des satellites kilométriques, beaucoup plus fréquentes. Le suivi des cultures a bénéficié de ces avancées tout en restant encore cantonné aux échelles régionales.

... Pour passer à l'échelle de la parcelle...

Ce n'est que dans les années 2000, avec la multiplicité des satellites décimétriques (ex. : Landsat, SPOT, RapidEye, DMC), que l'accès au suivi intraparcellaire a été possible grâce à l'augmentation de la fréquence de revisite permettant de développer l'agriculture de précision. Compte tenu de la probabilité d'occurrence des nuages, une fréquence minimale comprise entre 5 et 10 jours est nécessaire. Certaines cultures telles que les vignes et vergers restaient encore difficiles à caractériser compte tenu du mélange entre rangs et inter-rangs présent dans le pixel décimétrique. Le recours à l'observation par drone a permis de lever cet obstacle grâce à des résolutions meilleures que le centimètre. En dehors de ces cultures particulières, le drone est également utilisé pour l'aide à la décision en grande culture, mais avec une forte limitation de la capacité de couverture et à un coût peu compétitif vis-à-vis des satellites décimétriques dont les données sont maintenant gratuites.

... Puis à celle de la plante et de l'organe

Les moyens d'observation rapprochée (drone, robot, capteur sur tracteur ou sur perche, smartphone, capteur connecté fixe) se sont fortement développés depuis les années 2010. Ils ont été appliqués par l'Inra au phénotypage haut débit au champ, qui consiste à caractériser le comportement des variétés pour accélérer le progrès génétique. Ces nouveaux moyens d'observation ont révolutionné les méthodes d'interprétation des images à très haute résolution pouvant aller jusqu'à une fraction de millimètre. Les méthodes d'apprentissage automatique profond, combinées à la modélisation architecturale 3D, permettent d'accéder à de nombreuses caractéristiques : densité de plantes, de tiges, de feuilles ou d'épis, contenu en chlorophylle des feuilles en relation avec le statut azoté des plantes, hauteur des plantes, architecture 3D fine, évaluation de symptômes de maladies, de stress, phénologie, surface foliaire, efficacité d'interception du rayonnement solaire, etc. La masse de données de phénotypage haut débit maintenant accessible va permettre à l'Inra d'améliorer la modélisation du fonctionnement des plantes et d'associer au génome les déterminants des différents processus impliqués dans la réaction de la plante à son environnement.

Un rayonnement de l'Inra qui s'est appuyé sur les approches de modélisation mécaniste

Les équipes Inra travaillant en télédétection ont très tôt acquis un rayonnement international, en proposant des méthodes d'interprétations nouvelles basées sur la physique du signal, héritées de la culture « bioclimatologie », très prégnante parmi les télédéTECTEURS. L'Inra fut ainsi pionnier dans le développement de modèles de transfert radiatif qui décrivent les interactions entre le rayonnement électromagnétique utilisé et la végétation ou le sol. Ces modèles ont permis de mieux appréhender les principaux facteurs qui influencent le signal télédéTECTÉ et de travailler en étroite collaboration avec les agences spatiales (CNES, ESA, NASA) pour définir de manière optimale les spécifications des nouvelles missions satellitaires telles que SPOT, VEGETATION, PROBA-V, Venus, SMOS, IRSUTE/TRISHNA. La disponibilité et la maîtrise des modèles de transfert radiatif ont également permis de développer des méthodes d'estimation des caractéristiques de la végétation ou du sol par inversion de

ces modèles. Ces méthodes sont maintenant devenues opérationnelles. Elles sont mises en œuvre dans des centres de calcul pour délivrer à la communauté scientifique des produits directement utilisables sous la forme d'estimation de caractéristiques de la végétation ou du sol et les incertitudes associées. Ces approches « statiques » à base mécaniste ont rapidement été étendues au fonctionnement du couvert en exploitant l'aspect dynamique des observations : les approches d'assimilation dans des modèles de fonctionnement du couvert bénéficient de l'apport des données fréquentes des satellites ou des systèmes de proxy-détection. Elles ont permis par exemple de décrire le fonctionnement distribué de bassins versants afin d'optimiser la gestion des ressources en surface (occupation du sol) et en eau. Ce rapprochement entre la physique et la biologie est actuellement au centre des activités en proxy-télédétection, souvent confondue avec le phénotypage haut débit : les connaissances sur le fonctionnement des plantes sont exploitées pour interpréter l'ensemble des observations répétées, réalisées avec différents types de capteurs à haute résolution spatiale, et accéder en retour à une description plus complète et plus précise des mécanismes écophysiologiques.

Et pour conclure

Au cours des dernières décennies, l'histoire de la télédétection à l'Inra a donc été principalement caractérisée par une augmentation progressive de la résolution spatiale et de la fréquence des observations, avec pour but ultime de parfaire notre compréhension du fonctionnement des plantes, formalisé en une modélisation mécaniste. L'amélioration attendue des performances des modèles de fonctionnement pourra alors être mise à profit pour servir l'aide à la sélection variétale et les applications historiques de la télédétection que sont l'aide à la décision et la gestion des ressources. Des stratégies d'observation multi-échelles en cours d'élaboration à l'Inra doivent permettre d'étendre spatialement des observations locales fines (internet des objets, smartphone, drone) à un ensemble de parcelles d'un territoire en les combinant aux données des satellites décamétriques.

Modélisation du fonctionnement des agroécosystèmes : l'épopée Stics

Nicolas Beaudoin, Marie Launay, Dominique Ripoche, Samuel Buis, Éric Justes, Françoise Ruget, Guillaume Jégo, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, Joël Léonard, Hélène Raynal, Nathalie de Noblet-Ducoudré, Bernard Seguin, Françoise Lescourret, Jean-Noël Aubertot, Florence Habets, Pierre-Alain Jayet, Philippe Gate, Bruno Mary

Cette épopée doit beaucoup à la regrettée Nadine Brisson, première capitaine de « l'embarcation Stics ». Nous lui dédions avec émotion ce chapitre, dont les axes reprennent ceux de l'hommage qui lui a été rendu le 16 octobre 2012 conjointement par le département Environnement et Agronomie (EA) de l'Inra et l'Association française d'agronomie¹²³.

Le modèle Stics (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard) a plus de vingt ans. Il fait maintenant partie des cinq modèles de culture les plus cités au monde. Cette *success story* s'est fondée sur un projet collectif dont le creuset a été le département EA naissant. Ce texte tente une analyse réflexive des interactions entre un groupe élargi de chercheurs modélisateurs et la nécessité de mobiliser des moyens sur une très longue durée, marquée par le renouvellement des questions posées face à l'évolution rapide des usages et des contextes d'application.

► Genèse et positionnement du modèle, au carrefour des trois anciens départements, dans une visée agroenvironnementale

Genèse du modèle

En 1996, il existait déjà au niveau international des modèles agronomiques avec une diversité d'orientations, écophysiologique (ex. : Sucros), biogéochimiste

123. AFA : <http://agronomie.asso.fr/lagronomie-pour-tous/empreintes-dagronomes/nadine-brisson/>.

(ex. : Pastis, Century) ou généraliste sol-culture (ex. : Ceres, EPIC, Apsim, Cropsys). Des équipes Inra privilégiaient leur adaptation aux conditions françaises, tandis que d'autres cherchaient à créer de nouveaux modèles, souvent très spécifiques en termes de processus ou de cultures.

Stics est né de l'Action incitative programmée Inra, Ecospace, « Hétérogénéité des milieux cultivés », qui offrait l'occasion de croiser des compétences des trois anciens départements : Bioclimatologie, Agronomie et Science du sol. La création de ce nouveau modèle s'inscrivait dans la visée agroenvironnementale du nouveau département. La première version vint de la fusion de BYM-GOA (croissance de la plante) et de Lixim (minéralisation et lixiviation du nitrate) ; elle fut appliquée aux cultures de blé et de maïs.

Stics a ensuite évolué en se nourrissant des problématiques émergentes, et très diverses : estimation des potentialités de production régionales, besoins en eau et en azote des cultures, lixiviation du nitrate en fonction des pratiques agricoles, agriculture de précision incluant l'assimilation de données de télédétection, prévision de la production fourragère française, adaptation au changement climatique, valorisation des cultures intermédiaires. Dans les dernières années, les problématiques abordées se sont encore élargies à l'évaluation de systèmes de culture dits « agroécologiques », de cultures associées, de cultures pérennes dédiées à la bioénergie, des GES et de la séquestration à long terme de carbone dans le sol.

Cette trajectoire est redevable au formidable charisme et à l'énergie de Nadine Brisson, qui a noué nombre de collaborations avec des chercheurs aux compétences et affiliations variées, et avec des experts des instituts techniques. Stics s'est construit collectivement, à l'interface entre des problématiques scientifiques et finalisées. Suite au décès de Nadine, le relais a été pris par l'équipe projet Stics.

Spécificités de Stics

Le cahier des charges de Stics, coconstruit en 1996, prônait quatre qualités :

- l'équilibre entre les différents compartiments et processus interagissant dans le système sol-plante-atmosphère, qui permet d'obtenir un modèle généraliste, applicable sur une large diversité de thématiques et de contextes ;
- la généralité de la description du fonctionnement de la plante, basée sur des concepts écophysologiques non spécifiques d'une espèce, qui se concrétise par l'existence d'un seul modèle ;
- la simplicité et la sobriété en données d'entrée, avec des paramètres aisément accessibles et peu sensibles au changement d'échelle, qui facilite son utilisation opérationnelle en situations agricoles réelles ;
- la robustesse des formalismes et du paramétrage, qui assure le réalisme dans une large gamme de conditions agroenvironnementales.

Une cinquième qualité, l'évolutivité, s'est imposée au cours du temps. La stratégie a été de concevoir collectivement un modèle dynamique, fonctionnel, mono-dimensionnel, avec une visée agroenvironnementale affirmée. Le modèle peut réaliser des simulations depuis l'échelle parcellaire (modèle seul) jusqu'à l'échelle macro-régionale, mais uniquement en couplage avec d'autres modèles ou outils.

L'intégration dans la communauté scientifique nationale et internationale

La pertinence du cahier des charges et l'efficacité de la construction collective se sont vérifiées par nombre de collaborations scientifiques, partenariats ou

expertises produites. Début 2018, Stics avait été utilisé dans 282 articles scientifiques et 63 thèses. Il est intégré dans de nombreuses plateformes de modélisation. En plus de ses équipes fondatrices, le développement de Stics a associé d'autres forces de l'Inra (départements SAD, MIA, Phase), des instituts de recherche (Cirad, Irstea et CEA), des universités et des écoles d'ingénieurs, ainsi que du développement agricole (instituts techniques, chambres d'agriculture, Agro-Transfert).

Du point de vue international, Stics a servi dès sa création à des travaux du Cirad, au projet européen APES puis aux réseaux COST¹²⁴. Suite au projet Climator (analyse de l'effet du changement climatique sur la production agricole), il a contribué aux exercices d'inter-comparaison de modèles, AgMIP (échelle mondiale) puis Macsur (Europe), et plus récemment CN-MIP (échelle mondiale, protoxyde d'azote, N₂O). Stics est mobilisé sur la question du changement du climat aux côtés des grands modèles mondiaux (ex. : modèles de Wageningen, DSSAT, Apsim, Cropsyst), avec un nombre de citations comparable à ceux-ci (symposium iCropM, 2016).

► La gouvernance du modèle Stics : un modèle collectif innovant

Une gouvernance collective affirmée

Depuis sa création, Stics est l'outil d'un collectif mixte de concepteurs et d'utilisateurs se réunissant tous les deux ans : le groupe des utilisateurs de Stics (GUS). L'explosion des demandes d'application a conduit toutefois à une instabilité du code vers 2004-2006. Le GUS a alors réaffirmé la priorité de robustesse de Stics et institué l'équipe projet Stics pour en assurer la gouvernance. Celle-ci a décidé de dissocier la version standard, seule diffusée, des versions de recherche (voir ci-dessous), et de publier un ouvrage de référence sur les bases scientifiques et techniques de Stics.

L'équipe projet Stics se compose actuellement de 24 volontaires (tableau 9.1) pour gérer la construction itérative du modèle *via* cinq tâches : garantir la performance et la robustesse de la version standard de Stics ; assurer son évolution en collaborant à la construction de versions « de recherche » ; représenter le modèle aux niveaux national et international ; animer la communauté des utilisateurs ; diffuser l'information sur le modèle et dispenser des formations pour son utilisation experte.

Cette embarcation tient le cap grâce à deux flotteurs essentiels : le GUS, une communauté grandissante reconnue comme réseau scientifique Inra-EA ; le département EA, dont le soutien est essentiel grâce à des échanges réguliers.

Un double défi scientifique et technique

La performance de prédiction d'un modèle est fonction du réalisme de son schéma conceptuel, de la fiabilité du code et de la qualité du paramétrage. Plusieurs initiatives de l'équipe projet Stics ont permis de progresser sur chacun de ces aspects : – le système de gestion, qui trace l'évolution des sources et du paramétrage et

124. APES : Agricultural Production and Externalities Simulator ; COST : Coopération européenne en science et technologie.

Tableau 9.1. Composition en 2018 de l'équipe projet Stics et de son bureau.

Éric Justes	Cirad UMR System Montpellier
Dominique Ripoché	Inra US Agroclim Avignon
Marie Launay	Inra US Agroclim Avignon
Samuel Buis	Inra UMR Emmah Avignon
François Affholder	Cirad UPR AIDA, Montpellier
Nicolas Beaudoin	Inra UR AgroImpact Laon
Patrick Bertuzzi	Inra US Agroclim Avignon
Eric Casellas	Inra MIAT Record Castanet-Tolosan
Julie Constantin	Inra UMR AGIR Castanet-Tolosan
Benjamin Dumont	Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech
Jean-Louis Durand	Inra UR P3F Lusignan
Inaki Garcia de Cortazar-Atauri	Inra US Agroclim Avignon
Fabien Ferchaud	Inra UR AgroImpact Laon
Anne-Isabelle Graux	Inra UMR Pegase Rennes
Guillaume Jégo	Agriculture et Agroalimentaire Canada Québec
Christine Le Bas	Inra US InfoSol Orléans
Patrice Lecharpentier	Inra US Agroclim Avignon
Joël Léonard	Inra UR AgroImpact Laon
Florent Levvasseur	Inra UMR EcoSys Grignon
Gaëtan Louarn	Inra UR P3F Lusignan
Alain Mollier	Inra UMR ISPA Bordeaux
Bruno Mary	Inra UR AgroImpact Laon
Françoise Ruget	Inra UMR Emmah Avignon
Loïc Strullu	ASAE Reims

En italique, les membres du bureau de l'équipe projet Stics. ASAE : Association de suivi agronomique des épandages.

permet de combiner la rigueur de l'ingénierie pour la version standard et la créativité pour les versions de recherche (ambidextrie organisationnelle) ;

- l'évaluation systématique des performances globales du modèle, qui se base à la fois sur un système automatisé mobilisant plus de 3 000 jeux de données expérimentaux, et sur une analyse collective régulière des résultats *via* l'équipe projet Stics. La première expérience a fait l'objet d'une publication remarquée (figure 9.1) ;

- le développement modulaire du code pour assurer sa lisibilité, son évolutivité, sa documentation et sa cohérence entre versions ;

- le partage des méthodes et outils développés, notamment pour l'évaluation ou l'adaptation à de nouvelles espèces (Stics_EvalR, OptimiStics).

Une stratégie de consolidation du collectif et d'ouverture internationale

L'équipe projet Stics, constituée sur la base du volontariat, offre une riche diversité de compétences et une capacité démultipliée de veille scientifique. Ses limites sont la faible disponibilité de chaque chercheur, en dehors du pôle informatique. La réponse donnée est la mutualisation des tâches et l'internationalisation de l'équipe projet (tableau 9.1). Un nouveau défi est de capitaliser sur

les formations réalisées dans différents pays (Sri Lanka, Inde, Chine) et sur l'implication dans les projets internationaux (AgMIP, Macsur, CN-MIP). Cela passera notamment par la réussite du projet IdeStics (International Database for Evaluation of Stics), qui vise l'extension et la qualification de la base de données Stics, et qui est soutenu par le département EA.

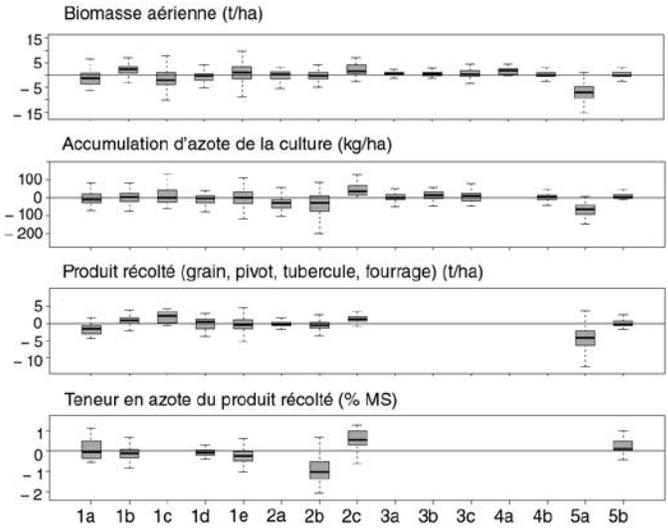


Figure 9.1. Distribution des résidus de prédiction par le modèle Stics v7 de quatre variables agroenvironnementales pour 15 cultures d'intérêt, pour 1 809 unités de simulation à l'échelle de la parcelle-année en France (MS : matière sèche) (Coucheney *et al.*, 2015).

1. Céréales : 1a, orge de printemps ; 1b, blé dur ; 1c, maïs grain ; 1d, orge d'hiver ; 1e, blé d'hiver ;
2. Oléoprotéagineux : 2a, lin ; 2b, pois de printemps ; 2c, colza d'hiver ;
3. Cultures intermédiaires : 3a, moutarde ; 3b, radis ; 3c, ray-grass ;
4. Cultures fourragères : 4a, luzerne ; 4b, prairie ;
5. Cultures à développement indéterminé : 5a, betterave sucrière ; 5b, vigne.

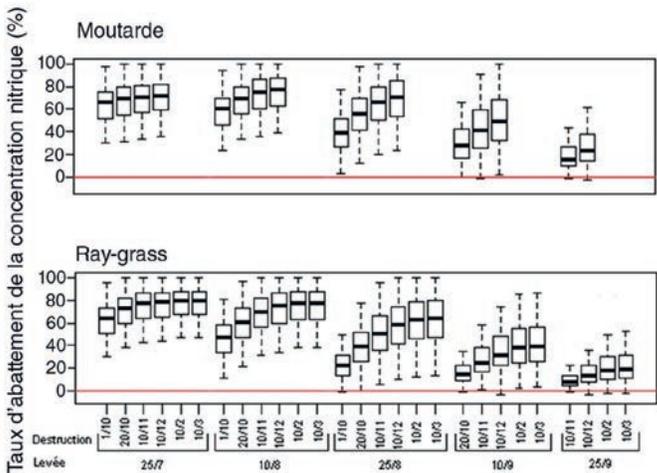


Figure 9.2. Concentration nitrique de l'eau de percolation simulée en fonction des modalités de gestion (dates de levée et de destruction) et de l'espèce de culture intermédiaire, moutarde ou ray-grass. Expertise Inra-DEPE pour le MAAF (Justes *et al.*, 2012).

► Des usages au service de l'amélioration des systèmes de culture

Le positionnement de Stics, à l'interface entre sciences et action, en fait un outil pour instruire certaines questions soulevées par la gestion des systèmes cultivés. Les enjeux structurants du département EA ont été utilisés ici comme clés d'analyse, en prenant comme matériel les articles scientifiques et l'expertise collective.

Gestion, protection et restauration des ressources air, eau et sol

L'évaluation de l'impact des mesures agroenvironnementales sur la pollution nitrique a bénéficié de la généralité multi-espèces de Stics, qui est distribué à l'échelle du bassin hydrologique *via* un système d'information géographique (Bretagne, Beauce, Picardie). Pour gérer les interactions entre unités spatiales, Stics a été couplé à des modèles hydrologiques ou économétriques. Concernant la protection de l'air, les usages portent sur le test de formalismes d'émission (ozone, O_3 , protoxyde d'azote, N_2O , et ammoniac, NH_3).

Bouclage des cycles N-P et stockage du carbone dans les sols

Les impacts de pratiques isolées ou de systèmes de culture sur les diverses pertes d'azote (NO_3 , N_2O , NH_3) ont été simulés à plusieurs échelles temporelles. Cela est favorisé par la généralité et la robustesse de la conceptualisation du cycle C-N interne du sol, pour une large gamme de sols, de systèmes de culture et de résidus organiques, exogènes ou endogènes. La généralité permet d'étudier les effets cumulatifs sur plusieurs rotations successives qui accroissent le stock et la minéralisation nette d'azote du sol.

Stics simule les émissions liées aux cycles C-N servant dans le calcul du bilan des GES (hors méthane, CH_4). Récemment, une description explicite de la dynamique de la biomasse racinaire (dans une version de recherche) a permis une simulation plus réaliste du stockage du C du sol à long terme. En complément, la modélisation de la dénitrification et des émissions de N_2O s'est avérée pertinente (projet CN-MIP).

Évaluation, conception et pilotage de systèmes agricoles multiperformants

Les tests de scénarios ou les prototypages de systèmes de culture innovants ont été conduits à différentes échelles (ANR MicMac, ANR Atcha, bassins bretons). Stics peut être couplé avec un modèle de décision, ce qui a permis, en particulier, de contribuer à instruire les problématiques d'atténuation et d'adaptation des systèmes de culture face au changement climatique (*smart agriculture*).

Paramétrage et test des prédictions de Stics

Parmi les publications, 19 % visent l'évaluation de la performance de prédiction. Outre l'évaluation formelle de Coucheney *et al.* (2015), la majeure partie traite de la conceptualisation d'un nouveau processus qui est conduite et valorisée comme tout projet scientifique. L'adaptation d'une nouvelle espèce à la version standard est souvent conduite comme un projet d'ingénierie ; ce travail indispensable est plus difficile à valoriser *per se* et doit être intégré aux projets qui en bénéficient.

Conclusions transversales

Une critique fréquente de Stics porte sur le nombre de ses paramètres. Cela vient du fait qu'aucun paramètre n'est écrit directement dans le code et que tous sont accessibles. Cet atout scientifique peut être une limite pour l'opérationnalité. Si besoin, la modularité du code permettrait d'en figer un grand nombre dans un outil *ad hoc*.

La performance de prédiction dépend de la qualité des paramètres dits « locaux », qui sont sous la responsabilité de l'utilisateur. Pour limiter les risques d'une pratique « presse-bouton », l'équipe projet s'est investie dans des sessions de formation à la modélisation et à l'utilisation de Stics pour favoriser un usage « adapté et raisonnable » du modèle.

La construction collective de Stics en fait un outil de formation et de synthèse de connaissances interdisciplinaires aux niveaux national et international. Pour le renouveler, continuer d'échanger sur ses bases conceptuelles est vital.

► Au service de questions globales, par modularisation et couplage

Stics a été conçu comme un modèle agroenvironnemental spatialement 1D pouvant être aisément distribué dans l'espace. Très tôt il a intéressé les scientifiques des disciplines connexes et a été utilisé à des échelles plus intégratrices ou pour aider à la compréhension de processus spatialement explicites tels que la dynamique de maladies, le transfert de pesticides (polluants), ou encore l'estimation des impacts des pollutions diffuses d'origine agricole (nitrate, pesticide) sur la ressource en eau.

Un dialogue interdisciplinaire vers une modularisation du code

L'utilisation du modèle dans le contexte de couplage à d'autres modèles et d'intégration dans les plateformes de modélisation a conduit dès 2006 à la refonte du code informatique et, en particulier, à une modularisation de la boucle journalière.

Dans ce contexte, en 2007, le pool informatique de l'équipe projet Stics a rédigé un cahier des charges, en lien avec la plateforme Record (pilotee par les départements EA, MIA, SAE2, Phase et SAD) et les partenaires utilisateurs du modèle : économistes, climatologues, hydrologues. Un travail de restructuration et de recodage complet du modèle, sous forme d'une bibliothèque de fonctions, a été entrepris et a permis le développement d'une nouvelle version nommée ModuloStics en 2008. Cette refonte a eu comme conséquence de favoriser l'emploi du code par d'autres concepteurs.

Les couplages hors plateforme et dans les plateformes

Hors plateforme, Stics a été couplé selon des formes et des finalités variées :

- comme générateur d'un métamodèle agroéconomique avec Aropa (figure 9.3), puis Artix (en cours de développement) ;
- en couplage interactif pour simuler le développement et l'impact de champignons pathogènes (Mila-Stics), le transfert des pesticides (PE-Stics), les problématiques d'agroforesterie (projet Hi-Safe) ;
- en fournissant des données des bilans en eau, C, N aux modèles : FlorSys (adventices), Macro (transfert des pesticides), SVAT-Orchidee (flux eau et C à l'échelle de l'Europe), Archisimple (architecture racinaire).

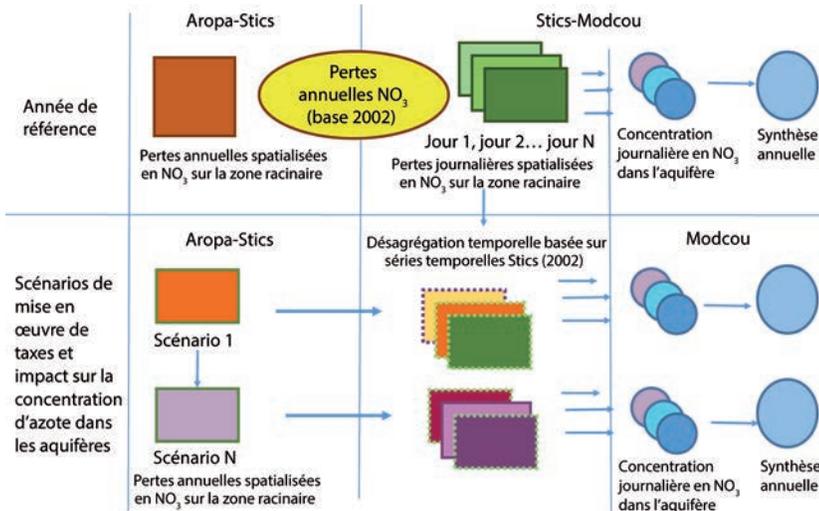


Figure 9.3. « De l'agriculteur à la qualité de la nappe ». Schéma du couplage de Stics et de modèles hydrologique (Modcou) et économique (Aropa) dans la plateforme de modélisation du Piren-Seine.

Le code Stics a été porté dans plusieurs plateformes dans et hors de l'Inra :

- son encapsulation dans la plateforme Record permet de proposer un simulateur clé en main du fonctionnement et de la gestion du système de culture. Il sert les problématiques suivantes : gestion des ressources en eau (MouStics), évaluation de services écosystémiques (projet Efese), études d'exploitation d'élevage (Melodie), modélisation du cycle de l'azote à l'échelle du paysage (TNT) ;
- en dehors de l'Inra, Stics est intégré dans la chaîne de modélisation du Piren-Seine, qui simule la production et les bilans C et N en systèmes de grande culture ainsi que leurs impacts à long terme sur les ressources en eau, et dans la plateforme européenne Bioma pour la prédiction de la production fourragère.

Atouts et limites du schéma conceptuel pour des problématiques globales

L'utilisation de Stics à de larges échelles exige une expertise des entrées sol-techniques, comme l'a montré son application à l'échelle du bassin de la Seine (Piren-Seine). Elle conduit aussi à conforter les fonctions de pédotransfert (Inra Infosol et ANR RUDesSols). L'effort de paramétrage peut être orienté par les résultats des études de sensibilité à la résolution spatiale menées sur la plateforme Record (Macsur).

Cette ouverture a été soutenue par le département EA et validée par les demandes de partenaires. Elle a conduit à préciser la gouvernance de Stics, c'est-à-dire garder le cahier des charges et le domaine scientifique initial de Stics, mais aussi favoriser l'interaction avec d'autres disciplines par la modularisation du code et la formation à l'usage.

► Le changement du climat, un cas d'étude emblématique

À la fin des années 1990, évaluer l'impact du changement climatique sur la production agricole est devenu une question primordiale. La résolution des modèles climatiques de l'époque était de l'ordre de 200 km, avant de descendre à

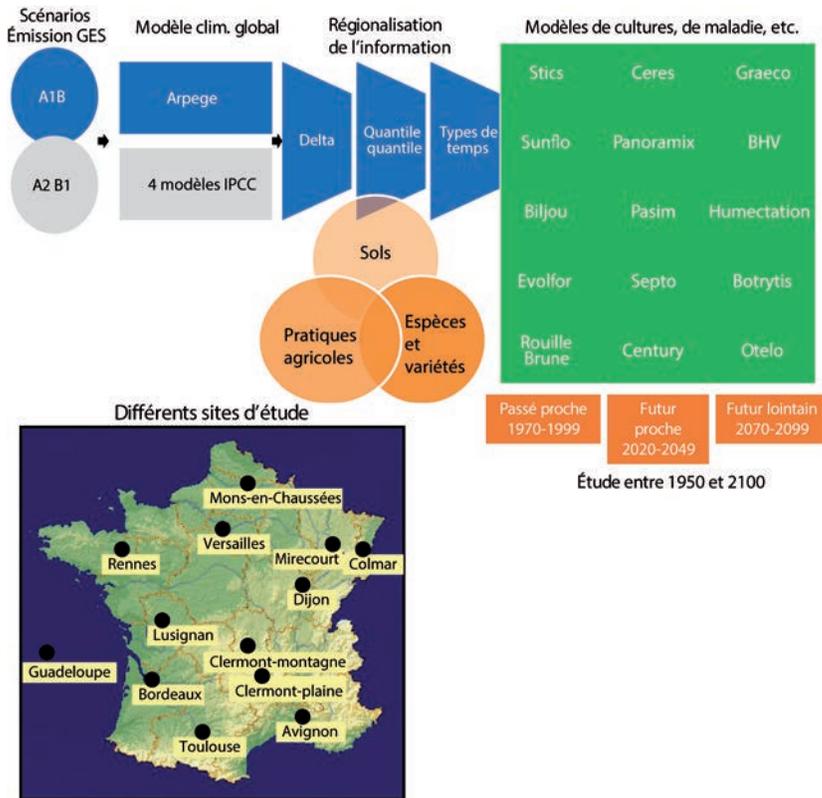


Figure 9.4. Démarche de l'ANR Climator (2007-2010), avec mise en œuvre multisite d'un ensemble de modèles et analyse multicritère des impacts du changement du climat (Brisson et Levrault, 2010).

50 km une dizaine d'années plus tard. Suite à quelques études pionnières menées à l'Inra, la communauté des modélisateurs a eu accès, dès les années 2000, à des séries climatiques à des échelles spatiales compatibles avec les modèles d'impacts, dont Stics. Ainsi, depuis 2010, 18 % des publications recensées intègrent la problématique du changement climatique.

Stics impliqué dans le triple défi : impacts, adaptation et atténuation

Le projet ANR Climator (2007-2010), coordonné par Nadine Brisson, est encore aujourd'hui la seule référence en France sur les impacts du changement climatique et les voies d'adaptation de l'agriculture à l'échelle nationale (figure 9.4). À l'échelle internationale, les actions Cost puis les programmes internationaux AgMIP et JPI-Facce ont permis de comparer l'aptitude des modèles de culture à rendre compte des effets du climat. Stics est positionné sur trois enjeux : estimer les impacts du changement climatique sur l'évolution des fonctions agricoles, concevoir et évaluer des stratégies d'adaptation des pratiques ou des systèmes de cultures, et enfin proposer des voies d'atténuation des émissions de GES par l'agriculture.

Un dialogue interdisciplinaire renouvelé

L'utilisation de Stics dans ce contexte climatique évolutif peut nécessiter de revisiter certains de ses formalismes face aux phénomènes de températures

extrêmes, de stress hydrique prolongé, de concentration en CO₂ atmosphérique accrue, et à leurs interactions. La capacité du modèle à reproduire le microclimat redevient cruciale, car les échanges d'énergie peuvent modifier les extrêmes climatiques au sein du couvert.

L'étude du changement climatique avec le modèle Stics offre également un nouveau cadre méthodologique à d'autres disciplines. Ainsi, la climatologie peut tester indirectement la performance des méthodes de régionalisation des séries climatiques futures. La communauté des climatologues utilise Stics pour mieux représenter la phénologie des agroécosystèmes dans les modèles de climat (couplage Orchidée-Stics). Le domaine du calcul scientifique est nouvellement sollicité pour l'exploration de méthodes d'analyse de sensibilité.

Les questions méthodologiques soulevées

L'usage de Stics est modifié par ce nouveau cadre d'expérimentation numérique en mettant en exergue la nécessité de suivre la propagation des incertitudes associées aux simulations climatiques et d'en quantifier la part dans les prédictions de Stics.

La problématique d'atténuation du changement climatique pousse à avancer dans l'évaluation de la qualité prédictive de Stics dans la simulation du bilan de GES à long terme, en s'appuyant sur des essais internationaux.

L'implication du réseau Stics sur la problématique du changement climatique est exemplaire de la façon dont la place du modèle a évolué au sein du département EA. Stics s'est révélé un outil d'émulation scientifique inter et transdisciplinaire, qui participe à la visibilité scientifique du département EA de l'Inra.

► Les défis d'aujourd'hui : vers un modèle pour l'agroécologie ?

Les systèmes agricoles actuels répondent diversement aux enjeux de durabilité, de compétitivité et de résilience. Plusieurs types d'agriculture combinent différemment les diverses modalités de systèmes techniques (relation aux intrants et production de services écosystémiques) et les relations aux marchés (global *vs* local). Cela appelle à positionner le modèle : Stics a été majoritairement appliqué à des systèmes agricoles conventionnels, mais pas exclusivement. Il peut contribuer à mieux connaître le fonctionnement des systèmes agricoles non intensifs et d'agriculture biologique, sous réserve d'hypothèses bien formalisées sur le rôle des facteurs biotiques.

Du modèle de culture agroenvironnemental au *cropping system model*

Grâce à son cahier des charges et à sa construction collective, Stics a pu prendre sa place dans la chaîne d'intégration des connaissances, aux échelles du cycle cultural et de la rotation culturale. À l'échelle du cycle, par exemple, la complémentarité entre modèles spécialisés par espèce et Stics pourrait être valorisée, tant sur le plan cognitif qu'opérationnel (ex. : le projet KIC Climate-Barley IT mobilisant Sirius-Quality, Monica et Stics). À l'échelle de la rotation culturale, le principal atout de Stics, lié à sa généralité interspécifique, est de permettre l'évaluation et/ou l'optimisation de stratégies de gestion de culture sur des critères agroenvironnementaux intégrant à la fois le temps court et le temps long (figure 9.5).

Contribuer au développement de l'agroécologie et de l'agroforesterie ?

Stics a déjà été appliqué en arboriculture, en agroforesterie, en agriculture biologique ou de « conservation des sols » pour quantifier des services écosystémiques. Ces applications ont mobilisé des hypothèses simplificatrices sur le fonctionnement du système ou un couplage avec un autre modèle. Elles dépassent le domaine de définition de Stics, qui intègre seulement les cultures et la biomasse microbienne du sol comme acteurs biologiques, *a contrario* d'autres agents biotiques comme ceux de la régulation *top-down* des bioagresseurs par exemple.

Une modélisation globale de systèmes agroécologiques mobilisera probablement l'ingénierie de la connaissance et/ou le couplage de modèles. Stics pourra y contribuer par l'évaluation multicritère, en quantifiant les services écosystémiques liés aux bilans eau, C, N des compartiments sol-cultures-atmosphère et en prédisant les fonctions trophiques potentielles assurées par les végétaux. Dans cette optique, la modélisation du phosphore est une nouvelle priorité de l'équipe projet pour Stics, afin de dépasser le domaine d'application actuel. Par ailleurs, des initiatives de modélisation montrent la voie de la prise en compte de la biodiversité dans le fonctionnement des agroécosystèmes en explicitant les interactions entre les plantes cultivées, les bioagresseurs et leurs ennemis, ou le rôle des groupes microbiens dans les cycles des nutriments.

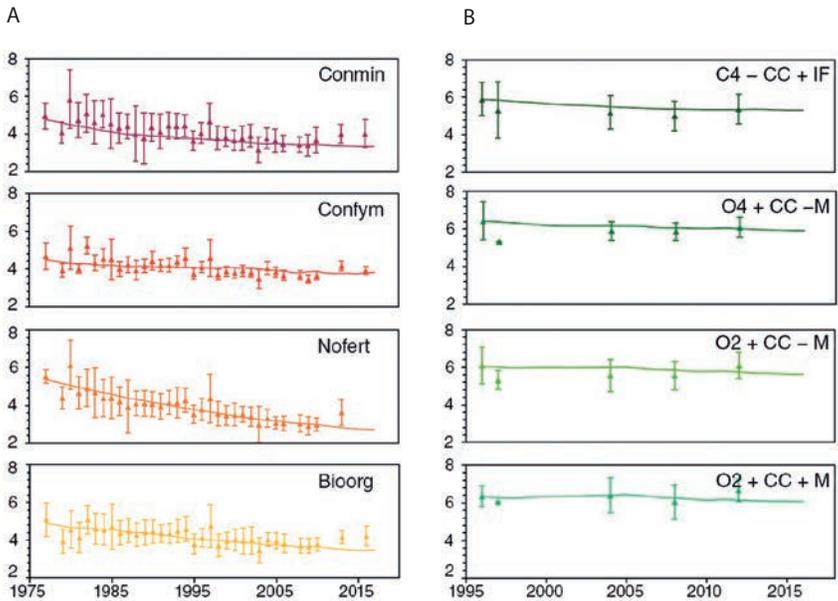


Figure 9.5. Simulation, avec la version de recherche « pérenne » de Stics, de l'évolution à long terme des stocks de N organique (Mg N/ha) observés dans les essais DOK, à Terwil, Suisse (A), et Organic, à Foulum, Danemark (B). Les systèmes conventionnels sont Conmin, Confym, C4, et les systèmes agri-biologiques sont Nofert, Bioorg, O2, O4.

Source : Autret, 2017. Quantification and modelling of carbon and nitrogen fate in alternative cropping systems experiments on the long term. Thèse de doctorat de l'UE et de l'Institut agronomique vétérinaire et forestier de France, 183 p + annexes.

Entre science et action, entre national et international, des tensions à gérer

La construction collective et la portabilité de Stics ouvrent des champs thématiques nouveaux dont la priorisation repose sur un dialogue entre l'équipe projet Stics, des chercheurs spécialistes et la hiérarchie de l'Inra.

Assurer la robustesse de la version standard, répondre aux besoins croissants d'atténuation et d'adaptation au changement climatique et conforter le statut de modèle international de Stics comme *cropping system model* restent des défis actuels.

Prendre en compte des thématiques scientifiques et des pratiques de l'agroécologie appelle à pousser encore plus au large : comment associer des modèles, en construire une nouvelle génération pour rendre explicite le rôle de la biodiversité, cultivée et associée, et des interactions écologiques avec les processus socio-économiques ? La force et les acquis de l'épopée Stics peuvent y contribuer, en sachant garder raison...

Remerciements

Les auteurs remercient les anciens membres de l'équipe projet Stics (Jean-Claude Poupa et Martine Guérif), Richard Delécolle, interlocuteur de la première heure de Nadine Brisson, ainsi que tous les doctorants, chercheurs en CDD, stagiaires et autres collègues chercheurs qui ont contribué à l'avancée du modèle Stics. Nous nous souvenons avec reconnaissance du regretté Dominique King, coanimateur inspiré de l'Action incitative programmée Ecospace. Enfin, nous remercions sincèrement Gilles Lemaire, relecteur mandaté par le chef de département, pour son aide concrète et ses conseils éclairés sur cette rédaction.

Pour en savoir plus

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Gate P. *et al.*, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I- Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009. *Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model*, Éditions Quæ, coll. Update, 304 p.

Brisson N., Levrault F., 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet Climator (2007-2010)*, Ademe, 336 p.

Coucheny E., Buis S., Launay M., Constantin J., Mary B., Garcia de Cortazar-Atauri I. *et al.*, 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS 8.2.2 soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environmental Modelling and Software*, 64, 177-190.

Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C. *et al.*, 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen des cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Étude, Inra (France), Rapport complet 400 p., <http://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Cultures-Intermediaires>.

L'évaluation multicritère des systèmes agricoles : une révolution des méthodes

*Christian Bockstaller, Frédérique Angevin, Jacques-Éric Bergez,
Olivier Therond, Hayo M.G. van der Werf*

Face aux grands enjeux de durabilité des systèmes agricoles, les agriculteurs et leur encadrement technique cherchent à conjuguer performances économiques, environnementales et sociales. Ils sont ainsi confrontés au difficile problème d'une évaluation multicritère de ces systèmes. Ces dernières années, la thématique de l'évaluation multicritère est montée en puissance, avec notamment le rapport Guillou¹²⁵ sur l'agroécologie de 2013. Cependant, les avancées scientifiques permettant de concevoir les méthodes d'évaluation multicritère sont le fruit de travaux conduits depuis de nombreuses années, et le département Environnement et Agronomie (EA) a été un des pionniers en la matière.

À la création du département EA, des tensions fortes existent autour d'une nouvelle méthode d'évaluation multicritère des performances des systèmes agricoles. Celle-ci se veut pragmatique et opérationnelle, fondée sur l'observation en situation des pratiques des agriculteurs et sur l'élaboration d'indicateurs de suivi ou d'impact, essentiellement pour les décideurs, les agriculteurs et leurs encadrants. De fait, cette méthode tranche avec les méthodes de modélisation jusqu'alors privilégiées par les chercheurs de l'Inra. Ces tensions vont peu à peu s'estomper. La communauté des chercheurs portant l'évaluation opérationnelle de la durabilité et celle des modélisateurs des modèles mécanistes de culture et de transfert de polluants se rapprochent. La première intègre progressivement des questions scientifiques qui se posent aussi en modélisation. La seconde prend conscience des

125. Guillou M., Guyomard H., Huyghe C., Peyraud J.-L., 2013. Vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement. Propositions pour le Ministre, Agreenium, Inra.

enjeux de la durabilité et de la nécessité d'outils opérationnels pour l'évaluation de ce concept complexe. D'une manière plus générale, le contexte institutionnel de l'Inra qui s'ouvre durant cette période à la prise en compte des enjeux de durabilité favorise fortement cette évolution.

► Une conception pragmatique de l'évaluation : les travaux pionniers et critiqués de l'Inra de Colmar

L'évaluation multicritère de la dimension environnementale est en rupture avec les approches privilégiées jusque-là, basées sur les suivis de terrain et la modélisation. Quelques travaux à l'étranger préexistent, comme l'approche développée en Suisse dans le cadre de la production intégrée au début des années 1990¹²⁶. Mais à l'Inra tout commence vraiment par les réflexions d'un écophysiologiste du maïs à la Station d'agronomie de Colmar, Philippe Girardin. En faisant le bilan de ses dix ans de travaux sur la modélisation de la culture du maïs, il conclut, en 1993, à l'insuffisance des modèles de simulation mécanistes existants, qui portent essentiellement sur la prévision *ex ante* de la production : « Il n'existe pas de modèles de croissance du maïs aux prédictions suffisamment réalistes pour qu'ils puissent être utiles à l'expérimentateur, à l'agriculteur, au décideur. »¹²⁷ Mais c'est surtout dans un article prospectif qu'il affirme¹²⁸ que « le défi, pour la recherche, va être de mettre au point des indicateurs permettant d'évaluer les performances économiques de l'agriculture intégrée en incluant les effets à court et long termes ainsi que les coûts sociaux et écologiques aujourd'hui non pris en compte » (Girardin, 1993).

Partant du constat que, d'une façon générale, l'utilisation des modèles de culture et de transfert de polluants mécanistes par les non-chercheurs est difficile dans le cadre du développement agricole et du conseil, P. Girardin débute des travaux sur des « indices agroécologiques intégrés » à partir d'un premier document fondateur (figure 10.1). Avec Christian Bockstaller, mis à disposition par Rémi Koller, de l'Association pour la relance agronomique en Alsace¹²⁹, et Hayo van der Werf, il plaide pour des indicateurs faciles à mettre en œuvre et utilisant l'information disponible chez les acteurs de terrain. Ils adoptent une posture très opérationnelle en présentant le développement d'indicateurs comme une alternative aux modèles qui décrivent le fonctionnement des cultures. Ils mettent au point :

- six indicateurs agroécologiques, initialement appelés « indices », basés sur une notation en score reflétant les effets positifs et négatifs des pratiques des agriculteurs ;
- un indicateur de risques liés aux pesticides, innovant car basé sur la logique floue pour son calcul, une approche mathématique qui permet d'éviter notamment les effets de seuil dans des règles de décision.

126. Magnollay F., 1993. Réseau PI : des progrès mesurables. *Revue suisse d'agriculture*, 25, 361-363.

127. Girardin P., 1993. Écophysiologie : Méthodes, limites et acquis. Exemple du Maïs grain. Habilitation à diriger les recherches, INPL Lorraine.

128. Il faut rappeler que la réflexion sur l'agriculture intégrée qu'il initie a mobilisé l'écophysiologiste H. Spiertz (Pays-Bas), des agronomes travaillant sur les systèmes de cultures, tels J.-M. Meynard et P. Vereijken (Pays-Bas), ou sur le développement de l'agriculture intégrée, F. Magnollay (Suisse).

129. Association créée en 1985 dans le cadre du plan de relance de l'agronomie dans les régions, sous la conduite de Michel Sebillote.

En 1995 démarrent aussi les premiers travaux sur une méthode d'évaluation basée sur des indicateurs de durabilité des exploitations agricoles (IDEA), sous l'égide de la Direction générale de l'enseignement et de la recherche (DGER) et dont P. Girardin sera, là aussi, une des chevilles ouvrières. C'est également une approche par notes qui est mobilisée pour évaluer les pratiques selon les trois dimensions de la durabilité. Une quatrième version d'IDEA est en cours de développement par un groupe de travail conduit par Frédéric Zahm (Irstea) dans le cadre du projet Casdar Action (2018-2021).

Malgré ce soutien et cette reconnaissance extérieurs, cette thématique de recherche suscite des critiques aussi bien au sein du département Agronomie qu'ensuite, à partir de 1998, dans le département Environnement et Agronomie (EA). Les réactions de la hiérarchie du département sont parfois abruptes et montrent une

SYSTEMES DE CULTURE INTEGRES

La démarche se décompose en 3 étapes : diagnostic, mise au point d'objectifs et d'indices agroécologiques intégrés et évaluation du degré de réalisation de ces objectifs.

Etape n° 1 - Diagnostic

* **Objectif** : Analyser les mécanismes de prise de décision de l'agriculteur.

Ce diagnostic réalisé par enquête doit permettre de répondre aux questions suivantes :

- a - Quels sont les objectifs de l'agriculteur ?
- b - Quelles sont ses contraintes ?
- c - Quels sont les risques encourus et la hiérarchie de ceux-ci ?

Parallèlement, il faudra répondre aux questions :

- d - Quelles conséquences ont ces décisions sur
 - . la plante (rendement, qualité)
 - . le sol (caractéristiques physiques, chimiques, biologiques)
 - . l'environnement (paysage ...)
 - . le bilan économique de l'exploitation ?
- e - L'agriculteur utilise-t-il des techniques innovantes ?

La réponse à la question "d" nécessite de disposer d'une série d'indicateurs (plante, culture, sol ...) qu'il faudra déterminer au préalable.

Etape n° 2 - Définition des Objectifs Agroécologiques Intégrés (OAI) et du mode de calcul des Indices Agroécologiques Intégrés (IAI)

* **Objectif** : Mise en place d'objectifs agroécologiques permettant aux agriculteurs de progresser vers l'Agriculture Intégrée et aux décideurs d'évaluer l'impact de contraintes qui pourraient être imposées aux agriculteurs sur l'environnement et l'économie de l'exploitation.

* **Démarche** :

- a - Définir, par petites régions, des Objectifs Agroécologiques Intégrés calculés au niveau de l'exploitation, par exemple :
 - . % de couverture hivernale du sol
 - . niveau d'emploi de pesticides
 - . niveau d'emploi d'engrais azotés
 - . degré de biodiversité
 - . niveau de qualité du produit
 - . % en "réserve écologique" (?) ...

Figure 10.1. Extrait du document fondateur des travaux de Philippe Girardin.

forte incompréhension vis-à-vis de la vision pragmatique privilégiée. Une critique récurrente porte sur la validation scientifique des indicateurs ainsi développés.

Ces retours de la direction et les nombreuses questions des collègues, notamment modélisateurs, sur les premiers travaux, poussent l'équipe de Colmar et H. van der Werf¹³⁰ à publier leurs travaux dans des revues internationales de qualité pour crédibiliser leur validité scientifique et en partager la pertinence.

En mai 1996, lors de l'évaluation collective de l'unité de Colmar, la commission reconnaît que « le thème est prioritaire pour l'Inra », « se félicite que la réflexion ait été engagée à Colmar » et « reconnaît la pertinence de la démarche ». Une première reconnaissance académique de ces travaux de recherche est cependant atteinte. Ainsi, des agronomes impliqués dans des travaux sur la conception des systèmes de cultures innovants comprennent tout l'intérêt d'une telle démarche opérationnelle ; ils apportent alors un soutien à cette thématique au sein du département et amplifient les réflexions sur ce sujet. À la création du nouveau département EA en 1998, l'évaluation multicritère trouve sa place aux côtés des travaux sur la conception de systèmes de culture. Cependant, la voie privilégiée dans ce premier schéma stratégique reste la modélisation classique basée sur les mécanismes.

► Une phase de maturation scientifique et de reconnaissance institutionnelle de l'évaluation multicritère

À la fin du xx^e siècle, l'Inra est de plus en plus sollicité sur les questions environnementales et de durabilité par les pouvoirs publics, qui ont lentement, mais sûrement, pris en considération les recommandations à l'échelle internationale sur le développement durable (rapport Brundtland en 1987, conférence de Rio en 1992). La question des indicateurs de durabilité ou d'atteinte à la durabilité est centrale. La conception de tels critères et la mise au point de méthodes d'évaluation nécessitent une approche scientifique que l'Inra a toute légitimité à soutenir, tout en s'appuyant sur les initiatives des acteurs du développement agricole qui élaborent leurs propres méthodes : le ministère de l'Agriculture, la Bergerie nationale (méthode IDEA), des associations dont Solagro (méthode Dialecte) et le Réseau agriculture durable¹³¹, des syndicats comme la Confédération paysanne, ou encore des plateformes institutionnelles telles que Farre¹³². La réflexion sur l'agriculture et le développement durable engagée par le rapport Godard et Hubert (2002) conduit au programme fédérateur de l'ANR Agriculture et développement durable, qui va soutenir le développement d'outils opérationnels combinant savoir scientifique et connaissances profanes.

Pour la période 2004-2008, le schéma stratégique du département EA reflète l'intérêt de sa nouvelle direction pour la thématique de l'évaluation environnementale et de la durabilité des systèmes agricoles : un champ thématique est intitulé « Agronomie systémique et bases biophysiques de la gestion des écosystèmes cultivés », avec comme priorité « Évaluation et conception des systèmes de

130. Entre-temps recruté à Rennes à l'unité d'Agronomie de l'Inra de Rennes-Quimper.

131. Issu des Centres d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural (Civam) et des Groupements des agriculteurs biologiques (GAB).

132. Forum de l'agriculture raisonnée, respectueuse de l'environnement, devenu en 2013 le Forum des agriculteurs responsables respectueux de l'environnement.

Encadré 10.1. Recommandations du rapport Capillon (2005)

1. Favoriser la mise au point de modèles coconstruits adaptés à l'analyse environnementale, c'est-à-dire des modèles prenant en compte la réelle disponibilité des données d'entrée, et les pratiques du gestionnaire.
2. Contribuer à l'élaboration d'outils pour prendre en compte de façon conjointe les critères environnementaux, économiques, sociaux et techniques dans l'évaluation des systèmes et l'élaboration des préconisations.
3. Aborder l'évaluation des niveaux intermédiaires entre l'exploitation et le niveau national.
4. Intégrer les caractéristiques des milieux de transfert et la sensibilité des milieux récepteurs dans les modèles utilisés pour l'évaluation (pour les compartiments eau, sol et air).
5. Caractériser l'incertitude.
6. Coupler des approches d'évaluation environnementale aux outils de gestion agronomique et économique pour faciliter l'identification de voies d'amélioration.
7. Développer une réflexion méthodologique pour définir des seuils pour les critères d'évaluation.

Source : Capillon A., Gabrielle B., Girardin P., Guichard L., Guillaume B., Hubert A., Leiser H., Soulas G., van der Werf H., 2005. Méthodes d'évaluation des impacts environnementaux des pratiques agricoles. Inra, département Environnement et Agronomie, Paris.

culture ». L'un des objectifs est le « développement d'outils d'évaluation (en particulier environnementale) des pratiques agricoles ». À la différence du précédent schéma stratégique, il est clairement question de « la formalisation d'indicateurs de durabilité des pratiques agricoles ». En 2004, afin de préciser la stratégie à mettre en œuvre sur cet axe de recherche, la direction du département EA confie à Alain Capillon la réalisation d'un bilan sur les recherches existantes sur ce sujet ainsi que la formulation de propositions. Dans ses recommandations (encadré 10.1), le plaidoyer pour des « modèles prenant en compte la réelle disponibilité des données d'entrée » conforte la démarche engagée depuis les années 1990. Celle sur « l'élaboration d'outils pour prendre en compte de façon conjointe les critères environnementaux, économiques, sociaux et techniques » pose les bases de l'évaluation multicritère, sans que le terme soit utilisé.

À Colmar, l'équipe remet progressivement en cause la dichotomie indicateurs-modèles et revoit la construction des premiers indicateurs évaluant les pratiques agricoles sous forme de notes. Ceci conduit à la méthode Indigo[®], qui mobilise des indicateurs utilisant des sorties de modèles opérationnels dont les données d'entrée sont facilement accessibles. Cette méthode, qui comprend huit indicateurs synthétiques (ex. : émissions d'azote, pesticides vers les eaux, vers l'air), devient une référence dans le domaine de l'évaluation environnementale, à côté de méthodes utilisant des indicateurs plus simples, calculés à l'exploitation agricole, telles que IDEA, Dialecte, etc. Elle permet des sorties d'évaluation multicritère sous forme de graphes radar (figure 10.2).

Parallèlement, H. van der Werf réalise une analyse bibliographique de douze méthodes d'évaluation environnementale multicritère appliquées aux systèmes agricoles¹³³. Cet échantillon est constitué de méthodes se différenciant nettement les unes des autres, bien documentées et ayant fait la preuve de leur faisabilité dans

133. van der Werf H.G.M., Petit J., 2002. Evaluation of environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 93, 131-145.

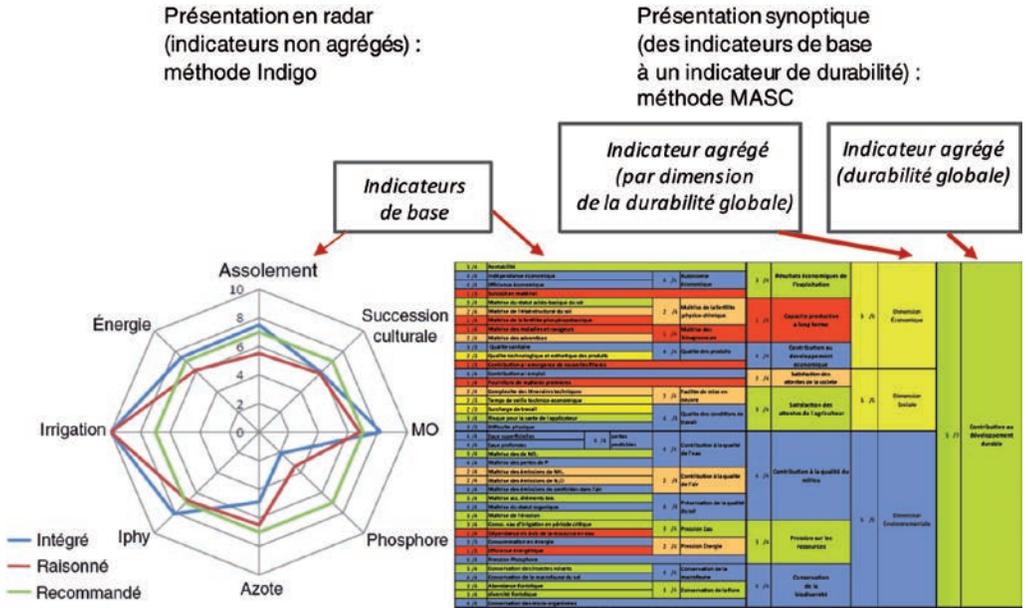


Figure 10.2. Exemples de présentation de résultats d'évaluation multicritère : sous forme de radar avec des indicateurs non agrégés, sous forme de tableau synoptique avec indicateurs non agrégés et agrégés.

au moins un test. À la suite de cette synthèse, il initie des travaux sur des indicateurs d'impacts en mobilisant la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV), cadre utilisé dans de multiples secteurs économiques et reconnu internationalement. Ces travaux s'inscrivent dans le programme Porcherie verte¹³⁴. Avec le soutien des départements de recherche Phase et EA, un groupe de recherche se forme autour de l'ACV dans l'UMR SAS à Rennes. Ce groupe s'appuie sur la diversité des compétences de l'unité résultant de la fusion d'équipes d'agronomie, de science du sol et d'hydrologie pour conduire, entre autres, des recherches sur la prise en compte des impacts sur les sols dans l'ACV. Ce groupe est aujourd'hui internationalement reconnu.

Poussés par le rapport Capillon, les travaux de ces équipes, d'abord focalisés sur le développement d'outils et de méthodes opérationnels, s'ouvrent progressivement à des questions méthodologiques plus génériques. La question de l'agrégation de variables de natures différentes est cruciale pour éviter les pièges de « l'addition des choux et des carottes ». Ainsi, l'équipe de Colmar explore des méthodes d'agrégation, telle la logique floue¹³⁵, ou de surclassement¹³⁶, comme les méthodes Electre, développées par l'équipe de Bernard Roy au Laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (UMR CNRS, université

134. Sur proposition de l'Inra, le programme Porcherie verte a réuni 16 acteurs pour mettre au point des systèmes de production porcine diversifiés et compétitifs, satisfaisant un haut niveau d'exigences quant au respect de l'environnement.

135. Approche mathématique qui permet de sortir de la dichotomie oui/non en introduisant la possibilité de cas intermédiaires avec un « degré de oui et non ».

136. En recherche opérationnelle, une action « surclasse » une autre si elle est au moins aussi bonne que l'autre pour une majorité de critères, sans être trop mauvaise pour les autres critères.

Paris-Dauphine). Ces dernières trouvent un écho dans le département EA et font l'objet d'une école-chercheur organisée par P. Girardin en 1997.

Par ailleurs, les chercheurs de Colmar et de Rennes refont le lien entre leurs travaux sur les indicateurs et ceux des modélisateurs en abordant des questions telles que la validation des indicateurs qui reposent sur des modèles simplifiés, à l'instar de ceux de la méthode Indigo®. Ils développent une démarche spécifique de comparaison des résultats d'indicateurs à des valeurs d'impacts observés ou d'autres sources de données. Ceci conduit aussi à des travaux sur l'incertitude autour d'un résultat d'indicateur. Une autre question concerne le changement d'échelle, sur l'obtention d'une valeur d'indicateur au niveau d'un bassin versant à partir des résultats au niveau de la parcelle. Enfin, les indicateurs sont exprimés par rapport à des valeurs de référence qui peuvent être de deux types :

- des valeurs absolues, incluant les normes décidées par les politiques (ex. : la norme de teneur des eaux potables en nitrate) et des seuils d'acceptabilité, ou des valeurs cibles décidées par des scientifiques (ex. : les seuils de contamination des sols en polluants atmosphériques) ;
- des valeurs relatives par rapport à une situation courante ou initiale.

Tous ces travaux aboutiront à une formalisation des démarches de construction d'indicateurs et de leur évaluation.

Durant cette période où sont développées ces méthodes opérationnelles d'évaluation multicritère, les modélisateurs s'interrogent sur le rôle que peuvent jouer les « modèles de culture » dans l'évaluation multicritère en général. Au début des années 2000, ces derniers prennent conscience à la fois de la limite de l'utilisation telle quelle de ces modèles dynamiques des systèmes sol-plante comme outils d'aide à la décision, et des possibilités de la modélisation comme outil d'apprentissage et de prospective, notamment dans l'évaluation *ex ante* de scénarios de configuration des systèmes agricoles. En parallèle, on assiste à une montée en puissance et à la reconnaissance académique de la communauté « Integrated assessment and modelling ». Celle-ci vise à développer des outils de modélisation intégrée permettant de conduire une évaluation de modes de gestion des ressources naturelles de l'échelle locale à régionale, voire nationale ou globale. L'enjeu scientifique réside ici dans le développement de démarches participatives basées sur l'intégration des connaissances génériques et locales avec différentes méthodes (ex. : modèles, indicateurs, méthode de représentation) dans des plateformes de modélisation permettant de conduire une évaluation multicritère aux différents niveaux d'organisation d'intérêt pour les parties prenantes. Le développement de ces approches est favorisé par l'introduction, en 2002, par l'Union européenne de l'obligation de conduire une évaluation *ex ante* des impacts sociaux, économiques et environnementaux de ses politiques européennes.

► Une phase d'extension des méthodes d'évaluation multicritère

Intégrer les dimensions environnementales et socio-économiques de la durabilité des systèmes agricoles : les apports de l'outil DEXi

Alors que les travaux précédents portaient sur l'évaluation environnementale des techniques et pratiques agricoles, le programme Agriculture et développement

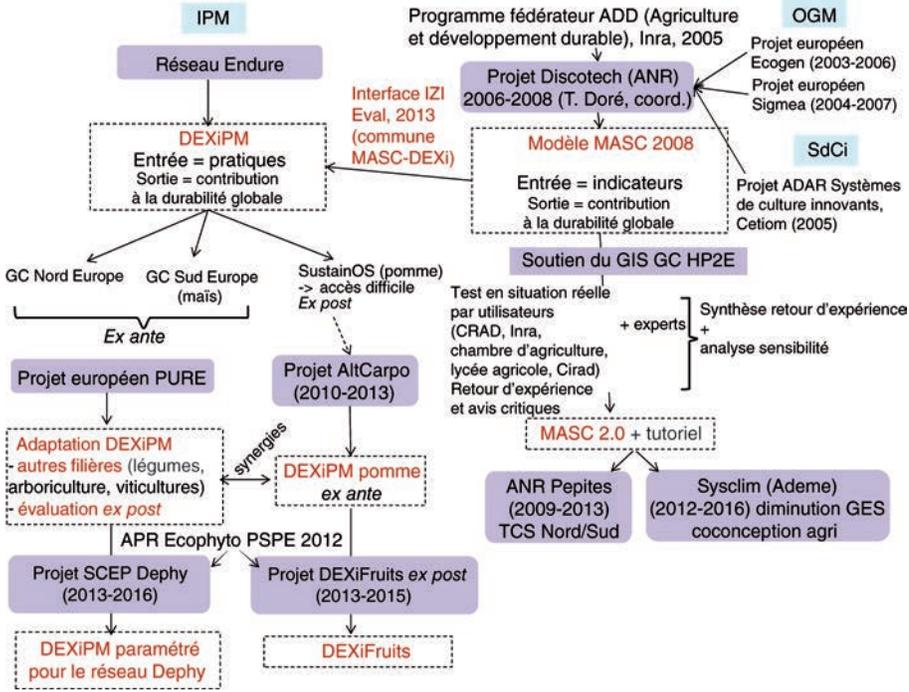


Figure 10.3. Arbre généalogique des outils DEXi.

durable pousse au lancement de travaux sur l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture en intégrant les dimensions économiques et sociales à celle de l'environnement. Ainsi naît le projet Discotech (2005-2008), regroupant notamment des agronomes du département EA et des départements BAP et SPE. Tous sont déjà impliqués dans la conception et/ou l'évaluation de systèmes de culture.

Au cœur de ces travaux se pose la question de l'intégration des trois dimensions de la durabilité *via* des méthodes d'agrégation. Dans le projet Discotech, le groupe choisit le logiciel DEXi, conforté en cela par un travail de revue bibliographique¹³⁷. Cet outil avait été découvert par Antoine Messéan dans le projet européen Ecogen consacré à l'évaluation des impacts économiques et environnementaux de systèmes de culture comprenant du maïs OGM. Développé en Slovénie par Marci Bohanec, DEXi a d'abord été utilisé dans d'autres disciplines (médecine, pharmacie). DEXi permet de construire des arbres de décision pour opérer des choix entre options afin de résoudre des problèmes complexes. Un premier modèle d'évaluation multicritère, MASC, est construit en utilisant DEXi pour évaluer *ex ante* la durabilité des systèmes de culture afin de faciliter le choix entre des systèmes innovants avant leur mise en œuvre sur le terrain. Suite à une phase de test avec des utilisateurs et à une adaptation à l'agriculture biologique, une seconde version est mise à disposition des utilisateurs finaux *via* un site wiki¹³⁸. Elle est accompagnée d'un tutoriel

137. Sadok W., Angevin F., Bergez J.-E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L. *et al.* 2008. *Ex ante* assessment of the sustainability of alternative cropping systems: guidelines for identifying relevant multi-criteria decision aid methods. *Agron. Sustain. Dev.*, 28, 163-174.

138. <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/Main/WebHome>.

et d'une interface qui permettent, entre autres, d'aboutir à des sorties didactiques, dont un tableau synoptique. Ce dernier est une représentation graphique, avec une charte de couleurs, des résultats agrégés de la durabilité, mais aussi des valeurs des indicateurs moins agrégés (figure 10.2). La conception de ce « package utilisateur » résulte de travaux novateurs avec des ergonomes issus du projet Discotech.

En parallèle, dans le cadre d'une démarche de protection intégrée des cultures avec le réseau européen Endure (2007-2010), puis le projet européen PURE (2011-2014), trois membres du groupe MASC développent un modèle DEXiPM destiné à accompagner de manière interactive la conception de systèmes de culture innovants dans des ateliers participatifs. À cette fin, les données d'entrée sont des pratiques et des éléments de contexte et le modèle est entièrement qualitatif. S'ensuit alors une longue et fructueuse série de développements d'outils d'évaluation multicritère par des agronomes des départements EA, BAP et SPE pour d'autres systèmes, légumes de plein champ, vigne, vergers de fruitiers (figure 10.3).

Les modèles développés sous DEXi conduisent à de nouvelles questions scientifiques, notamment à celle de la sensibilité de ces méthodes aux variables d'entrée, question déjà identifiée dans des travaux précédents. Suite au constat d'un manque de sensibilité du modèle MASC pour discriminer des systèmes de culture innovants ne variant que par une ou deux innovations, des chercheurs de l'UMR AGIR de Toulouse réalisent un travail méthodologique d'analyse de sensibilité de modèles développés sous DEXi (collaboration avec le département MIA). Ces résultats et l'expérience acquise sur une dizaine de modèles DEXi aboutissent à un ensemble de recommandations sur la construction de ce type d'arbres de décision multicritère¹³⁹. Ces considérations conduisent aussi au développement d'un outil de construction d'arbres de décision, Contra, cherchant à combiner les avantages de DEXi et de la logique floue pour limiter les effets de seuil, comme recommandé par Craheix *et al.* (2015), et assurer un maximum de transparence et de flexibilité.

Des méthodes d'évaluation au service des politiques publiques et de la gestion des ressources territoriales

Entre 2005 et 2009, l'ambitieux projet européen Seamless¹⁴⁰ cherche à développer une chaîne de modélisation des systèmes agricoles, de l'échelle de la parcelle à celle des marchés agricoles européens, *via* l'intégration et le couplage au sein d'une plateforme de simulation d'un modèle de culture, d'un modèle bioéconomique de comportement d'exploitation agricole et du modèle de marché agricole Capri. Coordonné par le Wageningen University Research et impliquant fortement le département EA (*via* des chercheurs des UMR System, AGIR et LAE), ce projet vise à développer des procédures et des outils de modélisation pour conduire une évaluation intégrée, *ex ante*, des impacts environnementaux et socio-économiques des politiques publiques concernant l'agriculture et l'environnement dans le contexte européen d'une demande d'outils d'évaluation *ex ante*. Les avancées sur les cadres conceptuels et méthodologiques de la modélisation et l'évaluation intégrée des systèmes agricoles à différentes échelles marquent la communauté

139. Craheix D., Bergez J.-E., Angevin F., Bockstaller C., Bohanec M., Colomb B. *et al.*, 2015. Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks from the DEXi decision support system. *Agron. Sustain. Dev.*, DOI: 10.1007/s13593-015-0315-0.

140. System for Environmental Agricultural Modelling-Linking European Science and Society, <http://www.seamless-ip.org/>.

s'intéressant aux systèmes agricoles. Seamless aboutit à la stabilisation du cadre d'analyse et d'évaluation de la durabilité en considérant soit des objectifs d'état d'un système (*goal oriented framework*, « durabilité statique »), soit des propriétés de durabilité (*properties oriented framework*, « durabilité dynamique ») telles que la résilience. Il participe également à la clarification du statut des indicateurs et des modèles (calculateur d'indicateurs) dans une évaluation intégrée. Cependant, le bilan du projet est mitigé. En effet, les développements informatiques sont plus laborieux et n'aboutissent pas à une plateforme fonctionnelle de la chaîne de modélisation Seamless pour l'évaluation intégrée de projets de politiques agricoles et environnementales.

Sur la base des acquis de Seamless, entre 2009 et 2014, Olivier Therond (UMR AGIR), en collaboration avec l'UMR Géosciences environnement Toulouse (GET) et l'Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT), puis avec Arvalis et la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG), initie le développement de la plateforme Maelia de modélisation et d'évaluation intégrées des situations de gestion collective de l'eau. Dans cette approche, ces dernières sont conceptualisées comme des systèmes socio-écologiques qui articulent un sous-système écologique et un sous-système socio-économique. L'objectif est de développer une architecture générique de modélisation et de simulation multi-agent pour évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques de modalités de gestion des ressources en eau à l'échelle d'un territoire. Au-delà de la modélisation de la dynamique des systèmes sol-plantes et hydrologiques, l'enjeu est de représenter le comportement des acteurs socio-économiques, agriculteurs et gestionnaires des ressources en eau, et les interactions entre les différents processus biophysiques et sociaux au sein d'un territoire. Les travaux d'application de Maelia en interaction avec les acteurs démontrent l'intérêt de ce type de plateforme de modélisation pour évaluer des scénarios d'organisation territoriale des activités agricoles visant à réduire les crises de gestion d'une ressource partagée (figure 10.4).

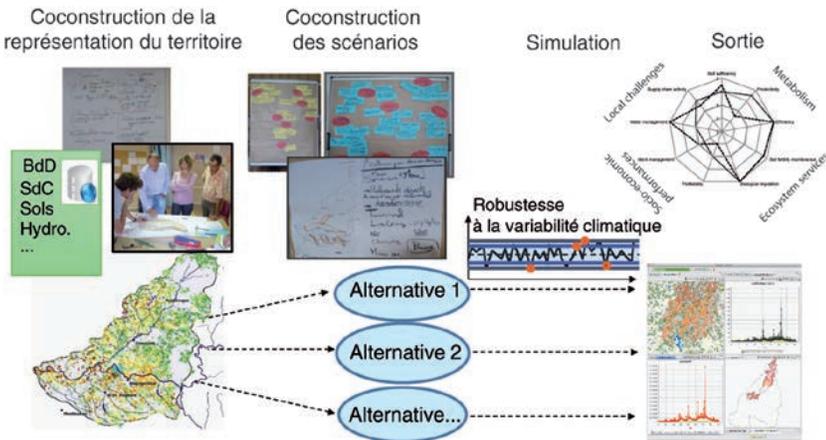


Figure 10.4. Démarche Maelia.
BdD : base de données ; SdC : système de culture ; Hydrol. = hydrologie.

Dans la foulée de ces premiers travaux, un outil d'aide à la décision basé sur Maelia est développé (figure 10.4). *Via* le développement d'une interface métier de Maelia, il cherche à répondre aux besoins des gestionnaires des volumes d'eau prélevables par l'agriculture à l'échelle des bassins versants. Par ailleurs, à partir de 2016, les fonctionnalités de Maelia sont étendues à une gamme d'enjeux (ex. : cycles du carbone et de l'azote, qualité des sols, régulations biologiques), de systèmes (prairies, systèmes agroécologiques) et de filières (produits résiduaux organiques) pour permettre une évaluation intégrée des modes de production, de transformation et de recyclage des biomasses agricoles et forestières au sein des territoires agricoles.

Vers la structuration du transfert des méthodes d'évaluation

Le foisonnement des méthodes d'évaluation finit par poser à leurs utilisateurs le problème du choix de la méthode adaptée. Un besoin de fédérer des acteurs de l'évaluation environnementale émerge progressivement. Fin 2006, un collectif intitulé Plage (Plateforme d'évaluation agri-environnementale), initié par trois ingénieurs du département EA (des UMR Agronomie et LAE et de l'UR AgroImpact), en collaboration avec Agro-Transfert ressources et territoires¹⁴¹, crée et développe une plateforme internet de mise à disposition de l'information sur les méthodes d'évaluation multicritère. En parallèle, les GIS Grandes cultures à hautes performances économiques et environnementales et Élevages demain lancent des travaux sur l'évaluation multicritère de la multiperformance (les performances économiques, environnementales et sociales) des systèmes agricoles, qui aboutissent notamment à la base de données Indic^{®142}. Les deux GIS unissent ensuite leurs efforts pour publier un guide didactique sur l'évaluation multicritère de la durabilité en agriculture (Lairez *et al.*, 2015). Toutes ces initiatives amènent le GIS Relance agronomique à proposer la création du RMT Erytage (Évaluation de la durabilité des systèmes et des territoires agricoles), qui fédère une communauté de chercheurs (du Cirad, de l'Inra et de Irstea), d'enseignants-chercheurs (UniLaSalle) et de spécialistes de recherche-développement (instituts techniques, Agro-Transfert, CerFrance, etc.).

À la suite des travaux sur l'ACV dans l'unité SAS à Rennes, d'autres chercheurs Inra se sont intéressés à ce cadre méthodologique. Afin de se libérer d'une dépendance à un groupe de recherche d'Agroscope (Zurich) pour les outils de calcul, plusieurs chefs de département confient une étude à six scientifiques de l'Inra pour évaluer la faisabilité et définir les missions possibles d'une future plateforme d'appui à la mise en œuvre des méthodes ACV. En s'appuyant sur cette étude, la plateforme d'analyse multicritère de la durabilité Means¹⁴³ est créée en 2012, avec le soutien du département EA et de six autres départements de l'Inra. Sa principale mission est de développer et mettre à disposition des outils de calcul et des bases de données aux ingénieurs et scientifiques de l'Inra, pour l'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de production animale, végétale et de transformation

141. Association créée en 1991 à l'initiative de l'Inra, de la Chambre d'agriculture et de la région Picardie pour faire le lien entre la recherche et le développement agricole.

142. Base qui recense 116 méthodes et 3 046 indicateurs : <https://www.gchp2e.fr/Actions-thematiques/Connaissance-des-pratiques-pour-l-evaluation-des-performances/INDIC-R-Une-base-de-donnees-telechargeable-sur-le-site-du-GIS-GC-HP2E>.

143. Multicriteria Assessment of Sustainability, www.inra.fr/means.

des produits agricoles. Si les outils de calcul et les bases de données ACV de l'UMR SAS constituent un socle pour Means, le collectif de chefs de département décide ensuite d'élargir son périmètre pour que Means héberge aussi l'ensemble des méthodes d'évaluation multicritère hors du champ de l'ACV produites au sein de l'institut¹⁴⁴, comme Indigo®, MASC en production végétale ou Diamond en production animale.

La plateforme est ouverte aux utilisateurs Inra depuis novembre 2014. Un fort soutien par l'Ademe a permis d'accélérer le développement informatique. Means est devenu l'outil de référence pour la création de données ACV de la base de données Agribalyse® des productions agricoles françaises. La plateforme a été ouverte aux utilisateurs hors Inra, y compris à l'étranger, sous condition de licence. Un partenariat Inra-Cirad est en construction pour intégrer dans Means les ressources de cet institut pour les systèmes tropicaux.

► Conclusion

Dans la perspective de la transition agroécologique, le développement d'une évaluation véritablement intégrée des performances des systèmes agricoles nécessite de prendre en compte non seulement les impacts environnementaux et les performances économiques et sociales des activités agricoles, mais aussi leurs enjeux relatifs à la conservation de la biodiversité et des services écosystémiques, aux niveaux d'organisation d'intérêt pour les différents acteurs concernés (exploitation agricole, territoire, région, pays). Un autre front de recherche est le passage d'une vision statique de l'évaluation de la durabilité, cherchant à évaluer un état du système, au développement de méthodes dynamiques d'évaluation de la durabilité, c'est-à-dire de la résilience ou de la vulnérabilité des systèmes. Plus généralement, ces approches d'évaluation devront à terme permettre de traiter les enjeux émergeant du *nexus* santé-biomasse alimentaire et non alimentaire-environnement, tout en conservant une visée d'opérationnalité, ce qui reste un défi majeur. Les compétences rassemblées et développées sur ce sujet dans le département EA lui permettront d'être l'un des grands contributeurs sur ces thématiques. Une ouverture en partenariat vers les sciences humaines et sociales afin de mieux prendre en compte la diversité des valeurs des acteurs sur une thématique donnée permettra d'aller encore plus loin dans le traitement de ces nouvelles questions.

Remerciements

Philippe Girardin (retraité Inra EA UMR LAE), Antoine Messéan (Inra SPE Eco-Innov), Jean-Marc Meynard (Inra SAD-APT), Paul Robin (retraité Inra EA), les participants des groupes MASC et DEXiPM, Bruno Colomb (retraité, Inra EA UMR AGIR), Thierry Doré (AgroParisTech), Laurence Guichard et Raymond Reau (Inra EA UMR Agronomie), Walid Sadok (Inra EA, aujourd'hui University of Minnesota Twin Cities), Damien Craheix (Inra SPE, aujourd'hui Coopérative Triskalia), Elise Pelzer (Inra EA UMR Agronomie), Aude Alaphilippe (Inra SPE UE Gotheron) et Gabriele Fortino (Inra SPE, aujourd'hui Chambre d'agriculture de la Manche), Marko Bohanec (Jožef Stefan Institute, Ljubljana Slovénie), Hervé Monod (Inra MIA Jouy), Marta Carpani (postdoc Inra EA).

144. <https://www6.inra.fr/means/Outils-d-analyse-multicritere>.

Pour en savoir plus

Bockstaller C., Girardin, P., van der Werf H.G.M., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy*, 7, 261-270.

Girardin P., 1993. Agriculture intégrée : au-delà des mythes... un défi. *Cahiers Agricultures*, 2, 141-145.

Lairez J., Feschet P., Aubin J., Bockstaller C., Bouvarel I., 2015. *Évaluer la durabilité en agriculture. Guide pour l'analyse multicritère en productions animales et végétales*, Éditions Quæ, Versailles, France.



PARTIE IV

CONNAÎTRE ET ÉVALUER LES RESSOURCES ET LES SERVICES DES AGROÉCOSYSTÈMES

CHAPITRE 11

Un renouveau pour l'étude des sols

*Antonio Bispo, Dominique Arrouays, Christophe Schwartz,
Jean-Louis Morel, Isabelle Cousin*

En vingt ans, notre vision des sols a drastiquement changé : considéré souvent comme un simple support physique de production qu'il fallait préparer pour assurer la croissance des plantes (ex. : drainage, labour, fertilisation), il est devenu un milieu davantage considéré comme vivant et complexe dont il faut chercher à optimiser le fonctionnement pour réduire les intrants et limiter les impacts environnementaux. Parallèlement, notre connaissance de la diversité des sols et de leur état en France métropolitaine et d'outre-mer s'est considérablement accrue grâce aux investissements publics. Finalement, compte tenu de sa position d'interface, le sol est apparu comme incontournable dans la plupart des politiques publiques, qu'elles soient agricoles, alimentaires, environnementales ou sanitaires. Depuis ces dernières années, il est le centre d'une préoccupation politique à toutes les échelles. Le département Environnement et Agronomie (EA) et ses agents, anticipant ces attentes, ont contribué très largement à cette émergence du sujet sol. Il a été à la fois moteur et acteur de ce changement.

► Du sol à l'écosystème, la fusion des départements Science du sol, Bioclimatologie et Agronomie

Un élargissement des thématiques de recherche sur les sols

Jusque dans les années 1990, le sol était plutôt étudié en tant qu'objet, « en soi », et essentiellement pour permettre le développement agricole. Il s'agissait donc de comprendre sa composition, sa formation, sa structure afin d'être en mesure de « maîtriser et améliorer » le sol. Les premières actions à conduire étaient donc, d'une part, de mieux décrire les constituants des sols et leurs propriétés,

notamment en lien avec la fertilité des sols et, d'autre part, de connaître les facteurs de formation qui permettent d'expliquer la diversité et la distribution des sols.

Pour qualifier les propriétés du sol et son fonctionnement, les travaux du département de Science du sol sont initialement essentiellement disciplinaires, et concernent plus spécifiquement la physique et la physico-chimie au sens large : minéralogie des argiles, mécanique des sols, transferts en milieux poreux, etc. Les activités expérimentales et de modélisation des chercheurs Inra ont une large renommée internationale et sont déjà orientées vers la protection des ressources « eau » et « sol ». Mais cette dernière décennie du siècle est aussi l'époque où les préoccupations environnementales prennent une ampleur sans précédent, avec la problématique de la gestion de la qualité des eaux et les conventions de Rio qui donnent un aspect plus global à la question de la gestion des sols : pollution, santé, changement climatique, biodiversité, érosion, désertification. Le développement d'une agriculture multifonctionnelle, respectueuse de l'environnement, protectrice de la ressource en eau et de la qualité de l'air et de l'eau, est une attente forte de la société. Il s'agit donc d'élargir le champ des recherches de l'institut vers le fonctionnement des agroécosystèmes, vers l'analyse des interactions entre les compartiments sol-atmosphère-biosphère-hydrosphère. La création du département EA porte désormais ces thématiques de recherche plus intégrées, au sein desquelles le sol tient une place essentielle :

- le lien avec l'agronomie renforce l'analyse des travaux sur l'effet des pratiques agricoles sur les propriétés des sols ; les pédologues, initialement très spécialisés sur la compréhension des processus physico-chimiques de long terme (ex. : lessivage, altération) à l'origine des différentes pédogenèses — lesquelles permettent de décrire la diversité des horizons de sol et la distribution spatiale des différents types de sols —, considèrent avec intérêt la diversité des horizons de surface du sol en lien avec le travail du sol ; ils s'intéressent à l'évolution des types de sol, et mettent en évidence une dynamique décennale de l'évolution des sols et de leurs propriétés. Les sols ne sont aujourd'hui plus vus comme des objets figés, leurs propriétés évoluent à l'échelle humaine, en particulier dans les contextes actuels de changement climatique et de changement d'usage¹⁴⁵. Réciproquement, les agronomes bénéficient de cette association avec les pédologues et, par exemple, revisitent leurs pratiques d'expérimentation en plein champ : le département EA, en lien avec le département BAP, met en place le programme Carex (Caractérisation des unités expérimentales) qui permet, entre autres, de caractériser à haute résolution les sols et leurs propriétés dans les unités expérimentales de l'Inra. Les expérimentations visant à l'analyse des interactions génotype-environnement prennent désormais explicitement en compte la dimension « sol » ;

- le lien avec la bioclimatologie renforce les axes de recherche sur les interactions sol-atmosphère, et donne à l'Inra un positionnement international sur la thématique de la contribution des sols et de l'agriculture aux émissions de GES ; plusieurs chercheurs du département contribuent ainsi aux travaux du Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. Ce lien permet également une meilleure prise en compte de la diversité des propriétés du sol (ex. : par une description

145. Montagne D., Cornu S., 2010. Do we need to include soil evolution module in models for prediction of future climate change? *Climatic Change*, 98, 1-2, 75-86. DOI: 10.1007/s10584-009-9666-3.

plus précise des propriétés hydriques) dans les modèles de transferts de flux et de matière entre la surface terrestre et l'atmosphère.

Pour favoriser cette intégration plus avancée des connaissances disciplinaires, le département EA — fort des compétences de ses agents en expérimentation et en

Encadré 11.1. Le GIS Sol

À sa création en 2001, le groupement d'intérêt scientifique Sol* regroupe les ministères de l'Agriculture et de l'Écologie, l'Inra, l'IFEN et l'Ademe. Ces organismes sont ensuite rejoints par l'IRD et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). La mission du GIS Sol est d'organiser les programmes nationaux d'acquisition de données sur les sols. L'unité de service InfoSol, rattachée au département EA, est alors constituée de manière à coordonner ces programmes sur tout le territoire, à assurer une harmonisation et une gestion pérenne des données collectées, ainsi que leur mise à disposition auprès des pouvoirs publics et de la société. Ce dispositif, tout à fait original à l'échelle européenne, a été depuis reconduit tous les cinq à sept ans.

Les travaux du GIS Sol sont conduits autour de deux grandes missions complémentaires : améliorer la connaissance et la surveillance des sols de France et capitaliser les analyses de sols réalisées en France. Plusieurs grands programmes mis en place sont alors consolidés : Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS), Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), Base de données des analyses de terres (BDAT) et Base de données des éléments traces métalliques (BDETM). Un système d'information est également développé afin de saisir et de conserver les données pour produire ensuite les restitutions nécessaires aux politiques publiques agricoles, environnementales et sanitaires. La coordination nationale des différents programmes est placée sous la responsabilité de l'unité de service InfoSol, qui mobilise des réseaux de partenaires en région.

Afin, d'une part, de connaître et gérer la diversité de sa couverture pédologique et, d'autre part, de disposer d'un dispositif de surveillance des sols susceptible de détecter de façon précoce des évolutions de leurs qualités, InfoSol capitalise des données d'inventaire et de surveillance des sols existantes et assure également la collecte de nouvelles informations en mobilisant des partenaires régionaux. Toutes ces informations sont centralisées dans un système d'information unique et harmonisé visant à en faciliter l'exploitation (base de données nationale DoneSol). Les échantillons de sol collectés sont ensuite préparés et conservés au sein du Conservatoire européen des échantillons de sols (CEES, figure 11.1), dont l'unité Inra InfoSol assure également la gestion.

* GIS Sol, www.gissol.fr.



Figure 11.1. Le Conservatoire européen des échantillons de sol, à Orléans.

Véritable mémoire des sols de France et d'Europe, ce bâtiment conserve les échantillons de sols des programmes nationaux et européens de surveillance et d'inventaire. Il renferme actuellement plus de 50 000 échantillons qui peuvent être remobilisés pour la recherche. Ce dispositif unique en Europe, intégré à l'infrastructure nationale RARE (Ressources agronomiques pour la recherche), a été construit en pisé — matériau techniquement intéressant par son inertie thermique et hydrométrique, et de haute portée symbolique puisqu'il vise à stocker des échantillons de sol dans un bâtiment en « terre ».

modélisation — accompagne également le développement de systèmes d'observation *in situ* et de plateformes (voir chapitre 8). Ainsi sont mis en place des Observatoires pour la recherche en environnement (aux niveaux de la parcelle ou du bassin versant). Supports de projets de recherche nationaux et internationaux, ils deviennent des ressources inestimables de données sur le rôle des pratiques agricoles et du climat sur le fonctionnement des sols et du système sol-plante-atmosphère. L'agrégation des connaissances est également favorisée par le développement des plateformes de modélisation : la plateforme Sol Virtuel (VSoil), conçue d'emblée comme un outil accessible même aux non-modélisateurs, permet de coupler différents modèles de description du fonctionnement des sols à l'échelle locale, tandis que la plateforme Record — et sa possibilité de connexion avec les bases de données sur les sols — supporte la mise en œuvre de modèles de culture sur de vastes territoires.

La poursuite et l'approfondissement des travaux de cartographie des sols

Dans les années 1960, différents travaux de cartographie des sols sont réalisés en France, pour des objectifs très variés et avec des pratiques parfois sensiblement différentes. La nécessité d'une harmonisation des conceptions et des réalisations apparaît à cette époque. Parallèlement, un besoin croissant de connaissances sur les sols incite à l'établissement d'un inventaire plus systématique des sols du territoire français. À la suite des travaux de la Commission de pédologie et de cartographie des sols (CPCS), l'Inra décide, en janvier 1968, la création du Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France (SESCPF), dont la direction est confiée à Marcel Jamagne et qui vise en priorité une couverture du territoire au 1/100 000. Cependant, à la fin des années 1980, il apparaît, malgré de nombreuses sollicitations ministérielles, que ce programme, trop lent et trop lourd à gérer compte tenu des moyens mis à la disposition du SESCOPF, ne permet pas d'envisager une couverture totale du territoire dans des délais raisonnables. Une réflexion collective débouche sur un projet de réalisation d'un inventaire à plus petite échelle, moins précis peut-être, mais plus rapide et satisfaisant. En 1990, le programme Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS) est ainsi élaboré par l'Inra et le ministère de l'Agriculture (DERF), et confié à M. Jamagne et Michel-Claude Girard. Il renforce ainsi cette mission complémentaire, hors recherche, financée par le ministère de l'Agriculture et d'intérêt national. Ce programme comporte deux volets complémentaires : d'une part au niveau régional (Référentiels régionaux pédologiques au 1/250 000), d'autre part au niveau local (secteurs de référence, par exemple au 1/10 000). Il s'agit de renforcer les moyens, mais également l'animation et la coordination nationale de ces travaux. Plus tard, au début des années 2000, conscients de leurs intérêts convergents à disposer au niveau national d'informations sur la caractérisation des sols

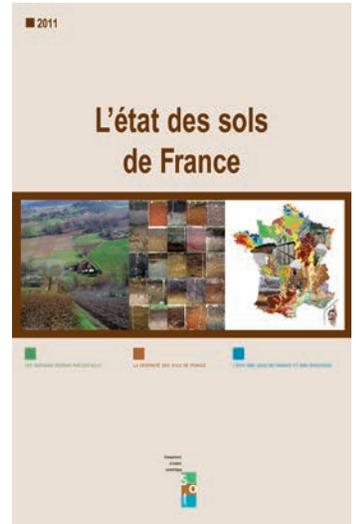


Figure 11.2. L'état des sols de France. Rapport du GIS Sol (2011).

Cet ouvrage, publié en 2011, a mis à la disposition d'un large public le premier état des lieux sur la qualité des sols de France métropolitaine et des outre-mer. Il est issu d'un important travail d'acquisition et d'exploitation de données réalisé par le GIS Sol pendant dix ans. Ce rapport décrit les différentes fonctions des sols, leur diversité et leur état (chimique, biologique et physique). Ce premier état des lieux souligne les principales inquiétudes relatives à l'évolution de la qualité des sols, mais met aussi en évidence certains points positifs. Au niveau national, ce rapport a fortement contribué au porter à connaissances des enjeux et états des sols ainsi qu'à la large appropriation par les citoyens, les décideurs ou les aménageurs de ces sujets. Ouvrage de référence, il a permis l'émergence de ce sujet au sein de la société.

et l'évolution de leur qualité, les ministères de l'Agriculture et de l'Écologie, l'Inra, l'Institut français de l'environnement (IFEN) et l'Ademe décident de renforcer et de mettre en commun leurs moyens pour bâtir un dispositif national d'inventaire et de surveillance des sols : le GIS Sol (encadré 11.1). En moins de vingt ans, l'action du GIS Sol et la coordination assurée par l'unité InfoSol ont permis d'accélérer l'acquisition de la couverture pédologique au 1/250 000 de la France, de disposer, notamment à travers l'achèvement de la première campagne du RMQS, d'un premier état des lieux sur la qualité des sols de France métropolitaine et des outre-mer (figure 11.2) et de proposer un outil en ligne de caractérisation de la fertilité des sols¹⁴⁶. Des données sur les sols à différentes échelles sont ainsi désormais disponibles et accessibles aux pouvoirs publics et à la recherche.

► Des menaces aux services : une vision renouvelée de la place des sols dans les écosystèmes

La prise de conscience croissante du rôle central des sols dans les écosystèmes et des pressions qu'ils subissent contribue à l'identification d'une liste de menaces dont les sols sont l'objet et dont il faut les préserver¹⁴⁷. Ainsi, les risques d'érosion, de tassement, la compréhension du déterminisme des transferts et de dégradation des polluants dans les sols, la définition et la qualification de la qualité et de la fertilité (minérale et organique) restent autant de thématiques de recherche récurrentes développées dans le département EA jusqu'en 2015, ce qu'illustre l'analyse des faits marquants du département EA sur la période 2005-2017 (figure 11.3). Parallèlement, en lien avec l'intérêt pour des systèmes de cultures écologiquement intensifs, se développent des travaux plus intégrés sur les échanges sol-plante, conduisant, par exemple, à des avancées sur des thèmes tels que la dynamique d'absorption du phosphore ou les échanges sol-rhizosphère.

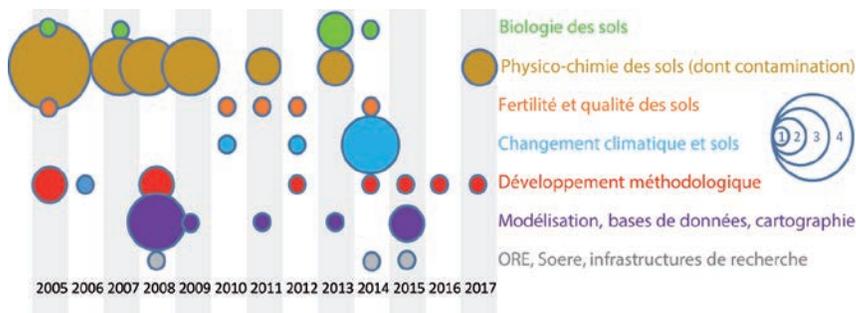


Figure 11.3. Les thématiques des faits marquants du département EA relatifs aux sols, de 2005 à 2017. Durant ces années, le département EA a recensé 166 faits marquants, dont 32 (soit 20 %) concernent directement ou indirectement des thématiques de recherche avec une composante sol.

Ore : Observatoires de recherche en environnement ; Soere : Systèmes d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement.

146. <http://webapps.gissol.fr/geosol/>.

147. Ces menaces sont listées dans la stratégie thématique sur les sols (2006) : tassement, érosion, contaminations, perte en matières organiques, diminution de la biodiversité, artificialisation, glissements de terrain, salinisation.

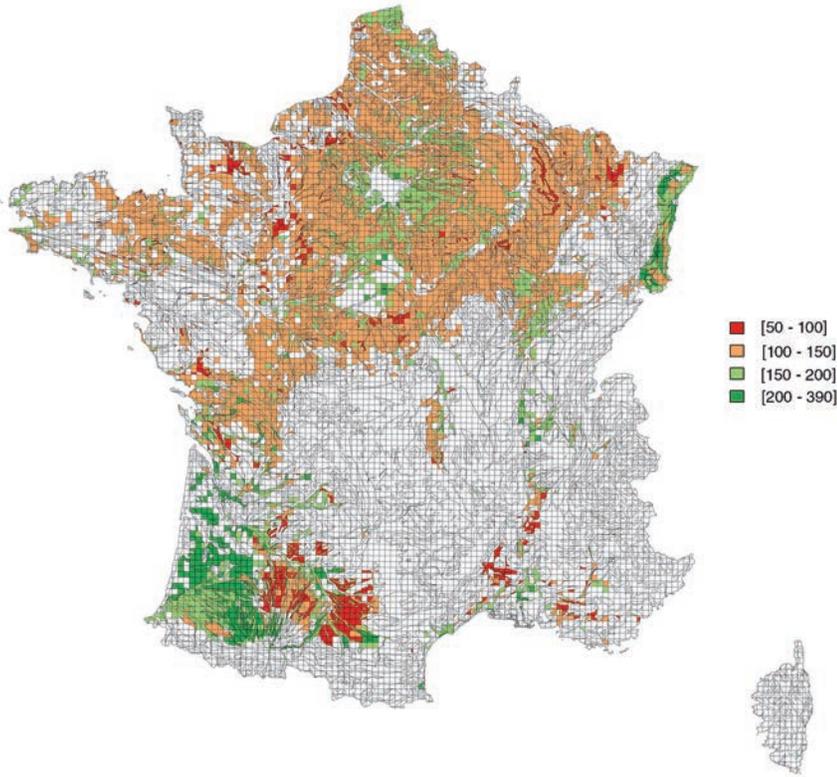


Figure 11.4. Exemple d'évaluation d'un service écosystémique auquel contribuent les sols : l'évaluation de la quantité d'azote disponible dans le sol pour les plantes. Cette carte est issue de l'étude Efese-Écosystèmes agricoles, commanditée par le ministère de l'Écologie et le métaprogramme EcoServ, étude à laquelle ont contribué de nombreux chercheurs du département EA (Therond *et al.*, 2017).

Cette carte représente la quantité d'azote minéral total fournie par l'écosystème (en kg N/ha) pour les systèmes de grandes cultures en France. Le calcul est réalisé par le modèle de culture Stics, sur une durée de trente ans. Les unités de simulation sont constituées de la superposition des couches suivantes : base de données géographique des sols de France au 1/100 000, maillage Safran 8 km par 8 km pour le climat, base de données des pratiques culturales, base de données des séquences de culture.

Avec la publication du Millennium Ecosystem Assessment, l'année 2005 marque un tournant fort dans la relation sols-sociétés : les sols ne sont plus seulement des ressources en danger à protéger, ils contribuent également à la fourniture de services écosystémiques et constituent d'incalculables réservoirs de biodiversité. Les travaux du département EA accompagnent cette transition par l'émergence des recherches sur la biologie des sols, avec une volonté affichée du département de contribuer au développement de l'agroécologie (ex. : méthodes de caractérisation des micro-organismes du sol et de leurs activités, voir p. 177), et par le renforcement de celles sur le changement climatique (ex. : émissions de GES, stocks de carbone, voir encadré 5.1). Les chercheurs du département EA sont ainsi en mesure de produire la première carte de France de l'ADN du sol (UMR Agro-écologie Dijon) ou de préciser la sensibilité de populations d'enchytréides à l'exposition aux produits phytosanitaires (UMR EcoSys Versailles). Outre ces avancées sur les fronts de science en biologie, l'ouverture vers les services écosystémiques favorise le développement de travaux transdisciplinaires sur les sols (figure 11.4), en lien avec les sciences économiques et sociales, et l'analyse du

fonctionnement d'écosystèmes très anthropisés, comme les jardins en ville ou les friches industrielles (encadré 11.2).

On notera que nombre des travaux marquants, depuis 2005, ont également une portée méthodologique, visant à tester, développer et proposer de nouvelles approches de caractérisation des sols (figure 11.3). Ce développement dépasse parfois la seule sphère des chercheurs en allant jusqu'au dépôt de brevet

Encadré 11.2. Sols urbains et périurbains : friches industrielles et sols de jardins

Longtemps considérés comme « exotiques » par la communauté scientifique, et par conséquent peu pris en compte par les pédologues, les sols urbains suscitent aujourd'hui un fort intérêt (figure 11.5). Dans un contexte d'accroissement inéluctable de la population urbaine, ils sont bien plus qu'un support physique pour les activités humaines, et sont au cœur d'enjeux sanitaires, environnementaux, fonciers et économiques majeurs. Ils font l'objet d'usages diversifiés incluant non seulement les activités urbaines et industrielles, mais aussi forestières (espaces verts et de loisirs) et agricoles (agriculture urbaine et périurbaine). Ils sont caractérisés par une très forte hétérogénéité de composition et de distribution spatiale qui résultent des transformations (mélanges, tassement, scellement), des excavations de matériaux terreux et des apports de matériaux exogènes (constructions, déchets). Ils sont aussi soumis à des changements très rapides d'affectation et d'utilisation, et peuvent receler de fortes contaminations susceptibles d'affecter la santé humaine. Dans les villes peuvent coexister des sols profondément transformés et des sols naturels, mais ces derniers sont soumis à des conditions différentes de celles de leur origine (ex. : tassement, température). Les sols urbains assurent des fonctions essentielles et jouent un rôle clé dans la fourniture de services écosystémiques*. Par exemple, ils sont impliqués dans le cycle de l'eau (ruissellement, stockage, infiltration) ; végétalisés, ils contribuent à augmenter la biodiversité, à réduire les effets d'îlot de chaleur, à stocker du carbone et à atténuer les effets des pollutions.

« Sol urbain » recouvre les sols influencés fortement par les activités humaines et localisés principalement dans des territoires urbains. L'acronyme Suitma (Soils of Urban, Industrial, Traffic, Military and Mining Areas) considère les sols qui se sont formés dans une large gamme des territoires marqués par les activités humaines, non seulement les villes, mais aussi les zones industrielles, commerciales, de transport, minières et militaires comme, par exemple, les champs de bataille. Suitma est aussi un groupe de travail de l'Union internationale des sciences du sol (UISS), créé en 1998, qui associe les principaux acteurs internationaux, et notamment français, dans le domaine de la pédologie urbaine et organise tous les deux ans un congrès international**.

L'étude des sols urbains ne s'est véritablement développée en France qu'à partir des années 1990, et les équipes qui ont historiquement investi ce domaine sont, entre autres, le Laboratoire sols et environnement (LSE) de Nancy, le Laboratoire des sciences de l'environnement de l'École nationale des travaux publics de l'État (ENTPE) de Lyon (devenue l'École de l'aménagement durable des territoires), l'unité de recherche Ephor de l'Institut national d'horticulture (INH) d'Angers, et l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar) de Nantes, AgroParisTech. Le département EA s'est impliqué dès cette époque dans l'étude des sols urbains en contribuant à leur classification (ex. : Anthrosols dans le Référentiel pédologique*** ; Technosols et Anthrosols de la WRB, groupe Suitma) et à l'examen de leurs caractéristiques et propriétés. Le LSE a construit en partie son projet sur la connaissance de la pédogenèse et du fonctionnement de ces sols. Il a étudié les sols des friches industrielles, notamment dans le contexte du GISfi (groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles****), créé en 2002 par l'université de Lorraine, l'Inra, le CNRS, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Ineris, pour répondre aux questions complexes posées par la reconversion des territoires dégradés et pollués laissés par l'activité industrielle. Il a aussi contribué à la connaissance de la pédogenèse des technosols et

au développement des technologies de traitement des sols pollués (ex. : construction de sols, phytoremédiation des sols pollués, avec la valorisation de la biomasse – projets Lorver et Agromine). Dans le cadre du Laboratoire international associé Ecoland entre l'université de Lorraine, l'Inra et l'université Sun Yat-sen de Canton, les travaux menés par le département EA se sont élargis aux milieux miniers avec les questions de restauration de sites de mines polymétalliques et de mines de terres rares.

Le LSE s'est aussi beaucoup impliqué dans l'étude des sols des jardins en tant que supports d'une agriculture urbaine, et ce dès les années 1990. Aujourd'hui, à l'échelle nationale, l'éclatement des formes de jardins collectifs résulte d'attentes sociales et écologiques de plus en plus diversifiées. À l'échelle locale, les modes de gouvernance sont contrastés et mobilisent des réseaux d'acteurs de plus en plus complexes. Au jardin, la fonction alimentaire est pluridimensionnelle, et la tendance est à l'écologisation des pratiques. Les sols des espaces verts et des jardins ont une morphologie et un fonctionnement proches des sols agricoles, tout en ayant une composition et des usages différents. Si la qualité des sols de jardins est très hétérogène, ils demeurent fertiles dans leur grande majorité, supports d'une biodiversité considérable, tout en présentant localement des niveaux de pollution élevés dus aux pratiques de jardinage et à l'environnement urbain (ex. : projet Jassur). Pour le jardinier, l'intérêt alimentaire et nutritionnel peut alors ponctuellement être remis en cause par des risques sanitaires. Dans ce cas, une bioremédiation de la pollution métallique est envisageable. Avec la tendance à la végétalisation des villes, les sols prennent une importance plus grande et les jardins potagers apparaissent aussi sur les toits et les murs des bâtiments (ex. : projet de végétalisation d'AgroParisTech). Les jardins et plus généralement les sols urbains constituent un champ multidisciplinaire où, à la science du sol, sont associés le génie civil, histoire, archéologie, architecture et urbanisme, sciences de la santé, sciences humaines et sociales, sciences juridiques et économiques.

Aujourd'hui, le sol urbain est étudié au travers d'approches plus intégratrices de la qualité et de la multifonctionnalité en réponse à un besoin de sols fonctionnels capables de rendre un vaste ensemble de services écosystémiques. L'enjeu est d'intensifier la prise en considération des sols urbains et périurbains dans la construction de la ville et de dépasser les approches limitées par la seule vision foncière. À ce titre, le développement de cartes et d'informations sur les sols en ville et en périphérie est un axe de travail qui permet de réfléchir sur l'affectation des sols, en fonction des services attendus par la société. Ainsi, le concept de service écosystémique est un point de convergence et un élément de langage commun, compréhensible et appropriable par l'ensemble des acteurs concernés par la gestion des territoires urbains. Le projet Destisol ambitionne, par exemple, de promouvoir la qualité des sols en amont des démarches d'aménagement, pour concilier qualité des sols, couverture et usage. Dans un tel contexte, de développement des services écosystémiques et de l'agriculture urbaine, le département EA devrait prendre une place de plus en plus importante dans la connaissance et la gestion des éco-agrosystèmes urbains, pour contribuer à imaginer et à mieux gérer la ville de demain en réponse au changement global.

* Morel J.-L., Chenu C., Lorenz K., 2015. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAS). *Journal of Soils and Sediments*, 15 (8), 1659-1666, DOI : 10.1007/s11368-014-0926-0.

** Levin M.J., Kim K.-H.J., Morel J.L., Burghardt W., Charzynski P., Shaw R.K., 2017. *Soils within cities*, edited on behalf of IUSS Working Group Suitma, Catena-Schweizerbart, Stuttgart.

*** Baize D., Girard M.C., 2008. *Le Référentiel Pédologique*, Association française d'étude des sols, Éditions Quæ, 405 p.

**** www.gisf.univ-lorraine.fr

***** Schwartz C., Séré G., Stas M., Blanchart A., Morel J.-L., Consales J.-N., 2015. Quelle ressource Sol dans les villes pour quels services et quels aménagements ? *Innovations agronomiques*, 45, 1-11.

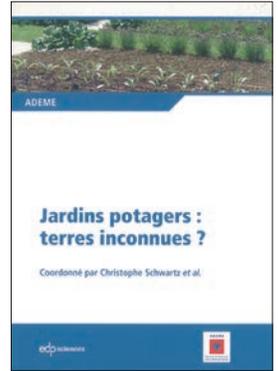


Figure 11.5. Deux ouvrages coordonnés par des chercheurs EA sur les Suitsma.

Schwartz C. et al., 2013. *Jardins potagers : terres inconnues ?* Ademe/EDP Sciences, 176 p.
 Levin M.J., Kim K.-H.J., Morel J.-L., Burghardt W., Charzynski P., Shaw R.K., IUSS Working Group Suitma, 2017. *Soils within Cities. Global Approaches to their Sustainable Management*, Catena-Schweizerbart, 253 p.

(ex. : Soilinsight[®], LSE Nancy ou Mosolog¹⁴⁸, UMR Biogéochimie du sol et de la rhizosphère, Montpellier), une présentation devant des commissions internationales afin de modifier les analyses de cycle de vie des produits (ex. : extraction de l'ADN et activités enzymatiques des sols respectivement par Agroécologie à Dijon et EcoSys à Versailles) ou encore la publication de normes internationales.

► **Le leadership mondial en science du sol : de la recherche à la politique**

De nombreux chercheurs du département EA ont été impliqués très tôt dans des dynamiques européennes. Ainsi, Joël Daroussin, Marcel Jamagne, Dominique King, Dominique Arrouays et Christine Le Bas ont été les artisans de la carte européenne des sols au millionième et les rédacteurs des premiers rapports sur l'état des sols en Europe. Ils ont contribué à la prise de conscience que les sols nécessitent une politique dédiée.

En Europe, bien qu'une résolution visionnaire du Conseil de l'Europe (résolution 72/19) ait proposé de considérer le sol comme un « bien fini, précieux pour l'humanité et qui se détruit facilement » et invité les États membres à mettre en place une politique de conservation des sols, il a fallu attendre le début des années 2000 en Europe pour voir publier la communication sur les sols « Towards a thematic strategy for soil protection (COM(2002)179) », dans laquelle apparaissent les services rendus par les sols et les différentes menaces pesant sur eux à l'échelle de l'Europe. Suite à un processus de consultation auquel contribuent de nombreux chercheurs du département comme Yves Le Bissonnais, Michel Robert, Claire Chenu, Dominique Arrouays, Dominique King et André-Bernard Delmas, la Commission européenne propose un projet de directive en 2006 dans l'objectif d'adopter des mesures pour la protection des sols européens. Aucun consensus politique n'ayant pu être dégagé entre les États membres de l'Union, la proposition législative est finalement abandonnée en 2014, mais la Commission européenne poursuit son action à travers l'intégration de mesures sur les sols au sein de ses politiques sectorielles (ex. : climatique, agricole, alimentaire) et de ses programmes-cadres de recherche.

À l'échelle internationale, l'initiative GlobalSoilMap visant à développer des cartes numériques mondiales (encadré 11.3) sur l'état des sols voit le jour dès 2006. Des chercheurs du département EA comme Philippe Lagacherie et Dominique Arrouays y participent dès le démarrage et, grâce à leurs échanges, font bénéficier la France des derniers développements en cartographie numérique. Parallèlement, ils enrichissent les travaux du groupe de l'expertise nationale. Ces cartes et données sur les sols du monde prennent actuellement une importance considérable compte tenu des enjeux liés aux changements d'usage des sols, engendrés par exemple par la déforestation, l'urbanisation ou encore le développement des cultures à vocation énergétique. La réalisation de bilans environnementaux (ex. : ACV des biocarburants, effets du développement urbain) nécessite d'être en mesure de qualifier non seulement la qualité des sols transformés, mais également les conséquences du changement d'affectation des sols sur les GES ou le stockage de l'eau (encadré 11.4).

148. Mosolog : test haut débit de mesure de la réactivité environnementale de matières organiques dissoutes.

En 2011, la FAO, constatant l'absence d'un instrument international de gouvernance sur les sols, crée le Partenariat mondial sur les sols (Global Soil Partnership, GSP), avec pour mandat d'améliorer la gouvernance des ressources en sols de la planète, de soutenir et de coordonner des initiatives régionales, nationales ou supranationales, dans le respect du droit souverain des États. Ce Partenariat mondial sur les sols est épaulé par un panel technique international (ITPS), construit à l'image du Giec et composé de 27 experts internationaux (dont D. Arrouays) qui ont pour mission de fournir des avis et des orientations scientifiques et techniques au Partenariat mondial sur les sols. L'ONU déclare 2015 Année internationale des sols et nomme Claire Chenu ambassadrice spéciale. À cette occasion, l'ITPS établit un état alarmant de la ressource mondiale en sol. Cette expertise a été récemment confirmée et amplifiée par la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES). Le département EA est également bien présent au niveau international dans l'étude et la gestion des sols urbains, les Suitma, avec la création du groupe Suitma en 1998 (par Wolfgang Burghardt, université Duisburg-Essen, et Jean-Louis Morel) et les

Encadré 11.3. Digital Soil Mapping : la cartographie des sols par modélisation statistique

La cartographie numérique des sols, ou encore cartographie des sols par modélisation statistique (CSMS), connue à l'échelle internationale sous le vocable Digital Soil Mapping (DSM), peut être définie comme la production d'estimations spatialisées de types de sol ou de valeurs de propriétés des sols en tout point de l'espace par des modèles statistiques alimentés par des données spatiales environnementales et calibrés avec les données de sol disponibles sur la zone d'étude. Les scientifiques du département EA ont fortement développé cette thématique de recherche en publiant abondamment et précocement, en organisant la première conférence internationale à Montpellier en 2004, et en contribuant à la création du groupe de travail Digital Soil Mapping, l'un des plus actifs de l'Union internationale des sciences du sol.

Le principe général de la CSMS est de prédire des classes de sol ou des propriétés de sol en utilisant, d'une part, les données pédologiques disponibles sur la zone à étudier, d'autre part, des données spatiales exhaustives représentant des éléments du paysage ou de l'environnement en relation avec les sols, appelées « covariables ». Ces prédictions sont réalisées par des fonctions de prédiction induites par des modèles statistiques (notamment des algorithmes d'apprentissage automatique) ou géostatistiques (de type « régression krigeage »). Par rapport à la cartographie conventionnelle, la CSMS propose un mode de représentation de la variabilité des sols profondément différent, un nombre plus important de données spatiales prises en compte, une formulation explicite et traçable du modèle de prédiction des sols, et une estimation quantifiée et une représentation explicite de l'incertitude de prédiction.

Grâce à une activité scientifique intense, la CSMS a acquis un degré de maturité qui permet d'envisager de l'utiliser à des fins opérationnelles en dehors du cadre de recherche où elle a été initialement conçue. Ceci a été concrétisé en particulier par l'émergence de plusieurs projets de cartographie d'envergure mondiale (GlobalSoilMap, SoilGrids, pilier 4 du Global Soil Partnership de la FAO), dont certains (GlobalSoilMap) sont portés par ou incluent des agents du département EA* (pilier 4 du Global Soil Partnership). De la même façon, la CSMS est à présent envisagée comme une évolution logique des programmes de cartographie des sols de France**.

* Arrouays D., Grundy M.G., Hartemink A.E., Hempel J.W., Heuvelink G.B., Hong S.Y. et al., 2014. GlobalSoilMap: Toward a fine-resolution global grid of soil properties. *Advances in Agronomy*, 125, 93-134, Academic Press.

** Voltz M., Arrouays D., Bispo A., Lagacherie P., Laroche B., Lemerrier B. et al., 2018. *La cartographie des sols en France. État des lieux et perspectives*, Inra, France, 112.

Encadré 11.4. Le changement d'affectation des sols : un CASse-tête

Les changements d'affectation des sols (ou CAS) correspondent à des modifications des usages des sols telles que la mise en culture de forêts, de zones humides ou de prairies, l'imperméabilisation ou l'artificialisation de terres agricoles ou forestières, la mise en réserve de zones cultivées ou encore le développement de friches. Immanquablement, cette modification de l'usage impacte la qualité des sols et donc les services qu'ils peuvent rendre. Ainsi, peuvent advenir des émissions accrues de CO₂ (ex. : retournement de prairies, déforestation), des modifications des capacités de rétention en eau (ex. : imperméabilisation des sols, afforestation) ou encore des bouleversements de la biodiversité des sols (et plus largement des milieux ainsi modifiés). Cette situation a initialement été beaucoup étudiée dans le cadre du développement des biocarburants de première génération. Pensés pour atténuer les émissions de GES, leurs bilans de la production à la consommation étaient trop partiels, car ils n'intégraient pas les émissions liées au changement d'affectation des sols. En effet, la demande de matières premières agricoles utilisées pour produire des biocarburants augmentant, elle entraîne une tension sur les marchés, une hausse des prix, une incitation à produire, et donc potentiellement la conversion en terres agricoles de parcelles initialement non destinées à de tels usages. Ce changement d'usage libère alors le carbone stocké dans les sols et dans la biomasse. Ces quantités de carbone libérées doivent être additionnées au bilan des biocarburants. Ce calcul reste complexe et incertain, car il fait appel à divers modèles, notamment économiques, et à des données mondiales encore partielles sur les sols*. Le développement de programmes tels que GlobalSoilMap (encadré 11.3), visant à produire des informations sur les sols au niveau mondial, est un atout majeur pour de futures évaluations des changements d'affectation des sols.

* De Cara S., Goussebaile A., Grateau R., Levert F., Quemener J., Vermont B., 2012. Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants. Rapport Ademe, 96 p.
 Bispo A., Gabrielle B., Makowski D. (coord.), 2017. Effets environnementaux des changements d'affectation des sols liés à des réorientations agricoles, forestières, ou d'échelle territoriale : une revue critique de la littérature scientifique. Synthèse du rapport d'étude, Inra, France, 64 p.
 El Akkari M., Réchauchère O., Bispo A., Gabrielle B., Makowski D., 2018. A meta-analysis of the greenhouse gas abatement of bioenergy factoring in land use changes. *Scientific Reports*, 8 (1), 8563.

travaux qui ont pu en découler tant sous la forme de conférences périodiques (figure 11.5) que de projets internationaux.

Cette effervescence internationale et européenne s'est également traduite en France par une plus forte considération des sols qui a émergé à l'interface science, société et politique, notamment grâce aux actions menées par le programme Gessol (initié dès 1998 par le ministère de l'Écologie et animé par l'Inra, puis par l'Ademe) et par le GIS Sol créé en 2001. Cela a conduit à la publication de plusieurs rapports nationaux appelant à une meilleure gestion et gouvernance des sols¹⁴⁹ ainsi qu'à l'émergence d'un projet de stratégie nationale sur les sols.

Une dizaine de chercheurs du département EA ont ainsi été impliqués dans cette dynamique depuis le début des années 2000, animant et participant à ces groupes nationaux, européens et internationaux (figure 11.6). Ils ont porté la vision française et les résultats des recherches conduites dans le département à un haut niveau, à travers leurs auditions ou leurs écrits dans le cadre de diverses études, expertises et rapports. L'initiative 4 pour 1 000 en est ainsi la plus parlante illustration : cet ancien résultat issu de la recherche a été converti en une initiative politique mondiale, lancée lors de la COP21 à Paris (voir encadré 5.1).

149. Par exemple Courtoux A., Claveirole C. 2015. La bonne gestion des sols agricoles : un enjeu de société. Rapport du Conseil économique, social et environnemental, 66 p.

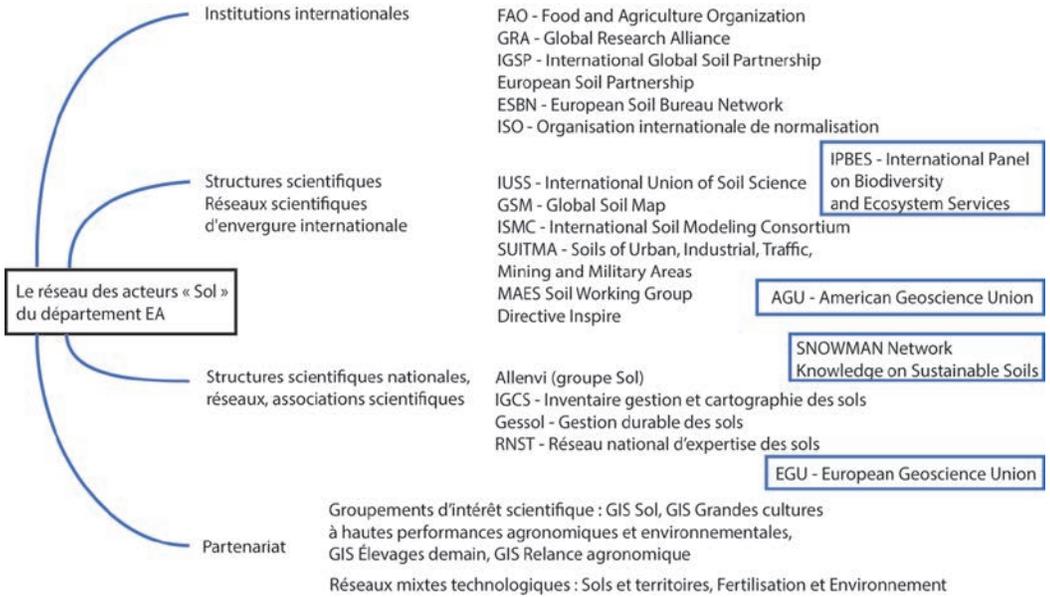


Figure 11.6. L'implication du département EA dans des réseaux internationaux et nationaux, scientifiques et partenariaux. Sont citées ici les structures dans lesquelles des agents du département EA sont engagés au nom du collectif.

Compte tenu des services rendus à l'humanité, mis en évidence notamment par les travaux nationaux et portés par les chercheurs du département EA, le sol est donc devenu un défi planétaire : aux côtés des enjeux sur le changement climatique et la sécurité alimentaire émerge désormais le concept de sécurité des sols, *soil security*¹⁵⁰, qui a donné lieu à plusieurs conférences (dont celle de Paris en 2016 coorganisée avec des agents du département EA). Plus qu'un sujet scientifique, c'est désormais un objet politique que les États se réapproprient. Pour favoriser le transfert des résultats de la recherche vers la société et en retour recueillir les souhaits de la société en lien avec les sols, les acteurs « sol » du département EA s'investissent également fortement dans des structures partenariales de type GIS ou RMT (figure 11.6).

► Conclusion

Vingt ans après, les travaux sur les sols menés par le département EA apparaissent très intégrés aux recherches sur le fonctionnement du continuum sol-plante-atmosphère, au plus proche de la demande sociétale. Cette ouverture réussie du département vers la biologie du sol, l'écologie du sol, le droit du sol et l'économie s'accompagne de fait d'une perte en compétences dans les domaines de la pédogenèse et de la physique du sol ; pour maintenir le *leadership* du département sur la recherche dans le domaine des sols, et pour répondre aux grands défis qui nous sont posés,

150. McBratney A., Field D.J., Koch A., 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213.

en lien avec le changement climatique et le changement d'usage des terres, un renouveau des compétences dans ces domaines reste à envisager.

Quoi qu'il en soit, certaines équipes, en collaboration ou en UMR avec des hydrologues, des hydrogéologues, des météorologues, sont désormais en posture pour porter les sols dans les modèles globaux de fonctionnement de la zone critique ou de prévision météorologique. Les dispositifs d'observation, d'expérimentation et de modélisation s'intègrent dans des infrastructures scientifiques collectives, ce qui leur confère une visibilité renouvelée, position d'autant plus forte que le partenariat avec la profession agricole est riche et actif. L'implication des chercheurs du département EA dans les expertises collectives de l'Inra ou, plus largement, dans des travaux en appui aux politiques publiques a favorisé la prise de conscience par la société des enjeux liés aux sols, déclinée dans plusieurs politiques sectorielles (déchets, climat, biodiversité). La prochaine étape, dans laquelle le département EA a un rôle à jouer, sera l'élaboration d'une stratégie nationale pour la protection des sols.

Pour en savoir plus

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.-E., Stengel P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective, Synthèse, Inra, 32 p.

Arrouays D., Savin I., Leenaars J.G., McBratney A.B., 2018. *GlobalSoilMap: Digital Soil Mapping from Country to Globe*, London, GBR, CRC Press, Taylor & Francis Group, 174 p.

Bispo A., Guellier C., Martin E., Sapijanskas J., Soubelet H., Chenu C., 2013. *Les sols. Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable*, Éditions Quæ, 379 p.

GIS Sol, 2011. *L'état des sols de France*, Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Informations sur les sols de France : www.gissol.fr.

Therond O., Tichit M., Tibi A., Accatino F., Biju-Duval L., Bockstaller C. *et al.*, 2017. Volet « écosystèmes agricoles » de l'Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques, 966 p.

Microbiologie des sols

Philippe Lemanceau

Les sols ont pendant longtemps été considérés comme un support physique de production. Les premiers travaux sur la microbiologie des sols remontent pourtant au ^{xix}^e siècle. Ainsi, la présomption de la présence de micro-organismes dans les sols fut établie suite aux travaux de Jean-Baptiste Boussingault (1802-1887) qui montraient que la dégradation de l'humus ne pouvait représenter la seule source d'azote dans les sols. Le rôle des micro-organismes dans le processus de nitrification fut ensuite démontré par Théophile Schloesing (1824-1919) et Achille Müntz (1846-1917), confirmant ainsi l'hypothèse de Pasteur (1822-1895) sur l'origine microbienne du nitrate ; des micro-organismes impliqués dans la nitrification furent ensuite isolés par Sergueï Winogradsky (1856-1953). Dans le même temps, la fixation biologique de l'azote au sein des nodules de légumineuses fut mise en évidence en 1886 et un agent bactérien responsable découvert par Martinus Beijerinck en 1888. L'étude des interactions bénéfiques entre plantes et micro-organismes a dès lors constitué une thématique majeure de recherche, avec la définition de la rhizosphère par Lorenz Hiltner en 1904.

L'étude des micro-organismes a nécessité une série de développements méthodologiques du fait de leur petite taille, de leur difficulté d'accès et de l'hétérogénéité à différentes échelles de la matrice tellurique. Au cours de la première moitié du ^{xx}^e siècle, ces développements portaient, d'une part, sur la recherche de milieux de culture favorables (milieux électifs) à la croissance de souches particulières, ensuite classées sur des critères morphologiques et/ou physiologiques souvent associés aux cycles géochimiques, et, d'autre part, sur l'étude de grands groupes fonctionnels sans connaître nécessairement les organismes responsables (voir figure 7.1). À cette époque, le cours de microbiologie des sols de l'Institut Pasteur dispensait l'enseignement des méthodes correspondantes.

Au cours des années 1970 apparaissent les premières études de diversité de souches isolées de façon systématique sur des milieux électifs ou non. La caractérisation des populations correspondantes se fait d'abord sur la base de leurs activités et/ou de leurs profils trophiques (aptitude à utiliser une gamme de composés organiques), permettant leur identification taxonomique à l'aide de clés dichotomiques. Dans le même temps paraissent les premiers ouvrages d'écologie microbienne du sol et les premières revues internationales d'écologie microbienne. Puis les progrès en biochimie (électrophorèse) et en biologie moléculaire (PCR : *polymerase chain reaction*, ou amplification en chaîne par polymérase) ouvrent la voie à l'analyse moléculaire de ces populations en ciblant des séquences répétées et/ou des séquences à valeur taxonomique. Il est ainsi possible de montrer en particulier que la plante influence la biodiversité rhizosphérique et que cette diversité est spécifique de la plante-hôte.

Dans les années 1990, il apparaît cependant que l'étape d'isolement induit un biais important, car seule une faible fraction des micro-organismes telluriques est cultivable, conduisant ainsi à une vision tronquée de la diversité microbienne. Il faudra attendre à nouveau des développements méthodologiques majeurs avec l'extraction de l'ADN du sol pour réaliser l'immensité de cette diversité, qui est de l'ordre d'un million d'espèces d'archées et de bactéries et de plusieurs centaines de milliers d'espèces de champignons par gramme de sol. Dans le même temps paraît le Millennium Ecosystem Assessment, qui met en avant l'importance des sols et de leur fonctionnement biologique non seulement pour la production agricole, mais plus généralement pour une série de services écosystémiques. Il apparaît alors essentiel de mieux connaître la diversité microbienne du sol et son fonctionnement. C'est dans ce cadre que les départements EA et SPE décident d'unir leurs forces pour progresser ensemble dans les domaines de l'écologie microbienne, avec la création en 2003 de l'UMR Microbiologie et géochimie des sols à Dijon, associant, outre un laboratoire universitaire de géochimie, les laboratoires de recherche en microbiologie et sur la flore pathogène du sol qui avaient travaillé jusqu'alors en parallèle sur des fonctions biologiques complémentaires. Ces deux derniers laboratoires avaient construit une expertise reconnue dans les domaines des cycles géochimiques (carbone et azote), de la fixation biologique de l'azote avec ses applications à l'inoculation microbienne, de la biodégradation des pesticides, de la résistance des sols aux maladies d'origine tellurique et de la protection biologique contre ces

mêmes maladies. Durant cette période, les départements EA et SPE, avec le nouveau département EFPA, organisent et structurent les recherches en microbiologie des sols avec la création du réseau Écologie microbienne des sols et des milieux aquatiques (2004-2010). Ce réseau permet en particulier un rapprochement avec les laboratoires d'écologie microbienne de Lyon et de Nancy et aboutit à un projet de recherche majeur sur la microbiologie du sol en milieu agricole et forestier (Microger) dans le cadre de l'appel d'offres Ecoger de l'Inra, puis à la construction d'un projet européen FP7 (EcoFinders, 2011-2014). Pendant cette période, les progrès méthodologiques se poursuivent à vive allure avec le développement d'analyses du polymorphisme de l'ADN extrait du sol qui donnent théoriquement accès à toute la diversité microbienne en s'affranchissant de l'étape de mise en culture. Il devient ainsi possible d'analyser l'ensemble des communautés microbiennes (métacommunautés) et leurs génomes (métagénome). Cette voie a été grandement favorisée par la diminution spectaculaire du coût du séquençage de l'ADN¹⁵¹, grâce aux développements méthodologiques générés par les grands programmes de séquençage du génome humain et du microbiote digestif.

La réduction de ces coûts et les efforts de standardisation des méthodes à l'occasion de grands programmes de recherche permettent de caractériser la biodiversité tellurique dans des situations environnementales variées (types de sol, de climat, de mode d'usage). On peut citer en particulier le programme emblématique conduit dès 2006 au niveau national sur le Réseau de mesure de la qualité des sols (ANR Ecomic-RMQS, 2006-2008) qui a abouti en 2010 à une première cartographie nationale des communautés bactériennes telluriques. Les études de biogéographie de ces grands programmes nationaux et européens identifient les principaux filtres environnementaux impactant la diversité microbienne, avec en premier lieu les propriétés physico-chimiques des sols (en particulier pH) et en deuxième lieu le mode d'usage des sols. Ces recherches en biogéographie permettent d'évaluer pour les micro-organismes des lois d'écologie développées sur des organismes supérieurs (ex. : relation aire-espèce, stabilité comprenant résistance et résilience). Elles permettent également de montrer que, contrairement au postulat de Beijerinck, tous les micro-organismes ne sont pas partout. Elles permettent finalement d'établir le lien, d'une part, entre diversité microbienne et fonctionnement biologique du sol (ex. : cycles biogéochimiques, carbone et azote, résistance aux pathogènes végétaux et humains) et, d'autre part, entre diversité microbienne et stabilité (résistance, résilience) du fonctionnement biologique. Ces analyses du fonctionnement biologique sont enrichies par celles portant sur des gènes codant des activités impliquées dans des fonctions d'intérêt agronomique (ex. : synthèse d'antibiotiques impliqués dans la protection des plantes) et/ou environnemental (ex. : synthèse de l'oxyde nitreux réductase minimisant les émissions de ce puissant GES, biodégradation de pesticides). Elles permettent d'appréhender l'écologie de communautés fonctionnelles dont les populations peuvent appartenir à des espèces différentes. Cependant, notre connaissance des gènes de fonction du sol demeure limitée, et des initiatives de séquençage *in extenso* visent à mieux comprendre le fonctionnement biologique de sols modèles et à découvrir de nouveaux gènes de fonction. Pour importants qu'ils soient, ces gènes de fonction ne représentent qu'un potentiel génétique dont il est essentiel d'apprécier l'expression en appréhendant le transcriptome et le métabolome, et qu'il importe d'associer avec les fonctions et finalement les services écosystémiques attendus. Ce dernier axe bénéficie de la mise en place d'observatoires appareillés (ORE) et du développement de métaprogrammes sur les écosystèmes microbiens et sur les services écosystémiques.

Comme on le voit, les recherches en microbiologie du sol ont pendant longtemps été conditionnées et donc dirigées par la nécessité de développements méthodologiques. Elles appréhendent maintenant des dimensions d'écologie évolutive. On peut citer à titre d'exemple l'évolution des recherches sur l'écologie des interactions plantes-micro-organismes qui sont très présentes dès les premiers travaux en écologie microbienne, avec en particulier celles sur les symbioses bactériennes fixatrices d'azote et les symbioses endo (départements SPE et EA) et ectomycorhiziennes (départements EFPA et EA) débouchant sur

151. <http://www.genome.gov/sequencingcosts/>.

des applications d'inoculation de souches microbiennes. Ces recherches s'intensifient pendant la décennie 2010, elles bénéficient des développements méthodologiques, tout en y contribuant, et appréhendent aujourd'hui une vision évolutive des interactions entre plantes et micro-organismes dans la rhizosphère. Le renouveau de ces recherches réside en particulier dans la consolidation des relations avec les collègues travaillant sur le microbiote intestinal. Le microbiote rhizosphérique est ainsi considéré comme constituant avec la plante-hôte un superorganisme (holobionte) et contribuant à une meilleure compétitivité et productivité de la plante-hôte. Ces recherches intègrent nécessairement plus le partenaire plante en s'ouvrant aux collègues écophysiologistes du département EA et généticiens du département BAP, afin en particulier d'identifier des traits végétaux (génétiques et physiologiques) impliqués dans le recrutement de populations microbiennes bénéfiques. Dans le même temps, les recherches sur les traits microbiens bénéfiques, pouvant être distribués dans des fonds génétiques différents (communautés fonctionnelles), se poursuivent. Les relations multitrophiques s'élargissent en intégrant, dans les études d'écologie du sol et des agroécosystèmes, les relations complexes entre plantes (facilitation, compétition), microbiote et faune. L'ouverture des recherches en écologie microbienne de la rhizosphère à de nouvelles expertises est promue par la création du réseau PhytoMic (2016) ; un réseau sur les associations symbiotiques est également mis en place en 2015 (Agrosym).

D'un point de vue opérationnel, même si notre connaissance de la biodiversité des sols demeure fragmentaire, il est d'ores et déjà possible d'établir des référentiels d'interprétation des résultats d'analyses microbiologiques des sols selon le type de sol et ainsi d'établir un diagnostic de leur qualité biologique, comme pratiqué depuis bien longtemps pour les propriétés physico-chimiques. Ces méthodes de diagnostic sont maintenant transférées aux utilisateurs et gestionnaires des sols (ex. : projet Casdar AgrInnov 2011-2015 comprenant la coconstruction avec les agriculteurs d'un tableau de bord d'indicateurs biologiques de la qualité de leur sol et de l'impact de leurs pratiques ; Programme d'investissements d'avenir AgrEcoSol en cours portant sur le transfert technologique des outils développés par la recherche sur la caractérisation de la qualité biologique des sols). On réalise ainsi le chemin parcouru au cours des vingt dernières années ! Le diagnostic, pour important qu'il soit, n'a d'intérêt que s'il débouche sur l'action, ce qui nécessite la poursuite des recherches appliquées en biologie du sol dans les domaines de l'ingénierie écologique. Outre l'inoculation microbienne, l'enjeu est d'orienter les communautés microbiennes indigènes avec des systèmes agroécologiques adaptés (ex. : génotypes de plantes, associations végétales), et ainsi de mieux valoriser la biodiversité et les interactions biotiques pour assurer une production agricole de qualité en quantité suffisante, tout en garantissant la fourniture des services écosystémiques attendus des sols.

Pour en savoir plus

- Devers M., Rouard N., Martin-Laurent F., 2008. Fitness drift of an atrazine-degrading population under atrazine selection pressure. *Environ. Microbiol.*, 10, 676-684.
- Jones C., Spor A., Brennan F., Breuil M.-C., Bru D., Lemanceau P. et al., 2014. Recently identified microbial guild mediates soil N₂O sink capacity. *Nat. Clim. Chang.*, 4, 801-805.
- Lemanceau P., Maron P.-A., Mazurier S., Mougél C., Pivato B., Plassart P. et al., 2015. Understanding and managing soil biodiversity: a major challenge in agroecology. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, 67-81.
- Maron P.-A., Ranjard L., Mougél C., Lemanceau P., 2007. Metaproteomics: a new approach for studying functional microbial ecology. *Microb. Ecol.*, 53, 486-493.
- Philippot L., Raaijmakers J.M., Lemanceau P., van der Putten W.H., 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nat. Rev. Microbiol.*, 11, 789-799.
- Ranjard L., Dequiedt S., Chémidlin Prévost-Bouré N., Thioulouse J., Saby N.P.A., Lelièvre M. et al., 2013. Turn-over of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity. *Nat. Commun.*, 4, 1434.
- Siegel-Hertz K., Edel-Hermann V., Chapelle E., Terrat S., Raaijmakers J.M., Steinberg C., 2018. Comparative microbiome analysis of a Fusarium wilt suppressive soil and a Fusarium wilt conducive soil from the Châteaurenard region. *Front. Microbiol.*, 9, 568.

Les contaminations chimiques de l'environnement : les défis de l'écotoxicologie

Christian Mougin

Les disséminations de substances chimiques, en particulier celles utilisées dans l'agriculture, revêtent une importance, certes ancienne, mais aussi croissante à partir des années 1980. La connaissance du devenir de composés potentiellement toxiques dans les milieux naturels (sol, eau, air), de leurs effets sur les communautés d'organismes (micro-organismes, faune, flore) et leurs activités, *in fine* de leurs impacts sur le fonctionnement des écosystèmes, s'avère un défi majeur pour l'écotoxicologie. L'émergence dans les années 1980 de cette discipline à l'interface de l'écologie et de la toxicologie et son développement constituent pour l'Inra un axe stratégique de première importance dont le nouveau département EA devient un acteur incontournable.

Après sa réforme en 1997, l'institut adopte une politique volontariste en la matière et le département EA en bénéficie. Il renforce ses compétences scientifiques, notamment dans le domaine du devenir des contaminants dans l'environnement. Évaluer le risque que présente une substance chimique pour l'environnement nécessite, et c'est là toute la difficulté, de répondre à des questions dans des domaines scientifiques divers : recherches en physico-chimie (dispersion, persistance, transformation), en biologie (effets sur les organismes vivants), en écologie (modification de la composition et du fonctionnement des populations et des communautés). Il faut donc articuler et intégrer ces connaissances afin de modéliser des processus complexes.

Une animation scientifique transversale aux départements EA et SPE, intitulée « écotoxicologie », initiée en 1998 en lien avec la Structure scientifique mixte¹⁵² (Inra/DGAL), organise des séminaires communs pour engager une réflexion sur les expérimentations en mésocosmes¹⁵³, harmonise les approches et met en place plusieurs projets en écotoxicologie aquatique, à Rennes ou à Thonon-les-Bains. Afin de structurer les recherches sur les contaminants chimiques en milieu terrestre, réparties géographiquement dans différentes unités, le département EA soutient, en 2002-2004, le réseau Pesticides, puis le réseau d'animation scientifique Écodynamique des micropolluants en 2005-2011.

La direction scientifique Econat initie en 2004 une réflexion scientifique pour doter l'institut d'un dispositif de recherche en écotoxicologie attractif et reconnu sur le plan international. Un enjeu fort est de structurer la recherche en écotoxicologie terrestre pour disposer *in fine* d'une unité de recherche qui aurait un rôle moteur et fédérateur au sein de l'Inra et avec d'autres instituts. C'est sur le site de Versailles-Grignon qu'est constituée, à partir de 2006, l'unité Physicochimie et écotoxicologie des sols d'agrosystèmes contaminés (Pessac), associant les compétences scientifiques complémentaires des départements EA et SPE, et regroupant la plus grande partie des effectifs en écotoxicologie terrestre de l'Inra. Y sont également localisés des outils collectifs en science du sol, chimie et biochimie de l'environnement, mobilisables dans de nombreux programmes d'écotoxicologie (ex. : dispositifs expérimentaux de longue durée, plateformes). Les raisons en sont historiques, notamment le rôle pionnier en écotoxicologie à l'Inra de l'Unité de phytopharmacie et médiateurs chimiques (UPMC), la proximité des unités de recherche de Science du sol et de l'UMR Environnement et grandes cultures (EGC), dont les recherches portaient sur la compréhension des mécanismes de transfert et de dispersion des polluants dans l'environnement (pesticides, métaux) afin de mieux maîtriser la contamination des écosystèmes, cultivés ou non.

Le réseau d'animation scientifique Écodynamique des micropolluants fusionne en 2011 avec le Réseau des écotoxicologues de l'Inra, créé en 2009 et commun aux départements EA, SPE

152. La Structure scientifique mixte (Inra/DGAL), basée à l'Inra de Versailles, avait en charge la procédure d'évaluation des produits phytopharmaceutiques en vue de leur autorisation de mise sur le marché. Ses compétences sont aujourd'hui transférées à l'Anses.

153. Un mésocosme est un dispositif expérimental de taille moyenne reproduisant un écosystème simplifié, dans lequel des études écotoxicologiques peuvent être réalisées dans des conditions semi-contrôlées.

et EFPA, pour former l'actuel réseau d'Écotoxicologie terrestre et aquatique, Ecotox. Coanimé avec Irstea depuis 2017, Ecotox soutient également la création du réseau d'Écotoxicologie microbienne, EcotoxicoMic. Enfin, depuis 2016, l'initiative d'animation nationale¹⁵⁴ en écotoxicologie-toxicologie Recotox s'intéresse aux impacts écotoxicologiques des polluants dans les socio-agroécosystèmes, en s'appuyant sur un réseau de sites de recherche. En 2015, les unités Pessac et EGC fusionnent pour former l'UMR Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes (EcoSys) du centre de Versailles-Grignon, tout en gardant un pôle identifié en écotoxicologie.

Institut de recherche public, l'Inra fournit les connaissances scientifiques sur le devenir et l'impact des contaminants chimiques dans l'environnement. De nombreuses études et recherches s'inscrivent dans le cadre des procédures d'autorisation de mise sur le marché des pesticides. D'une manière plus générale, les chercheurs du département EA interviennent en appui des politiques publiques, en relation avec l'Ademe pour la recherche et avec l'Anses pour l'expertise. Ils sont aussi impliqués dans le programme Pesticides du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, confié à l'Inra, ainsi que dans le plan Écophyto au travers du Conseil scientifique d'orientation recherche et innovation. Ils contribuent régulièrement au volet « écotoxicologie » d'expertises collectives inter-organismes telles que Pesticides (2005), Variétés tolérantes aux herbicides (2011), Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier : impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques (2014), Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe (2016). Enfin, ils s'impliquent fortement dans le portage de normes internationales concernant les méthodes biologiques d'évaluation de la qualité des sols, notamment au niveau de l'Afnor et de l'ISO (ex. : extraction de l'ADN du sol, mesure des activités enzymatiques dans les sols, méthodes de prélèvement des invertébrés), ou dans la révision de certains textes à la vue des connaissances récentes.

154. Coanimée par l'Inra, Irstea, le CNRS et soutenue par l'Alliance AllEnvi, Recotox est une initiative en écotoxicologie pour suivre, comprendre et réduire les impacts des pesticides dans les socio-agroécosystèmes. Elle ambitionne d'associer la prise en compte de la chaîne pression-exposition-impact et les pratiques de gestion des agroécosystèmes, en s'appuyant sur un réseau de sites expérimentaux instrumentés.

Des recherches pour une gestion intégrée de la ressource en eau dans les territoires agricoles

Marc Voltz, Patrick Durand, Jérôme Molénat, Pierre Benoît, Cécile Dagès, Ophélie Fovet, Marie-Hélène Jeuffroy, Delphine Leenhardt, Stéphane Ruy

La gestion de l'eau est un enjeu majeur dans le cadre de la recherche d'un développement durable de nos sociétés. L'agriculture y tient une place importante, car elle est une des premières utilisatrices de la ressource en eau, mais aussi parce que, occupant une grande partie des terres, elle a une influence déterminante sur les composantes quantitatives et qualitatives de cette ressource naturelle. Il n'est donc pas étonnant que l'étude des relations entre agriculture et ressources en eau ait toujours été une des priorités de l'Inra. Cette priorité s'est exprimée au travers d'une grande diversité de démarches scientifiques, mais aussi d'une volonté d'intégration pluridisciplinaire pour mieux appréhender les fortes interactions existantes entre les différents processus du cycle de l'eau et répondre aux besoins d'une gestion intégrée de la ressource en eau. La gestion intégrée de la ressource en eau (GIRE) est « un processus promouvant la gestion de l'eau et des ressources associées (notamment le sol) de façon à maximiser le bien-être économique et social de manière équitable sans compromettre la durabilité des écosystèmes vitaux » (définition du Global Water Partnership suite au sommet de Rio, Unesco, 2009). Il s'agit d'une démarche nécessitant la prise en compte et l'implication de tous les usagers de la ressource au sein d'un territoire de gestion, généralement un bassin hydrographique. Il ne s'agit pas d'un concept ou d'une démarche scientifique, mais la connaissance scientifique y joue un rôle essentiel tant pour la description de l'état des ressources en quantité, qualité, disponibilité, pour l'analyse des impacts socio-économiques et écologiques des différents usages, que pour la conception de modes d'usage plus durables et mieux concertés entre les différents acteurs. Pour

l'agriculture, l'eau est à la fois une ressource (pour l'irrigation et l'alimentation animale), une contrainte (dans ses excès et ses déficits), et un milieu qu'elle impacte (modification des régimes hydrologiques et des conditions de transferts liée aux aménagements ruraux, pollution des écosystèmes aquatiques par les pesticides et les nutriments en excès, azote et phosphore notamment). À ce titre, l'agriculture est bien souvent au centre des problématiques de la GIRE.

Pendant longtemps, l'Inra a consacré la majorité de ses efforts sur les deux premiers aspects, contrainte et ressource, en étudiant notamment les composantes du bilan hydrique des cultures à l'échelle parcellaire (évapotranspiration, besoins en eau des plantes, rétention et transfert d'eau dans les sols), l'adaptation des plantes à la sécheresse, la gestion de l'irrigation et du drainage¹⁵⁵. Dans la période précédant leur fusion (décennies 1980-1990), les trois départements Agronomie, Bioclimatologie et Science du sol avaient toutefois déjà diversifié leurs recherches sur les enjeux liés à l'eau. En agronomie, le développement des modèles de culture a permis d'aborder les problématiques de pertes nitriques, de gestion de l'irrigation à l'échelle de la sole et de la rotation. En bioclimatologie, les approches supra-parcellaires sur l'influence des couverts sur le bilan en eau à l'échelle régionale se sont développées. En science du sol, les études locales ont largement intégré les transferts réactifs eau-solutés, tandis que s'est développée l'hydrologie des bassins versants agricoles, avec en particulier l'étude des transferts latéraux. À cet égard, un tournant important a été pris au début des années 1990 avec la décision de soutenir la mise en place d'observatoires hydrologiques, à savoir les bassins versants de Kervidy-Naizin en Bretagne, de Roujan en Languedoc. Toutefois, si des liens existaient entre les trois domaines disciplinaires (agronomie, bioclimatologie, science du sol), en particulier autour de la modélisation, l'intégration des travaux restait limitée.

Dans ce contexte, la création du département Environnement et Agronomie (EA) a favorisé une vision plus holiste, nécessaire au développement des bases cognitives de la gestion intégrée de l'eau. Cela a été perceptible au travers des orientations stratégiques successives du département et des avancées qui en ont résulté.

► Les orientations stratégiques

Sur la période de création du département EA (1996-1999), le thème de l'eau représente une part très importante des travaux menés (26 % des publications de type articles, ouvrages et thèses)¹⁵⁶. Parmi ces publications, les études sur l'eau et le sol (50 % des publications) et l'eau et la plante (25 % des publications) prédominent, principalement en référence aux problématiques de stress hydrique et d'irrigation. Sur cette époque, les publications sur la qualité de l'eau sont en nette progression, et celles sur la gestion restent très minoritaires (13 %). En définissant cinq fonctions de l'eau, « l'eau qui se déplace », « l'eau qui fixe un niveau de stress », « l'eau qui détermine l'ambiance bio-physico-chimique du milieu », « l'eau qui se

155. Meriaux S., 1979. *L'Inra, l'eau et la production agricole*, Inra, Paris et Versailles, 269 p.

156. Katerji N., Bruckler L., Debaeke P., Pavlides M., Bertrand N., Leiser H., 2001. Les recherches sur l'eau dans le département Environnement et Agronomie. État des lieux et perspectives. Rapport de synthèse, Inra, 66 p.

gère », « l'eau milieu de vie des organismes aquatiques », il apparaît que le département EA est le seul département Inra qui considère quatre fonctions parmi les cinq (les quatre premières), même si le lien entre ces fonctions est très rarement fait. Un des enjeux du nouveau département était donc de mieux aborder ces liens, mais aussi d'aller vers une approche plus systémique des relations eau-agriculture en considérant des échelles d'espace et de temps plus larges que celles abordées par la majorité des travaux.

Cela se traduit dès le premier schéma stratégique du département, qui insiste sur la double finalité de gestion durable de l'espace rural et d'atteinte d'objectifs de production agricole en optimisant l'usage des ressources. L'enjeu de l'étude des relations eau-agriculture est clairement identifié par le premier des sept objectifs finalisés du schéma stratégique, intitulé « Valorisation, gestion et protection des ressources en eau ». Cet enjeu intervient également, mais de manière implicite, dans les autres objectifs finalisés, notamment ceux relatifs aux interactions agriculture-atmosphère-climat, à l'aménagement durable de l'espace rural et à la conception de systèmes agricoles durables. Les trois schémas stratégiques qui suivent confirment ces orientations et y rajoutent progressivement des priorités impactant les recherches sur l'eau : l'évaluation des services écologiques et écosystémiques des milieux en relation avec l'activité agricole ; la mise en avant de l'échelle paysagère qui permet de croiser un certain nombre de fonctions qui doivent être régulées (dont la biodiversité) ; la prise en compte de l'échelle globale ; l'étude des changements sur les temps longs liés notamment au changement climatique ; le développement de la gestion intégrée des ressources en eau et sol. On observe ainsi un élargissement progressif des objectifs de recherche sur l'objet eau. Il concerne :

- les échelles spatiales et temporelles, afin de mieux resituer les relations eau-agriculture dans la perspective de long terme des changements globaux en cours et dans un contexte d'usages territoriaux multiples et en tension de la ressource en eau ;
- la diversité des compartiments de l'hydrosphère étudiés, afin d'avoir une vision plus systémique des interactions et échanges entre compartiments et d'aborder de manière plus intégrée l'ensemble du système nappe-sol-plante-atmosphère ;
- l'extension du domaine d'étude, depuis les espaces agricoles au sens strict vers des espaces mixtes associant ces derniers à des espaces naturels et urbanisés, pour inscrire l'étude de l'usage de l'eau agricole dans celle du cycle de l'eau général et de ses différents usages ;
- la prise en compte d'objectifs de gestion de l'eau, qui implique de définir les leviers de gestion non seulement en fonction de la connaissance des processus, mais aussi des contextes socio-économiques et des dynamiques d'acteurs.

Pour appuyer ces évolutions, le département EA a mené plusieurs types d'actions.

Une structuration renforcée du dispositif de recherche

Une action marquante aura certainement été de favoriser la création d'unités mixtes de recherche, regroupant des unités issues des trois départements initiaux d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol et/ou des équipes de recherche universitaires et d'autres instituts de recherche. Ces regroupements ont permis de constituer plusieurs unités, SAS à Rennes, CSE puis Emmah à Avignon, EGC puis EcoSys à Grignon, Lisah à Montpellier, AGIR à Toulouse (voir liste des

unités en annexe), qui allient un large panel de compétences pour l'étude systémique du cycle de l'eau en relation avec les activités agricoles et/ou l'aménagement de l'espace rural, et abordent l'étude d'une gamme variée d'hydrosystèmes. Ces unités ont été par la suite les acteurs principaux d'autres actions structurantes du département ayant eu un impact important en matière de recherches sur l'eau. La création d'unités pluridisciplinaires a été complétée en 2011 par la constitution d'un réseau Eau associant les unités citées, mais aussi celles qui mènent des travaux sur l'objet eau mais de manière plus implicite. En effet, l'eau intervient dans les mécanismes étudiés par de nombreuses unités du département EA, mais n'est pas toujours un objectif d'étude spécifique pour ces unités. Au total, ce sont près d'une centaine d'équivalents-temps plein chercheurs et ingénieurs qui sont mobilisés par la thématique de l'eau dans le département EA.

Un investissement fort dans l'observation à long terme

Au début des années 2000, le département a ainsi soutenu la transformation des sites d'étude hydrologique de Kervidy-Naizin et de Roujan en Observatoires de recherche en environnement, engagés dans l'acquisition de chroniques sur le long terme (encadré 12.1). Ces observatoires ont permis le changement d'échelle nécessaire pour appréhender d'une manière plus intégrée l'étude et la modélisation des facteurs d'évolution quantitative et qualitative des ressources en eau et en sol sous l'influence des changements d'usage des sols et du climat. Il est devenu possible en particulier d'analyser les temps de restauration de la qualité des eaux et l'efficacité de différentes mesures à cet effet. Les hydrosystèmes étudiés par l'Inra sont fortement influencés par l'activité agricole, ce qui fait leur spécificité au sein des infrastructures de recherche Ozcar (Observatoires de la zone critique applications et recherches) pour l'étude de la zone critique¹⁵⁷ sur le plan français, et Elter en préparation sur le plan européen (voir chapitre 8).

La modélisation intégrée des paysages et de leurs ressources

Le développement de modélisations intégrées des paysages cultivés, essentielles à plusieurs titres, a été encouragé et soutenu afin d'aider à l'analyse des données d'observation recueillies sur des milieux complexes comme les observatoires hydrologiques. Après calibration et validation *in situ*, ces modèles fournissent également un moyen d'étude et de conception de scénarios d'utilisation durable des ressources en eau et en sol et de simulation de l'évolution des milieux en réponse aux changements globaux en cours. Ils sont enfin un puissant vecteur de collaborations pluridisciplinaires, entre sciences biophysiques ou entre celles-ci et les sciences sociales. Les modèles développés visent une représentation élaborée et systémique de l'hétérogénéité du paysage et de ses entités (parcelles, sols, haies) et des processus de transfert pour l'analyse de l'impact des usages agricoles et des structures paysagères sur les flux d'éléments. Ainsi, plusieurs modèles représentent ou simulent les mosaïques paysagères en tenant compte des logiques et contraintes propres aux systèmes de production agricole, afin de fournir une vision cohérente et réaliste de la distribution des activités agricoles et des hétérogénéités paysagères en milieu rural. Les modèles TNT2, puis Nitroscape et

157. La zone critique désigne le lieu des interactions entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la pédosphère, la lithosphère et les écosystèmes.

Encadré 12.1. Les Observatoires agrohydrologiques de recherche en environnement

Les évolutions climatiques et agricoles ont des temporalités longues, et l'observation de trajectoires doit donc être réalisée sur plusieurs décennies, en particulier pour discriminer le rôle du climat de celui des activités humaines locales. L'Observatoire méditerranéen de l'environnement rural et de l'eau (Omere)* et l'Observatoire des temps de réponse des agrohydrosystèmes (AgrHys)** suivent des hydrologies et des agrosystèmes très contrastés. Ce sont des observatoires regroupant de petits bassins versants (de 0,4 à 5,0 km²) où une caractérisation physique détaillée du milieu (relief, géologie, sols) est menée conjointement à un suivi de variables clés du cycle hydrologique, du transfert de masse (nutriments, polluants organiques, érosif), des pratiques agricoles à la parcelle et de gestion des infrastructures paysagères (fossés, haies).

Omere regroupe deux bassins à écoulements intermittents, dominés par un ruissellement hortonien, marqués par une forte variabilité climatique intra et interannuelle, une large hétérogénéité des sols et des états de surface ainsi que des infrastructures. Le bassin de Roujan (1,0 km²), dans la plaine languedocienne, est fortement aménagé par un dense réseau de fossés, et principalement viticoles. Le bassin de Kamech (2,6 km²), dans le nord de la Tunisie, avec une retenue collinaire à son exutoire, est en polyculture et marqué par une trajectoire d'intensification de la production. Un tel contexte permet d'aborder les problématiques de la gestion quantitative des ressources, des pertes de sols par érosion hydrique, et de la dégradation de la qualité des sols et de l'eau, notamment par les pesticides. Les grands bassins dans lesquels les bassins de Roujon et Kamesh s'insèrent (La Peyne, 55 km², et le Lebna, 210 km² respectivement) sont également suivis de façon plus légère.

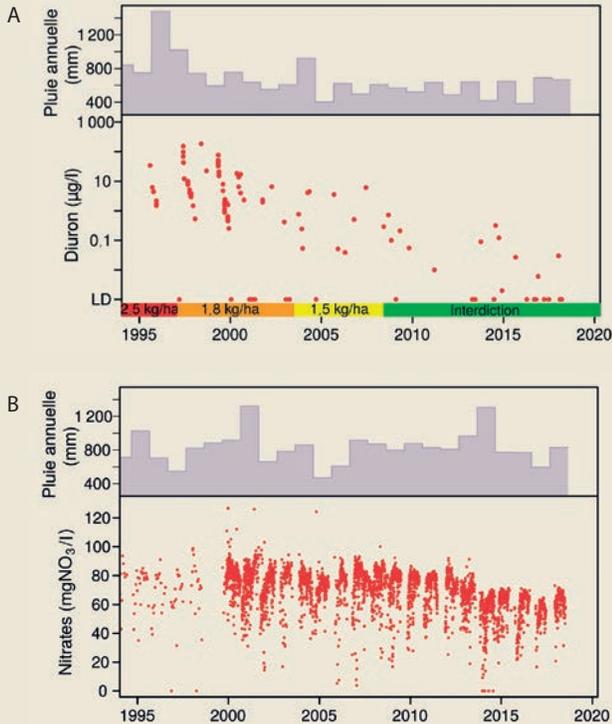


Figure 12.1. Évolution de la pluviométrie annuelle et de la concentration moyenne des eaux (A) en diuron, herbicide de prélevée, sur le bassin de Roujan, et (B) en nitrate sur le bassin de Kervidy-Naizin. En (A) le bandeau représente l'évolution des doses d'application maximales autorisées pour le diuron.

AgrHys, qui est situé en zone de polyculture-élevage, est constitué d'un réseau de bassins sur socle peu perméable dominés par des écoulements de nappe libre et superficielle. Il est caractérisé par une mosaïque de rotations céréales-prairies complexes et de prairies de longue durée, ainsi que par des apports de nutriments importants et divers (minéraux et organiques, végétaux et animaux). Ces spécificités font émerger des enjeux de dégradation de la qualité des eaux de surface (azote et phosphore), de l'air (émissions d'ammoniac) et des sols (teneur en matière organique).

La figure 12.1 montre les évolutions mesurées des concentrations en herbicide diuron à l'exutoire de Roujan (figure 12.1A) et en nitrate à l'exutoire de Kervidy-Naizin (figure 12.1B). On observe dans les deux cas un caractère très progressif de la diminution de concentration, suite, dans le cas du diuron, à son interdiction en 2008 (voir bandeau en bas de figure 12.1A), et dans le cas du nitrate à la baisse des quantités d'azote apportées et à plusieurs mesures limitant le lessivage des sols, comme la couverture des sols depuis le début des années 1990. Les deux situations illustrent l'inertie et l'extrême variabilité de la réponse des systèmes hydrologiques et, en conséquence, l'intérêt d'observations à long terme intégratives sur le plan spatial. Elles démontrent que la restauration de la qualité des ressources en eau est un processus lent dont l'efficacité ne peut être évaluée à court terme.

* Molénat J., Raclot D., Zitouna R., Andrieux P., Coulouma G. *et al.*, 2018. OMERE, a long-term observatory of soil and water resources, in interaction with agricultural and land management in mediterranean hilly catchments. *Vadose Zone Journal*, DOI: 10.2136/vzj2018.04.0086.

** Fovet O., Ruiz L., Gruau G., Akkal N., Aquilina L., Busnot S. *et al.*, 2018. AGRHYS: an observatory of response times in agro-hydro-systems. *Vadose Zone Journal*, DOI: 10.2136/vzj2018.04.0066.

Casimod'N¹⁵⁸ représentent les transferts, transformations et bilans d'azote dans les bassins versants agricoles et les exploitations qui y opèrent. Le modèle Mhydaspesticide simule le devenir des pesticides en bassin versant en fonction des décisions d'opérations techniques en systèmes de production viticole. Le modèle intégré multi-agent Maelia (décrit dans le chapitre 10) permet de représenter finement les interactions entre activités agricoles, hydrologie et modes de gestion des ressources en eau au sein des bassins versants de grande taille.

Une ouverture prononcée vers les méthodologies de gestion de l'eau en liaison avec leurs utilisateurs

L'élaboration de méthodologies de gestion de la ressource en eau est une activité de recherche qui a été progressivement encouragée et développée au sein du département, en synergie avec celle, plus classique à l'Inra, relative à l'élaboration de méthodologies de gestion agronomique. Cela a été réalisé en nouant de nouvelles collaborations avec des utilisateurs de la recherche hors du domaine d'application strictement agronomique. Plusieurs partenariats importants ont vu le jour, tant sur le plan national (ex. : Agence française de la biodiversité, UMT Eau) qu'international (zone méditerranéenne et Inde notamment). Les travaux réalisés offrent un panel cohérent de méthodes à différentes échelles spatiales et associent de

158. Nitroscape : Duret S., Drouet J.-L., Durand P., Hutchings N.J., Theobald M.R., Salmon-Monviola J. *et al.*, 2011. NitroScape: A model to integrate nitrogen transfers and transformations in rural landscapes. *Environmental Pollution*, 159 (11), 3162-3170. Casimod'N : Moreau P., Ruiz L., Vertès F., Baratte C., Delaby L., Faverdin P. *et al.*, 2013. CASIMOD'N: An agro-hydrological distributed model of catchment-scale nitrogen dynamics integrating farming system decisions. *Agricultural Systems*, 118, 41-51. TNT2 : Beaujouan V., Durand P., Ruiz L., Arousseau P., Cotteret G., 2002. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology-denitrification relationship. *Hydrological Processes*, 16, 493-507.

manière originale hydrologues, agronomes et sciences sociales dans des démarches de gestion intégrative. Ces méthodes permettent d'objectiver les enjeux à différents horizons temporels et de faciliter ainsi la recherche de compromis et/ou d'instruments de politique publique dans une optique de durabilité. Notons enfin que les connaissances et outils développés ont été mobilisés dans le cadre de nombreuses expertises scientifiques collectives réalisées par l'Inra, avec différents partenaires, en réponse aux demandes ministérielles (expertises sur les pesticides, l'élevage et l'azote, l'impact cumulé des retenues, l'eutrophisation, voir chapitre 4).

► La gestion quantitative de l'eau

Pendant longtemps, la politique de l'eau en France et dans de nombreux pays a consisté en une politique de développement de l'offre, en particulier dans le domaine agricole avec une augmentation des surfaces irriguées. Les travaux de recherche à l'Inra ont ainsi d'abord visé la maximisation de la productivité agricole dans le contexte d'une offre en eau peu ou non limitante. Cela a de fait contribué à une augmentation générale des prélèvements (surfaces irriguées multipliées par cinq entre 1970 et 1997) et à la situation actuelle de tension entre les différents usages de la ressource en eau, renforcée par les perspectives de changement climatique dénoncées par le GIEC dès les années 1990. Lors de la création du département EA prévalaient donc déjà la problématique du besoin d'arbitrage entre usages agricoles et non agricoles et celle de la prise en compte de situations hydriques limitantes. Cela a conduit non seulement à faire évoluer les problématiques traditionnelles sur la gestion de l'eau verte, mais aussi à aborder de nouvelles problématiques en lien avec l'impact de l'agriculture et de la gestion des paysages ruraux sur la genèse de la ressource en eau ou avec la gestion territoriale des ressources en eau.

Historiquement, la gestion de l'eau verte, c'est-à-dire l'eau du sol utilisée par les couverts végétaux, est un sujet de recherche important des unités du département EA. Il s'agit de rechercher des solutions d'optimisation de la consommation de l'eau par les plantes cultivées et de gestion de risque de déficit hydrique du sol au regard du besoin en eau de la culture. La structure du système racinaire, l'interface sol-racine et les propriétés hydrauliques des racines ont fait l'objet de nombreux travaux, car il s'agit d'éléments clés de la capacité de la plante à exploiter au mieux

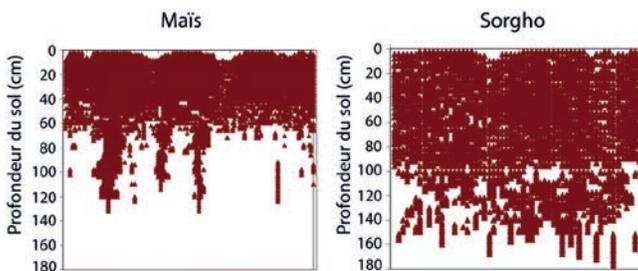


Figure 12.2. Cartes des systèmes racinaires d'un sorgho (à gauche) et d'un maïs (à droite) en situation de déficit hydrique sévère. La différence de colonisation racinaire, plus homogène pour le sorgho, se traduit par une capacité supérieure d'utilisation de l'eau du sol par ce dernier.
D'après Doussan C., Srayeuddin I., 2012. Drought and water stress of crops: a look at the soil-root system interplay. In: 4th International Congress EuroSoil 2012, Bari, Italie, 2-6 juillet.

l'eau du sol. On a pu constater par exemple que même des plantes à forte densité d'enracinement n'exploitaient que partiellement l'eau du sol du fait de zones peu colonisées par les racines dans l'inter-rang (figure 12.2). En conséquence, les chercheurs ont identifié des traits racinaires (ex. : conductance axiale, géotropisme, ramification du système racinaire) favorisant l'efficacité du prélèvement racinaire, traits pouvant être recherchés dans le cadre de l'amélioration variétale. De nombreux progrès ont également été accomplis dans le suivi de la végétation par télédétection en tirant profit de la multiplicité des satellites et des longueurs d'onde (infrarouge thermique, solaire, radar) et du développement des couplages de l'information satellitaire avec les modèles de culture. On peut à présent mieux estimer les propriétés hydrologiques des sols (profondeur, réserve utile) par inversion des modèles de cultures ou spatialiser l'évapotranspiration journalière sur de vastes territoires et de grandes périodes grâce à des outils tels qu'Evaspa (Evapotranspiration Assessment from Space), développés par l'unité Emmah pour affiner l'estimation des besoins en eau des cultures.

La mise en place du département EA a permis d'asseoir les recherches sur le contrôle des processus hydrologiques de genèse de la ressource en eau bleue, c'est-à-dire l'eau sous forme liquide (eau ruisselante, rechargeant les nappes, alimentant les rivières et les lacs, etc.). Les recherches menées occupent une place originale en hydrologie dans le paysage scientifique national et international en s'intéressant au cas des bassins versants ruraux cultivés et aménagés. Ceux-ci présentent une hétérogénéité spatiale et temporelle forte liée à la variabilité intrinsèque de leurs propriétés naturelles (sol, relief, climat), mais aussi aux importants forçages anthropiques subis (activités agricoles, infrastructures paysagères hydro-agricoles comme les fossés, haies, chemins). Ces derniers influencent le fonctionnement hydrologique des bassins et peuvent servir de leviers pour la gestion de l'eau. Avant cela, il faut toutefois comprendre leurs effets exacts sur les processus hydrologiques élémentaires (ruissellement, infiltration, évaporation, recharge et dynamiques de nappe) et sur la réponse hydrologique globale des bassins. Les observatoires mis en place ont permis d'accroître très significativement les connaissances à ce sujet, et notamment sur la question de l'influence des haies et des fossés agricoles. Ainsi, sur l'Observatoire Omere, il a été observé que l'infiltration de l'eau d'écoulement de crue dans un réseau de fossés pouvait être ponctuellement à l'origine de plus de 50 % de la recharge de la nappe, alors que le réseau de fossés n'occupe que 1 % de la surface totale du bassin. Les réseaux de fossés, outre leur rôle recherché d'évacuateur de crues, peuvent donc avoir un impact fort sur les dynamiques de nappe et leur contamination.

Enfin, a progressivement émergé au sein du département EA une recherche sur la gestion quantitative territorialisée de l'eau dans l'espace agricole. Associant des chercheurs, des gestionnaires de l'eau, des agriculteurs, des associations environnementalistes et d'autres acteurs économiques, ces recherches sont qualifiées de participatives. Elles intègrent des analyses prospectives quant à l'évolution des territoires et des usages du sol et de l'eau. Mises en œuvre par les unités du département sur divers territoires en France et à l'étranger (Maghreb et Inde notamment), elles développent des démarches et méthodologies pour la GIRE. On en citera deux exemples. L'un correspond au cas de la plaine de la Crau, à proximité d'Arles, dont l'aquifère est sous l'influence directe de l'irrigation des prairies de l'Appellation d'origine contrôlée Foin de Crau et dont l'évolution future constitue

une préoccupation pour les acteurs locaux. Le développement d'une modélisation intégrée et spatialisée du système nappe-sol-culture par l'unité Emma a permis d'évaluer plusieurs scénarios d'évolution territoriale relatifs au changement climatique, à des restrictions d'usage de l'eau agricole et à l'urbanisation. Il en ressort que l'urbanisation et l'allocation de l'eau à d'autres usages que l'irrigation sont des causes d'évolution de la ressource en eau souterraine au moins aussi importantes que le changement climatique. Pour la GIRE, cet exemple montre bien qu'il est essentiel de prendre en compte l'ensemble des facteurs d'évolution pour l'élaboration de mesures d'adaptation.

Le second exemple concerne le bassin aval de l'Aveyron, soumis à des tensions fortes entre usagers de l'eau. Il pose la question des démarches d'accompagnement des parties prenantes locales pour l'élaboration de scénarios de changement de la gestion de l'eau : diminution des surfaces irriguées en amont du bassin ; introduction de rotations culturales ; mise en place de retenues de substitution collectives et effacement des petites retenues ; pilotage de l'irrigation avec un outil d'aide à la décision. Les impacts des scénarios ont donc été simulés grâce au modèle Maelia, et la mobilisation d'un outil d'évaluation multi-acteurs a permis d'identifier les scénarios les plus appréciés par les parties prenantes (introduction de rotations culturales) ou propices au consensus (scénario de pilotage de l'irrigation avec des outils d'aide à la décision), mais aussi de réfléchir avec les acteurs aux pistes pour lever les blocages vis-à-vis des autres scénarios (ex. : conditionner la création de réservoirs à l'engagement des agriculteurs dans des démarches agro-écologiques) ou d'affiner le contenu des scénarios souhaitables (ex. : intégrer des luzernes dans les rotations).

► La gestion qualitative de l'eau dans les contextes de pollution forte des eaux

En matière de qualité de l'eau, la préoccupation des pouvoirs publics et des gestionnaires de l'eau dans les territoires agricoles a porté dès les années 1980 sur la contamination des eaux par le phosphore et le nitrate, puis dans les années 1990 sur celle par les pesticides. Cela a motivé les chercheurs de Rennes, Grignon et Laon notamment pour étudier la pollution phospho-nitrique des eaux induite par une augmentation de la fertilisation minérale, par l'absence de couverture des sols en automne, en grandes cultures, ou par les lisiers organiques dans les régions de polyculture-élevage, en particulier dans l'ouest de la France. Cela a aussi amené les équipes de Montpellier dans le cas des cultures pérennes, de Grignon pour les grandes cultures, et de Guadeloupe pour les cultures intensives tropicales, à aborder les mécanismes de pollution des eaux et des sols par les pesticides.

Évaluer et limiter les risques de contamination a été un premier objectif. Les travaux se sont d'abord appuyés sur les études locales traditionnellement menées à l'Inra, aux échelles parcellaires et infraparcellaires, sur les cycles biogéochimiques dans les sols, et sur le lien entre pratiques agricoles et cycles des éléments. Différentes pratiques agronomiques telles que la gestion des couverts efficaces en interculture, dans les systèmes de cultures annuelles, ou les pratiques d'entretien du sol en cultures pérennes, avec l'utilisation de l'enherbement en vigne, ont été évaluées pour réduire les risques de transfert de pesticides et d'érosion. Une



Figure 12.3. Zones humides dans un paysage agricole de l'ouest de la France : un rôle épurateur essentiel (© C. Walter).

expertise collective¹⁵⁹ menée en 2012, à laquelle ont participé de nombreux chercheurs du département EA, a conclu sur l'intérêt de couverts implantés en interculture longue, qui réduisent de 50 à 75 % les fuites nitriques par lixiviation. Dans le cas des pesticides, l'efficacité de l'enherbement d'inter-rang en vignoble a également été montrée avec des réductions de fuites pouvant atteindre un facteur 10. Puis les travaux ont abordé l'échelle du bassin versant et de territoires plus larges afin d'étudier si les compartiments non agricoles des paysages (bords de champs, aménagements hydro-agricoles) pouvaient également contribuer à limiter le transfert des contaminants. Il a été montré en particulier le rôle tampon très significatif que pouvaient avoir les bandes enherbées et les fossés agricoles sur la contamination des eaux par les pesticides. Il s'agit donc de leviers potentiels de réduction des pollutions si leur dimensionnement et leur entretien sont adaptés pour favoriser leur capacité de rétention et de dégradation des molécules. Les zones humides ripariennes de fonds de vallée en Bretagne ont aussi démontré leur capacité d'interception des flux nitriques, à la fois par dénitrification et par prélèvement racinaire, capacité très variable selon les sites mais dont la moyenne se situe à 30 % environ (figure 12.3).

Quantifier et comprendre les évolutions de la qualité de l'eau dans les bassins versants en réponse à des modifications de l'occupation du sol et des pratiques agricoles correspond à un second objectif. Il a été particulièrement motivé par le besoin d'identifier des politiques de reconquête de la qualité de l'eau dans les régions fortement impactées et d'évaluer le temps nécessaire pour constater leur efficacité. Ainsi, les équipes du département EA ont mis en évidence l'importante

159. Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C. *et al.*, 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Rapport d'étude, Inra, 418 p.

inertie biogéochimique et hydrologique des milieux contaminés vis-à-vis du transfert d'azote et de pesticides. En conséquence, en Bretagne, les effets des mesures réglementaires ou incitatives engagées sur la réduction des pertes nitriques sont fortement limités et retardés par les stocks azotés accumulés dans les nappes (sous forme nitrique) et les sols (sous forme organique plus ou moins stable) : il a fallu dix ans pour que la baisse des surplus azotés agricoles des années 1990 se traduise en une diminution des concentrations en nitrate dans les rivières. Les simulations avec le modèle TNT2 estiment à plus de vingt ans le temps nécessaire pour que la chimie des eaux de rivière s'équilibre avec le bilan azoté à la surface du sol. Ces résultats ont été utilisés par les pouvoirs publics pour fixer les objectifs de réduction des pertes nitriques dans le cadre des programmes de lutte contre le phénomène des marées vertes. Pour les pesticides, le cas le plus emblématique est certainement celui engendré par l'usage, aux Antilles françaises dans les années 1970 à 1990, d'un insecticide organochloré extrêmement persistant, le chlordécone. L'étude de son devenir dans l'environnement¹⁶⁰ a conduit à estimer à plusieurs siècles le temps de décontamination de certains sols de bananeraies, dont le lessivage par les eaux de pluie conduit à une contamination chronique des eaux souterraines et de surface.

Proposer des méthodes pour outiller, à l'échelle territoriale, la transition des pratiques agricoles vers des pratiques moins polluantes en impliquant la diversité des acteurs concernés a été un troisième objectif. Il s'est particulièrement imposé dans le cadre de la problématique posée par les 500 captages en eau potable (aires d'alimentation de captages, AAC), identifiés parmi les plus menacés par des pollutions diffuses d'origine agricole dans le cadre du Grenelle de l'environnement en 2007. Des outils de diagnostic, de conception participative de scénarios d'évolution agricole et d'accompagnement des transitions ont ainsi été développés. La plupart de ces outils ont bénéficié du soutien de l'Agence française pour la biodiversité, qui intervient en appui des politiques publiques sur l'eau. On citera deux outils en particulier. La méthode Co-click'eau de conception participative de scénarios d'évolution de l'agriculture dans les AAC, qui implique l'ensemble des acteurs de l'AAC, a été proposée pour orienter les changements de pratiques agricoles à mettre en œuvre en vue d'atteindre les cibles jugées intéressantes : à ce jour, plus de 220 animateurs d'AAC ont été formés à cette méthode. La méthode Transit'eau, qui vise la transformation des pratiques agricoles en continu, en s'appuyant sur un tableau de bord (liant pratiques, processus et effets) coconstruit avec les acteurs locaux et sur une surveillance des pratiques, est en cours de déploiement dans une vingtaine d'AAC.

► Conclusion

Vingt ans après la création du département EA, ce bilan synthétise des éléments marquants des recherches menées en réponse aux enjeux de gestion de l'eau. On y observe des points d'évolution importante des orientations de recherche, mais aussi de nombreux résultats qui contribuent à alimenter sur les plans cognitif et méthodologique une vision plus intégrée de la gestion de l'eau dans ses dimensions

160. Cabidoche Y.-M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long term pollution by chlordécone of tropical volcanic soils in the French West Indies: a simple leaching model accounts for current residue contents. *Environmental Pollution*, 157, 1697-1705.

pluridisciplinaire, territoriale et temporelle. Pour autant, il reste du chemin à parcourir. Plusieurs enjeux futurs nous semblent essentiels.

Le premier est sans doute de sortir d'une vision mono-élémentaire des cycles biogéochimiques et de leurs impacts sur l'évolution de la qualité de l'eau. L'étude de l'ensemble des interactions entre cycles doit être développée à l'échelle des paysages et de leurs hydrosystèmes¹⁶¹. C'est un besoin pour les cycles de l'azote, du carbone et du phosphore qui sont étroitement liés, mais aussi pour mieux appréhender les interactions entre les contaminants inorganiques et organiques.

La compréhension et l'évaluation des relations causales entre pratiques agronomiques et paysagères, pollutions des eaux et impacts écotoxicologiques, sont des champs d'investigations encore faiblement abordés. Les phénomènes d'eutrophisation par des émissions de nutriments et les effets écotoxicologiques avérés des pesticides sur les espèces des milieux aquatiques sont des manifestations évidentes de ces relations.

La gestion intégrée de l'eau doit être envisagée dans le cadre de projets territoriaux durables aux enjeux multiples (productifs, sociaux, environnementaux...). Elle ne peut donc être séparée des autres enjeux de la gestion territoriale, par exemple ceux relatifs au sol et à l'air, ni conçue sans une implication forte de l'ensemble des porteurs d'enjeux. Elle appelle donc non seulement le développement d'approches s'attendant à décrire les flux et les interactions entre tous les compartiments d'un territoire, mais aussi la collaboration des sciences biotechniques avec les sciences sociales pour prendre en compte les caractéristiques des systèmes sociotechniques, souvent déterminantes dans les obstacles ou les leviers du changement.

Enfin, on ne saurait terminer ce chapitre relatif aux recherches sur l'eau dans le département EA sans évoquer la fusion en cours de l'Inra et d'Irstea. La complémentarité des compétences disponibles et des domaines disciplinaires qu'il convient de mobiliser pour répondre aux enjeux mentionnés est forte et riche entre les deux organismes. Le département EA trouvera sans nul doute dans le nouvel organisme un cadre de collaboration plus riche et donc des opportunités plus fortes pour ses ambitions en matière de recherche sur l'eau.

Pour en savoir plus

Biarnès A., Andrieux P., Barbier J.M., Bonnefoy A., Compagnone C., Delpuech X. *et al.*, 2017. Évaluer par modélisation des stratégies de réduction des usages d'herbicides dans les bassins-versants viticoles. *Innovations agronomiques*, 57, 1-11.

Bruckler L., Lafolie F., Doussan C., Bussièrès F., 2004. Modeling soil-root water transport with non-uniform water supply and heterogeneous root distribution. *Plant and Soil*, 260, 205-224.

Chantre E., Guichard L., Ballot R., Jacquet F., Jeuffroy M.-H., Prigent C., Barzman M., 2016. Co-click'eau, a participatory method for land-use scenarios in water catchments. *Land Use Policy*, 59, 260-271.

Durand P., Moreau P., Salmon-Monviola J., Ruiz L., Vertes F., Gascuel-Oudou C., 2015. Modelling the interplay between nitrogen cycling processes and mitigation options in farming catchments. *Journal of Agricultural Science*, 153, 959-974.

Duret S., Drouet J.-L., Durand P., Hutchings N.J., Theobald M.R. *et al.*, 2011. NitroScape: a model to integrate nitrogen transfers and transformations in rural landscapes. *Environmental Pollution*, 159, 3162-3170.

Murgue C., Therond O., Leenhardt D., 2015. Towards sustainable water and agricultural land management: participatory design of spatial distributions of cropping systems in a water-deficit basin. *Land Use Policy*, 45, 52-63.

161. Dorioz J.M., Grimaldi C., 2014. Cycles et flux dans les paysages hétérogènes. Rapport adressé aux départements EA et EFPA, Inra, 73 p.

Bouclage des cycles : des approches renouvelées et plus englobantes des cycles biogéochimiques

Pierre Cellier, Sylvain Pellerin, Sylvie Recous, Françoise Vertès

Les éléments majeurs tels que l'azote, le phosphore, le potassium et le soufre sont indispensables à la vie car ils sont, avec le carbone, l'oxygène et l'hydrogène, constitutifs de tout être vivant (ex. : ADN, protéines, enzymes). Ce sont en conséquence des éléments minéraux essentiels et des facteurs limitants de la vie et de la production végétale et animale sous toutes leurs formes, depuis les organismes microbiens jusqu'aux organismes les plus évolués et les plus complexes. L'un des fondements de l'agriculture a été, de tout temps, d'apporter ces éléments sous une forme facilement accessible pour la plante, notamment en incluant des légumineuses dans les rotations (pures ou en mélange), par l'association d'espèces au sein du couvert végétal (processus de facilitation entre espèces), par l'association entre cultures et élevage (apports de nutriments par le recyclage des effluents d'élevage) ou sous forme d'apports externes au système de production agricole (issus d'exploitation minière, d'engrais industriels ou de produits organiques d'origine non agricole) ou internes (brûlis et recyclage *via* les cendres). Ces éléments ne sont pas indépendants entre eux, la composition des matières organiques respecte des rapports stœchiométriques¹⁶² qui peuvent être différents selon les organismes vivants. Les apports d'éléments fertilisants doivent donc respecter, dans la mesure du possible, certains rapports.

Après la seconde guerre mondiale, la demande alimentaire a généré une forte augmentation de la production agricole, et l'intensification de la production

162. Un rapport stœchiométrique représente les proportions dans lesquelles les éléments chimiques sont impliqués dans la composition d'un composé ou d'un être vivant.

végétale qui l'a accompagnée a démultiplié l'utilisation de ces apports. Pour l'azote, la découverte du procédé Haber-Bosch pour produire de l'ammoniac dans les années 1910 a été à l'origine d'une véritable révolution dans la production agricole, et même dans la société en général. Pour le phosphore et le potassium, c'est l'exploitation minière qui, en se développant largement depuis le début du xx^e siècle, a fourni les ressources nécessaires. Le soufre a longtemps été non limitant en raison des apports atmosphériques liés aux sources de pollution de l'industrie, de l'énergie et des transports, mais le devient aujourd'hui dans certaines situations, en raison de la maîtrise de ces sources qui a commencé dans les années 1970-1980 et des fortes exportations de soufre par les produits récoltés.

Les cycles de l'azote, du phosphore et du soufre ont donc été profondément modifiés par les interventions humaines de l'échelle de la parcelle agricole à l'échelle mondiale. La contrepartie de la forte utilisation d'intrants est que nous sommes passés, en un siècle, d'une situation de limitation de la production agricole par ces éléments majeurs à une situation d'apports dépassant souvent les besoins des cultures. Ces excédents sont particulièrement sensibles dans les régions d'élevage, où les apports d'éléments fertilisants par les effluents organiques épandus n'ont souvent pas été pris en compte pendant plusieurs décennies. Ceci a eu pour conséquences des pertes croissantes d'azote et de phosphore dans l'environnement, soit vers les eaux pour des formes solubles et/ou mobiles (nitrate, formes organiques dissoutes, phosphates accumulés dans les sols et entraînés par ruissellement

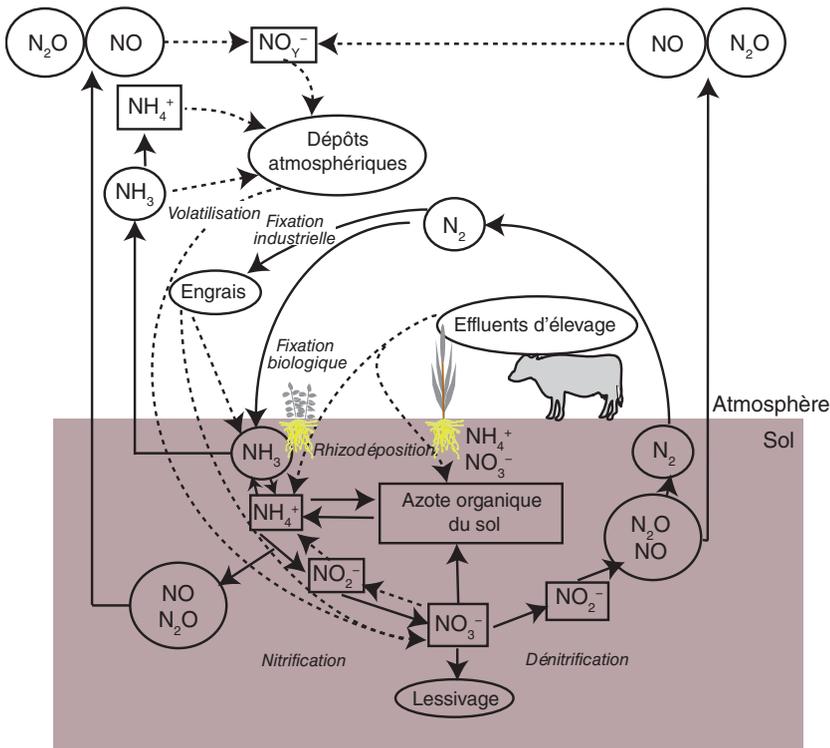


Figure 13.1. Cycle de l'azote au sein d'une culture pouvant inclure des légumineuses (fixation symbiotique) et fuites d'azote réactif vers l'environnement (flèches en pointillés : apports d'azote à l'agrosystème).

et érosion ; il n'y a pas de problème lié au potassium pour la qualité des eaux), soit vers l'atmosphère pour les formes gazeuses (ammoniac, oxydes d'azote, protoxyde d'azote) (voir figure 13.1 pour l'azote). Ces pertes ont généré des impacts environnementaux majeurs dès les années 1970 avec la contamination des nappes et des eaux de surface, puis des eaux côtières, largement liée aux pertes de nitrate et de phosphate depuis les sols agricoles. C'est à la même période qu'est apparu le phénomène des pluies acides pour lequel la responsabilité de l'agriculture, par le biais des émissions d'ammoniac, a été pointée, tout comme plus tard la contribution des émissions de protoxyde d'azote (GES majoritairement émis par les sols agricoles) au changement climatique. Ces impacts ont donné lieu à des manifestations visibles, telles que les marées vertes en Bretagne ou le dépérissement forestier dans l'est de la France et plus généralement de l'Europe. La société civile et les pouvoirs publics se sont mobilisés pour tenter de remédier à ces problèmes.

Ces impacts, les interpellations de la société et les engagements nationaux réglementaires de diminuer ces émissions ont amené à s'interroger depuis les années 1970-1980 sur la manière de mieux maîtriser ces pertes dans la chaîne allant des productions végétales jusqu'aux productions animales. Le rapport Poly en 1978, intitulé « Pour une agriculture plus économe et plus autonome », et le rapport Hénin en 1980, intitulé « Activités agricoles et qualité des eaux », ont impulsé de nouvelles visions des besoins de recherche, notamment dans le domaine des cycles biogéochimiques, avec une importance renforcée des questions environnementales, qui ont conduit à la création du Corpen¹⁶³, à laquelle les chercheurs du département EA ont largement contribué aux côtés des professionnels de l'agriculture et des acteurs de la décision publique.

La convergence de ces interrogations a poussé, dès la fin des années 1980, l'Inra à s'investir davantage dans l'étude des liens entre les cycles biogéochimiques, la production végétale et l'élevage, par le biais de la fertilisation des cultures et des prairies. Cela a conduit dans un premier temps à élaborer, sur une base scientifique, des méthodes de raisonnement de la fertilisation permettant d'adapter les apports aux objectifs de rendement, tout en diminuant les risques de pertes vers l'environnement. Dans un deuxième temps, on s'est attaché à étudier directement les pertes et leur devenir afin de mieux évaluer et maîtriser l'ensemble des impacts sur l'environnement, le climat et la santé. Sur la base d'un point de départ principalement agronomique, les concepts et méthodes se sont enrichis à partir des autres disciplines (ex. : science du sol, microbiologie, biogéochimie, bioclimatologie), de nouvelles approches en agronomie et d'un élargissement des échelles d'appréhension des cycles, dans la perspective générale de mieux s'ajuster aux besoins des cultures et de mieux évaluer et maîtriser les risques.

► La gestion de la fertilisation et l'analyse des cycles à l'échelle de la parcelle

Depuis la seconde guerre mondiale, l'utilisation d'engrais d'origine minérale, pilier de la modernisation agricole, a conditionné la forte augmentation des rendements agricoles et l'intensification de l'élevage. Néanmoins la fertilisation, minérale

163. Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/084000312.pdf>.

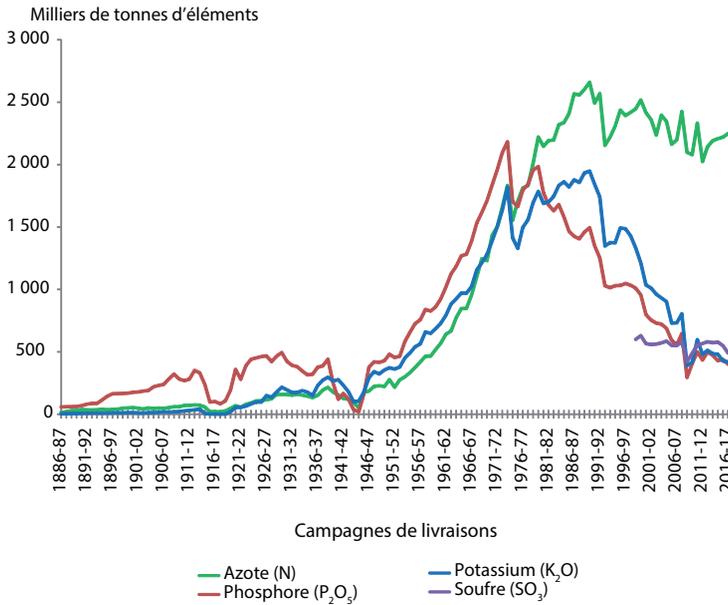


Figure 13.2. Évolution des livraisons d'engrais en France métropolitaine depuis la fin du XIX^e siècle (en kt d'éléments fertilisants ; d'après l'Union des industries de la fertilisation, Unifa).

ou organique, pèse sur l'économie des exploitations et est à l'origine d'impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement, le climat et la santé. Ces deux inconvénients ont tendu à réduire l'usage des engrais minéraux : l'évolution française de la consommation d'engrais indique une baisse importante et continue de la consommation de phosphore et de potassium depuis le début des années 1970, ainsi qu'une baisse, nettement moins marquée, de la consommation d'engrais azotés depuis la fin des années 1980 (figure 13.2).

Une thématique historique de l'Inra, menée largement en partenariat

Une très large part des recherches qui ont contribué à l'évolution des pratiques de fertilisation a été conduite au sein des départements Agronomie et Science du sol, fusionnés en 1998 dans le département Environnement et Agronomie (EA). Concernant la fertilisation azotée, depuis sa création et principalement dans le département Agronomie, l'Inra porte des recherches d'une part sur la dynamique de l'azote dans le sol et dans la plante, et d'autre part sur l'analyse de l'élaboration du rendement et de la qualité des produits, et donc sur les besoins en azote de la culture. Ces recherches ont contribué à l'évolution des pratiques de fertilisation azotée. Dès 1959, la méthode du bilan azoté est proposée par la station agronomique de l'Aisne (Jean Hébert), en collaboration avec l'Inra. Reprise et enrichie au cours de plusieurs décennies, cette méthode est encore aujourd'hui la méthode de référence pour raisonner la fertilisation azotée (méthode Comifer¹⁶⁴), même si elle n'est pas la seule (encadré 13.1).

164. Comité français d'étude et développement de la fertilisation raisonnée, <http://www.comifer.asso.fr/>.

Encadré 13.1. La méthode du bilan

La « méthode du bilan » proposée en France au début des années 1970 vise à calculer la quantité totale d'azote (N) à appliquer à une culture pour atteindre un rendement donné (Hébert, 1969)*. Cette méthode est basée sur un bilan complet d'azote minéral du sol en tenant compte de la profondeur de la zone d'enracinement de la culture et de l'ensemble du cycle de croissance de cette culture. Une équation exprime que la variation de l'azote minéral du sol entre les dates d'ouverture et de clôture du calcul du bilan est égale à la différence entre les entrées et les sorties de N du système sol-plante-atmosphère. Ce bilan est additif.

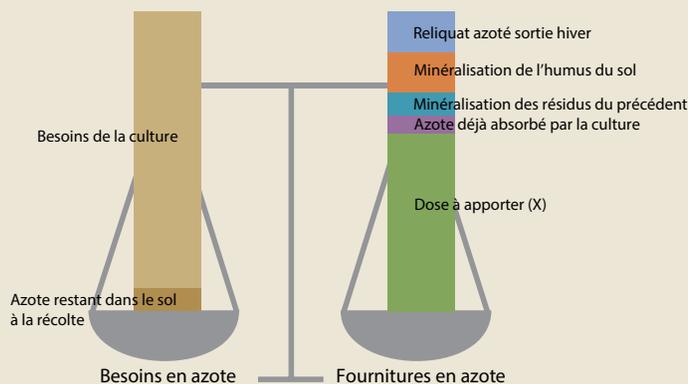


Figure 13.3. Schématisation du bilan azoté des cultures.

Référence : Calcul de la fertilisation azotée – Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies, Comifer, Groupe Azote, mai 2013, <http://www.comifer.asso.fr/index.php/fr/publications/les-brochures-du-comifer.html>. Source = N'Edu, <https://editions.educagri.fr/num/NEDU/N3-bilan-azote/co/4-CG1.html>.

La date d'ouverture du bilan se situe généralement à la fin de l'hiver pour les cultures d'hiver et au moment des semis pour les cultures de printemps. La date limite se situe généralement au moment où l'absorption d'azote par la culture s'arrête, par exemple à la récolte pour les betteraves sucrières et les légumes de plein champ ou avant la récolte pour le colza, les céréales et le maïs. Cette équation du bilan, largement utilisée en France sous différentes formes et dans différents outils pour la gestion de la fertilisation, en raison de sa robustesse, a été évaluée dans un large éventail de conditions environnementales, a été enrichie au cours des décennies par de nombreuses références et est devenue la méthode de référence du Comifer (guide de la fertilisation) et pour les pouvoirs publics (Référentiels régionaux pour l'équilibre de la fertilisation azotée). Le Comifer est présenté dans le texte de ce chapitre.

* Hébert J., 1969. La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *Bull. techn. Inform. Min. Agric.*, 224, 755-766.

Les approches se sont affinées pour améliorer la prise en compte de certains postes et s'inscrire dans une vision dynamique de la nutrition azotée de la plante et des pertes vers l'environnement. Plusieurs unités de recherche en agronomie et science du sol ont ainsi lancé dans les années 1980 des travaux sur les pertes de nitrate et de phosphore, leurs transformations et leur transfert vers les eaux superficielles ou profondes à l'échelle de la parcelle et du bassin versant. Parallèlement, le calcul de bilans N, P, K (voire cuivre et zinc dans les zones d'élevage granivore intensif) au niveau des parcelles et des exploitations contribuait à affiner les diagnostics de risques d'excédent ou d'émissions.

Entre-temps, les recherches menées avec des méthodes isotopiques (^{15}N), provenant de la communauté scientifique des biogéochimistes, permettaient de tracer à court et long terme la dynamique de l'azote de l'engrais dans les différents compartiments de la plante et du sol, de la solution du sol et sous forme gazeuse. Les écophysologistes ont à cette même période établi le lien entre production et nutrition minérale en introduisant le concept de courbe de dilution (relation décroissante entre biomasse produite et teneur en N ou P au cours d'un cycle de croissance) afin de calculer des indices de nutrition N, P et K, largement utilisés en diagnostic pour prairies et cultures (voir p. 213). On a ainsi mieux compris d'une part les déterminants du recouvrement de l'azote par la culture et d'autre part les pertes. Grâce aux apports de la science du sol, de l'hydrologie de surface et de la bioclimatologie à partir des années 1990, il a été possible d'inclure et d'affiner certains postes de l'équation du bilan, en particulier les pertes vers les eaux (nitrate, azote organique dissous) et l'atmosphère (pertes d'ammoniac et de protoxyde d'azote) dans les systèmes de culture et d'élevage, mais aussi les apports nets de nutriments à partir des matières organiques exogènes (ex. : lisiers, fumiers, composts) et leur devenir.

Concernant le phosphore, dès les années 1960, des recherches conduites à l'Inra se sont focalisées sur les méthodes de caractérisation de la biodisponibilité du phosphore dans les sols et sur l'élaboration de référentiels associés. Principalement conduits en collaboration avec des laboratoires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), avec notamment une contribution forte de Jean-Claude Fardeau sur les travaux concernant la compréhension de l'absorption du phosphore, notamment par des méthodes isotopiques (^{32}P), ont amené ultérieurement à relativiser l'interprétation des analyses de terre par extraction chimique. Pour conduire ces travaux, l'Inra a mis en place de nombreux essais de fertilisation de longue durée qui ont été par la suite relayés par des partenaires agricoles et industriels.

Une large palette de sorties opérationnelles

L'agrégation des connaissances, réalisée avec divers partenaires du développement, a permis de les incorporer dans des outils techniques pour contribuer à l'évolution des pratiques de fertilisation. Mais cela a aussi été largement favorisé par la participation active de l'Inra à l'animation des instances de coordination des recherches sur la fertilisation (Comifer, RMT Fertilisation et environnement). Au-delà de propositions sur la prise en compte d'exigence des espèces, sur la légitimation de l'impasse sur certains apports, sur l'abandon de la notion de fumure de correction pour P et K, sur le retardement des premiers apports d'azote, les travaux réalisés dans le département à la charnière des années 1990 et 2000 ont conduit à la production de plusieurs outils d'aide à la décision :

- le logiciel RégiFert[®], pour l'interprétation des analyses de terre des exploitations agricoles. La grille Comifer, élaborée en partenariat, constitue une version simplifiée de RégiFert[®], destinée aux conseillers agricoles de proximité ;
- des outils de raisonnement fondés sur le bilan azoté prévisionnel : d'Azobil[®] (1990), méthode statique (pour 26 cultures), vers AzoFert[®] (2003), approche dynamique (pour une soixantaine de cultures) utilisée notamment par des laboratoires d'analyse des sols (encadré 13.2) ;
- des outils de pilotage au cours du cycle végétatif, qui permettent d'ajuster la stratégie de fertilisation azotée selon les conditions climatiques et leurs incidences

sur la croissance des plantes et la disponibilité du sol (Jubil[®], 1993 ; témoins « double densité », 2001¹⁶⁵). D'autres méthodes ont fait le choix de tolérer des carences temporaires sur céréales, non préjudiciables pour le rendement et la teneur en protéines, à partir d'un suivi régulier de l'état azoté de la culture en s'appuyant sur une mesure indirecte de l'indice de nutrition azotée (Appi'N)¹⁶⁶. Cette dernière approche est en rupture avec la méthode du bilan d'azote, en s'affranchissant de l'estimation d'un objectif de rendement et du reliquat d'azote minéral à l'ouverture du bilan ;

– des outils visant à quantifier des émissions d'azote vers les aquifères et l'atmosphère en fonction des systèmes de cultures et des conditions pédoclimatiques locales (Syst'N[®], encadré 13.3) ou pour des évaluations à plus larges échelles (cartographies d'émission d'ammoniac à l'échelle nationale¹⁶⁷).

Enfin, des recherches du département EA, mobilisant des données satellitaires pour estimer la croissance et l'état nutritionnel azoté des cultures, ont contribué à la production de l'outil de pilotage des cultures FarmStar, conçu par Arvalis et Terres Inovia (Cetiom jusqu'en 2015) et déjà utilisé en 2013 sur plus de 600 000 ha, sur blé, orge et colza. En 2012, ces collaborations avec les instituts techniques ont incité l'Inra à créer l'UMT « Capteurs et télédétection pour la caractérisation de l'état et du fonctionnement des cultures » afin de développer ce type d'approches à la fois sur le plan scientifique et sur le plan technologique. Ces derniers acquis illustrent les apports conjoints de l'agronomie et de la bioclimatologie à cette problématique.

La diffusion et ses médiateurs

Le déploiement de ces outils a été largement accompagné par les organismes de développement (instituts techniques, chambres d'agriculture) et les opérateurs économiques (laboratoires d'analyse, coopératives), avec lesquels l'Inra a toujours entretenu des relations étroites sur cette thématique. Les thèses cofinancées en sont l'un des vecteurs importants : sur la trentaine de thèses touchant à la fertilisation réalisées à l'Inra entre 1985 et 2014, 17 ont été réalisées en collaboration, essentiellement avec des instituts techniques et avec des industriels (thèses Cifre en particulier).

Le déploiement des méthodes et outils s'est appuyé sur un partenariat très structuré avec ces organismes, qui ont largement contribué à la mise au point des versions opérationnelles des outils et formé les utilisateurs. La coordination des acteurs du champ de la fertilisation est jusqu'ici assurée par deux structures dans lesquelles l'implication des chercheurs et ingénieurs du département EA est forte et couvre une large palette de disciplines :

– le Comifer, créé en 1980, qui regroupe les administrations publiques, la recherche, l'enseignement, les organisations professionnelles agricoles, les industriels de la fertilisation et les structures de distribution. Son objectif est de mettre à la disposition de l'agriculteur le moyen de gérer, de façon rationnelle et économe,

165. Limaux F, Meynard J.-M., Recous S., 2001. Déclencher la fertilisation azotée du blé : bases théoriques et principes généraux : le témoin « double densité ». *Perspectives agricoles*, 273, 62-70.

166. Ravier C., Jeuffroy M.H., Gate P., Cohan J.P., Meynard J.M., 2017. Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110, 117-134, DOI: 10.1007/s10705-017-9891-5.

167. Ramanantenasoa M.M.J., Gilliot J.M., Mignolet C., Bedos C., Mathias E., Eglin T. *et al.*, 2018. A new framework to estimate spatio-temporal ammonia emissions due to nitrogen fertilization in France. *Science of the Total Environment*, accepté juin 2018, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.202.

la fertilité de son sol, tant sur l'azote que sur l'ensemble des minéraux (Guide de la fertilisation raisonnée, Comifer, 2017) ;

– le groupement « Fertilisation raisonnée », créé en 2005, visait à coordonner les recherches sur la fertilisation. Devenu en 2007 Réseau mixte technologique fertilisation et environnement¹⁶⁸ en réponse à l'appel à proposition du ministère de l'Agriculture (DGER), et comportant 34 partenaires actuellement, son objectif est d'améliorer la connaissance et la gestion des cycles biogéochimiques des éléments minéraux en agriculture, et les outils de raisonnement de la fertilisation. Ce groupement et ce RMT ont porté la mise au point et l'évolution de deux outils réalisés par l'Inra avec divers partenaires du développement, les logiciels AzoFert[®] et Syst'N[®] (encadrés 13.2 et 13.3).

Depuis la création de l'Inra, la fertilisation a donc été un domaine d'application important pour des recherches en agronomie, science du sol, écophysologie et bioclimatologie. En parallèle, la fertilisation a connu de fortes évolutions dans ses pratiques, conduisant à une diminution de l'utilisation d'engrais, notable pour P et K, moindre pour l'azote. Le département EA a fortement accompagné cette évolution, au sein de laquelle l'agronomie a été à la fois à l'origine de la démarche

Encadré 13.2. AzoFert[®], un outil d'aide à la décision pour la fertilisation azotée des cultures

Sylvie Recous, Pascal Dubrulle

AzoFert[®] permet de faire des recommandations pour plus de 60 cultures de plein champ. Cet outil est basé sur un bilan d'azote minéral complet à partir de la mesure ou d'une estimation d'un reliquat d'azote minéral du sol sur la période comprise entre l'ouverture du bilan (date de prélèvement du reliquat) et la fermeture du bilan, généralement à la récolte de la culture fertilisée. L'outil calcule la dose totale d'azote à apporter en équilibrant le besoin total de la culture et l'ensemble des fournitures. Une originalité de l'outil est qu'il intègre une modélisation dynamique de ces fournitures d'azote provenant du sol et de diverses sources organiques. Les facteurs température et humidité du sol sont modélisés afin de convertir les données exprimées en jours calendaires en nombre de « jours normalisés ».

AzoFert[®] a été testé sur un large éventail de conditions pédoclimatiques et culturales pour les céréales, la betterave sucrière et les cultures légumières en France. L'évaluation multi-locale d'AzoFert[®] et son utilisation par les laboratoires et les services de conseils aux agriculteurs dans plusieurs régions ont permis d'adapter les paramètres du logiciel à la diversité des situations agricoles, comme celles rencontrées dans les sols limoneux de Picardie et de la région Centre, dans les sols calcaires de Champagne mais aussi en Belgique et en Suisse. AzoFert[®] peut être utilisé de différentes manières, telles qu'un usage de conseil réalisé par les laboratoires d'analyses de sol auprès des agriculteurs avec remplissage d'une fiche de renseignements ou *via* une plateforme web pour chaque parcelle ou ensemble de parcelles de l'exploitation. Il a aussi été intégré dans des travaux de recherche en vue d'une adaptation à des cultures pérennes (projet N/Pérennes), ou dans l'enseignement pour un usage pédagogique (projet N'Edu). AzoFert[®] est conçu pour intégrer de nouvelles références pour les paramètres et les variables d'entrée. AzoFert[®] est une copropriété de l'Inra, du Laboratoire départemental d'analyses et de recherche de l'Aisne (LDAR) et de l'Institut technique de la betterave (ITB). Le LDAR possède la licence d'exploitation du logiciel et donne accès aux calculs *via* un service web (Webazolims).

168. <http://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/>.

Encadré 13.3. Syst’N[®], un outil de diagnostic des pertes d’azote dans les systèmes de culture

Sylvie Recous, Virginie Parnaudeau, Pascal Dubrulle

Syst’N[®] a été développé au sein du réseau français RMT Fertilisation et environnement, en partageant les connaissances sur les flux d’azote dans les systèmes agricoles entre agronomes et acteurs de la gestion de l’azote en agriculture. Cet outil comprend un modèle simulant la dynamique de l’azote dans les systèmes cultivés pour calculer les pertes d’azote à l’échelle temporelle de la succession de cultures, et des interfaces graphiques conviviales. L’outil comprend également une base de données (PertAzote) en cours de développement, capitalisant les données simulées par le modèle et/ou des données observées dans le cadre d’expérimentations. Le modèle biophysique est un modèle sol-culture 1D. Il simule les transformations de l’azote (N) du sol, la croissance des cultures et l’absorption d’azote, le bilan hydrique et les pertes d’azote dans l’eau (NO₃⁻) et dans l’air (NH₃, N₂ et N₂O) sur un pas de temps journalier. Les données d’entrée comprennent la description des successions de cultures, les pratiques agronomiques (fertilisation azotée, irrigation et travail du sol), le sol et le climat. Le modèle biophysique a été évalué pour diverses cultures (blé, orge, maïs, pois, colza, luzerne et tournesol) et cultures intermédiaires (moutarde blanche, ray-grass). Les formalismes de Syst’N[®] combinent des sous-modèles existants déjà publiés : Stics pour les bilans hydrique et nitrique des sols, Azofert[®] pour la minéralisation des sols et des résidus de culture, Azodyn pour l’absorption d’azote par les cultures, NOE pour les émissions de N₂ et N₂O et Volt’Air pour les émissions de NH₃. Ces modèles ont été choisis pour fonctionner avec des données d’entrée qui sont généralement disponibles pour les utilisateurs finaux identifiés. En 2018, le simulateur Syst’N[®] regroupe en France une trentaine d’utilisateurs actifs : les conseillers agricoles, les responsables environnementaux des bassins versants ou des zones de protection de l’eau et les services de développement agricole utilisent principalement Syst’N[®] pour évaluer les pertes de nitrates vers les aquifères à l’échelle du paysage et concevoir de nouveaux systèmes de culture à faible émission d’azote. Syst’N[®] est aussi mobilisé pour des projets de recherche ou recherche-développement sur l’évaluation environnementale de systèmes agricoles à l’échelle du territoire. Une utilisation émergente est celle en enseignement agronomique et agricole et formation continue, en raison des propriétés pédagogiques de l’outil. Syst’N[®] continue d’évoluer pour prendre en compte davantage d’espèces cultivées comme les légumineuses (ex. : luzerne), et les systèmes complexes incluant les cultures associées ou les pratiques en agriculture biologique.

et médiatrice pour permettre l’inclusion des apports des autres disciplines et leur appropriation par les acteurs avertis de l’agriculture. Les autres disciplines ont apporté une autre vision, voire un changement de paradigme, fondamental dans ces évolutions.

► Vers des approches plus englobantes des cycles des éléments pour conjuguer agronomie et environnement

Par nature, prendre en compte les problèmes environnementaux nécessite d’élargir le champ de vision de l’agronomie et de replacer la parcelle et l’exploitation agricole dans ses relations avec les eaux et l’atmosphère, ainsi que dans le paysage pour prendre en compte les relations de proximité et les transferts d’éléments au sein des zones agricoles et avec les zones non agricoles, qu’elles soient forestières, semi-naturelles, urbaines ou périurbaines. Bénéficiant de compétences multiples non seulement en agronomie, mais aussi en matière de transfert et

transformations dans l'environnement (hydrologie, sciences de l'atmosphère, biogéochimie, microbiologie...) et de spatialisation (de la télédétection et modélisation du profil de sol, 2D, au paysage, 3D), le département EA a pu dépasser l'échelle de la parcelle pour étudier les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore à l'échelle du système de production, du paysage, jusqu'au niveau mondial.

Une intégration de plus en plus large des cycles de l'azote, du potassium et du soufre et des disciplines concernées

La polyculture-élevage a longtemps été le modèle d'exploitation agricole le plus répandu en Europe, les entrées d'azote se faisant par les légumineuses (herbacées prairiales ou à graines) et le recyclage par l'épandage des déjections animales pour fertiliser les cultures. La disponibilité des engrais industriels N et P a conduit non seulement à une forte intensification, mais aussi à une simplification et à une spécialisation croissante des systèmes de production. Cette évolution s'est aussi accompagnée d'une concentration des types de production sur des territoires de plus en plus spécialisés : grands bassins céréaliers, élevage-polyculture en zone de plaine, les zones moins cultivables (montagnes, zones humides ou séchantes) restant en élevage extensif. On imagine donc bien derrière ces transformations une forte augmentation des flux d'éléments, liée à une augmentation des intrants, localement ou globalement, et dont la nature est variable selon les systèmes de productions et leur spécialisation, par exemple des flux d'ammoniac importants pour des systèmes d'élevage hors-sol avec lisier.

Les productions animales jouent ici un rôle particulier, car le métabolisme de l'animal découple l'azote et le carbone présents dans les végétaux (fourrages consommés au champ ou en bâtiment, grains, aliments élaborés) pour produire de l'urine riche en N sous une forme très labile, l'urée (et en K), tandis que les fèces contiennent l'essentiel du P et du carbone (figure 13.4). Les pertes par volatilisation d'ammoniac, en bâtiments puis lors des épandages de lisiers et fumiers, sont alors importantes et rapides, partiellement maîtrisables par certaines techniques de stockage et d'épandage. Pour les herbivores au pâturage, la séparation entre urine et fèces est totale. Les bouses sont généralement bien décomposées par une faune coprophage qui disperse ses composantes. Le recouplage des cycles de l'azote et du carbone est effectué par la plante et la microflore du sol (figure 13.4) : l'urine s'infiltré rapidement dans le sol, ce qui limite la volatilisation, et l'azote peut être rapidement utilisé par des plantes prairiales si celles-ci sont peu fertilisées. L'hétérogénéité des dépôts de pissats, représentant des apports localement très forts (variant de 100 à 900 unités d'azote/ha), limite cependant leur recyclage et peut générer des lixiviations de nitrate et de la volatilisation d'ammoniac élevées, surtout en cas de chargement excessif ou de pâturage tardif en saison.

Dans tous les cas, la limitation des pertes passe surtout par l'ajustement des apports alimentaires aux animaux pour limiter les quantités d'éléments dans les déjections animales, et par l'ajustement, dans l'espace et le temps, des apports conjoints de N et P labiles par les effluents d'élevage et les engrais de synthèse aux besoins des prairies et des cultures. Ceci implique une bonne gestion des déjections animales (donc une capacité de stockage adaptée), du pâturage, ainsi que des intercultures, en évitant les sols nus en période de drainage lorsque les sols sont riches en nitrate et/ou en phosphore soluble. Pour les autres formes de phosphore, entraînées par ruissellement ou avec l'érosion des sols, les haies et autres dispositifs faisant

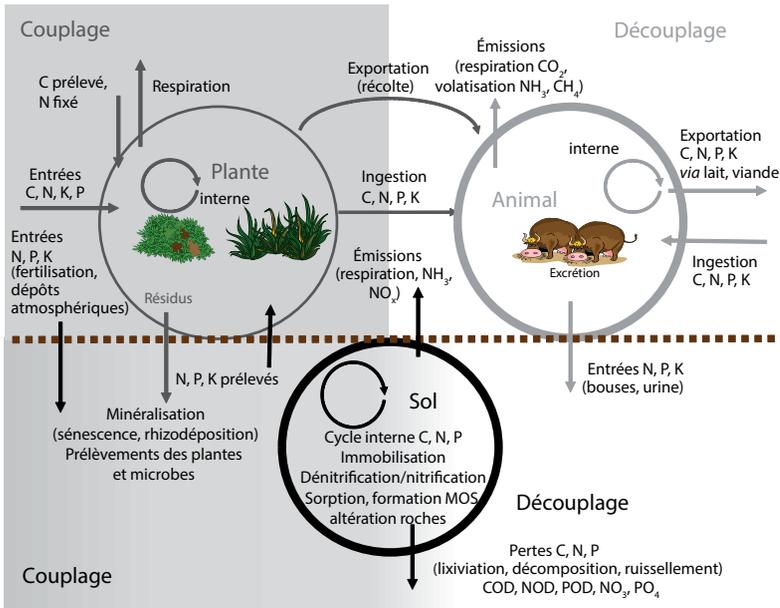


Figure 13.4. Cycle C-N-P dans un système prairial montrant les couplages et découplages entre nutriments, les flux et les processus sous-jacents.

COD : carbone organique dissous ; NOD : azote organique dissous ; POD : phosphore organique dissous.

obstacle à leur circulation dans les versants sont les principaux moyens pour limiter les pertes et leur arrivée dans les eaux de surface. Ces actions sont particulièrement cruciales dans les zones sensibles où l'eutrophisation est rapide. Tel est le cas, par exemple, des lacs de montagne et des rivières (phosphore) et de certaines zones côtières très propices au développement d'algues, comme les baies « algues vertes » en Bretagne (azote). La création du département EA a contribué à mieux appréhender ces systèmes complexes par l'association de disciplines qui a permis de traiter à des niveaux semblables l'ensemble des processus impliqués (ex. : transformation des matières organiques dans les sols, absorption des éléments nutritifs par la plante, lixiviation, volatilisation, transformations microbiennes) et des risques associés en lien avec le raisonnement agronomique et leur intégration à l'échelle de la parcelle jusqu'au système de production. Cette vision intégratrice a favorisé la rencontre avec les partenaires des sciences animales de l'Inra, des instituts techniques et des chambres d'agriculture. Les concepts et les outils ont pu à leur tour être utilisés dans des recherches participatives avec des partenaires professionnels (ex. : agriculteurs, gestionnaires des territoires) en tant qu'outils permettant de simuler les effets de scénarios agricoles¹⁶⁹ (changement de pratiques ou de systèmes de production) ou paysagers. Par exemple, le modèle Casimod'N est adapté à la problématique « algues vertes » en Bretagne, puisqu'il permet de simuler non seulement les changements de pratiques, mais aussi des changements importants des systèmes d'exploitation (simulation des itinéraires techniques, des plans d'assolement et d'épandage).

169. <https://www6.inra.fr/asirpa/Les-cas-etudes/Etudes-de-cas/Environnement-Agronomie> (gestion de la pollution d'origine agricole en Bretagne).

Du cycle de l'azote à la cascade de l'azote à l'échelle du paysage

L'azote et le phosphore réactifs, perdus depuis les sols agricoles mais aussi depuis les bâtiments d'élevage, circulent dans différents milieux (air, eaux, sols, écosystèmes) où ces éléments peuvent être stockés, mais vont surtout y être transformés, par le biais de processus chimiques et microbiologiques, en diverses formes (figure 13.5). Pour l'azote, pris ici comme illustration car il est mobile dans l'ensemble des compartiments sous différentes formes chimiques, Galloway *et al.* (2003)¹⁷⁰ ont introduit le concept de « cascade de l'azote », qu'ils définissent comme le transfert séquentiel de l'azote dans les systèmes environnementaux, s'accompagnant de transformations en différentes formes d'azote réactif et ses conséquences en termes d'impacts. Ainsi par exemple des pertes d'ammoniac par volatilisation, consécutive à des apports d'effluents d'élevage, peuvent contribuer directement à l'acidification ou à l'eutrophisation des écosystèmes proches ou produire, par réaction chimique avec les composés acides atmosphériques, des aérosols néfastes pour la santé humaine. De même, l'azote sous forme d'ammoniac ou de nitrate, transféré vers d'autres écosystèmes par voie atmosphérique ou hydrologique, respectivement, peut conduire à la formation de protoxyde d'azote (GES) lorsqu'il y rencontre des conditions plus favorables à la dénitrification que sur les champs agricoles où il a été épandu. En termes de gestion des cycles, la notion de cascade (applicable aussi à d'autres éléments que l'azote) fait apparaître la nécessité de « garder le contrôle » des éléments et d'anticiper la circulation de l'azote dans la chaîne des activités agricoles et d'élevage, parfois en lien avec d'autres activités (ex. : traitement des eaux et des déchets), pour chercher à récupérer et recycler les nutriments. Elle renforce l'idée d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote¹⁷¹ en agriculture à différents niveaux d'intégration et d'échelle (de la parcelle au territoire). Cela passe par un meilleur ajustement des apports aux besoins des plantes et des animaux en raisonnant sur l'ensemble de la chaîne d'utilisation de l'azote, notamment dans les liens entre productions végétales et animales. Dans les deux cas, un meilleur recyclage de l'azote organique est un levier essentiel.

On voit donc que cette nouvelle vision amène à mobiliser un large spectre de disciplines et d'approches tant conceptuelles qu'expérimentales ou de modélisation. Au-delà des disciplines engagées dans une meilleure maîtrise du cycle de l'azote à l'échelle de la parcelle (agronomie, science du sol, bioclimatologie), cette vision mobilise les approches qui permettent de « suivre » l'azote réactif et ses transformations et de le gérer à des échelles supérieures (hydrologie des petits et grands bassins versants, sciences de l'atmosphère, biogéochimie). Étant donné la complexité et la diversité des milieux concernés (sols, eaux, atmosphère, écosystèmes), le recours à la modélisation est essentiel, et celle-ci a dû être fortement renouvelée. Le département EA, et plus généralement l'Inra, ont pu se positionner rapidement dans ce nouveau champ à l'échelle des paysages agricoles grâce à la présence d'une grande partie des disciplines pertinentes dans les domaines des transferts par voie hydrologique et atmosphérique et des approches en biogéochimie, mais aussi grâce à la capacité d'intégrer le fonctionnement de l'exploitation agricole (du point de vue des flux d'éléments) et des méthodes et moyens

170. Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J., 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53 (4), 341-356.

171. Rapport entre les quantités d'azote exportées dans les produits agricoles, végétaux ou animaux et celles qui sont apportées (engrais, aliments...).

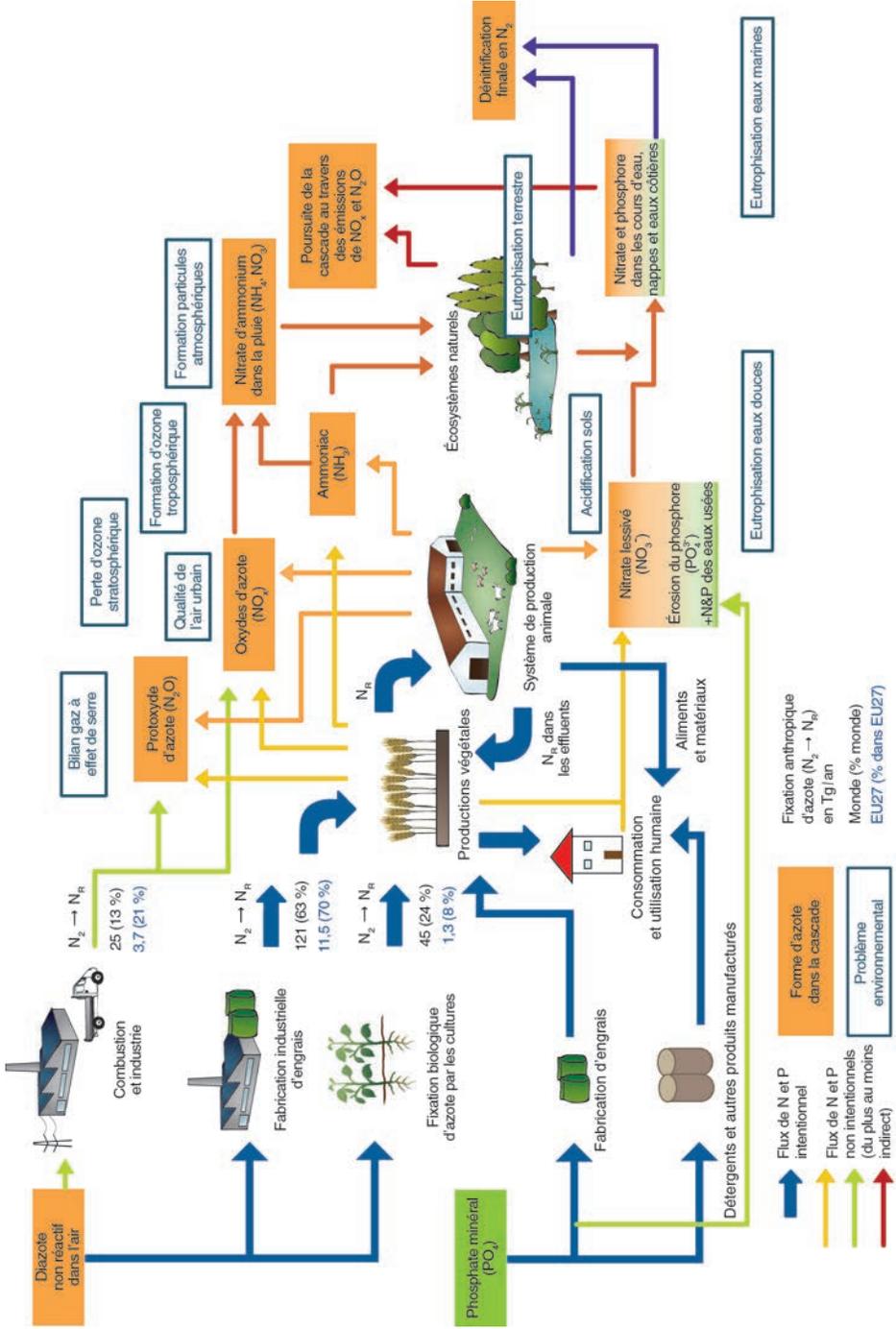


Figure 13.5. Représentation de la cascade de l'azote et des flux de phosphore et les impacts environnementaux associés.

expérimentaux pour traiter des questions scientifiques et des applications. Il est maintenant possible de simuler les effets d'aménagements d'espaces ou de linéaires non agricoles (haies, fossés, bandes enherbées) et de conversion de surfaces agricoles utiles en usage non agricole (forêts ou prairies non fertilisées fauchées) sur l'évolution de la qualité de l'eau, en intégrant les aspects spatio-temporels de la cascade de l'azote¹⁷² et, de mieux en mieux, de la dynamique du phosphore. L'intégration territoriale multi-éléments est en cours dans les études menées par des unités du département EA en lien avec des partenaires académiques en France et en Europe. L'implication des partenaires agricoles est plus récente, cette vision des cycles ne faisant pas partie, jusqu'à un passé récent, de leur champ d'activité traditionnel. Cette échelle offre de nouvelles complémentarités entre cultures et élevage pour le recyclage et la valorisation de l'azote et du phosphore¹⁷³, et donne un nouveau cadre de raisonnement pour éviter les transferts de pollution entre éléments biogéochimiques ou entre leurs diverses formes actives. Il faut également souligner que la plupart des considérations évoquées ici, surtout pour l'azote, sont transposables à d'autres éléments majeurs (P, K, S), en adaptant leurs caractéristiques de mobilité, de réactivité et de gestion.

Tout aussi importantes, les infrastructures d'expérimentation et d'observation sont des lieux où il est possible d'appréhender ces questions scientifiques grâce à des approches pluridisciplinaires à différentes échelles, à la fois sur les processus élémentaires des cycles (ex. : utilisation par la plante, liens aux matières organiques de sols), comme dans les observatoires de recherche ACBB (Agriculture, cycles biogéochimiques et biodiversité) et PRO (Produits résiduels organiques), et sur des processus spatiaux (bassins versants, zones-ateliers) concernant le devenir de l'azote (voir chapitre 8).

Des approches déclinables à des échelles plus larges

En plus de recourir à des quantités croissantes d'engrais de synthèse, et de générer des fuites vers l'environnement dont les transformations et les impacts peuvent être appréhendés par la notion de cascade, l'évolution des systèmes agrolimentaires mondiaux après-guerre et la spécialisation croissante des systèmes de production ont été associées à une augmentation concomitante des échanges commerciaux (fertilisants, produits végétaux ou animaux, bruts ou transformés), parfois sur de très longues distances. En Europe de l'Ouest, le développement de systèmes d'élevage intensifs s'est ainsi accompagné d'un accroissement considérable des importations de soja (et maïs) en provenance d'Amérique du Sud. Ces mouvements de matière liés aux échanges commerciaux inter-régionaux ou internationaux donnent lieu à des flux associés d'éléments minéraux et à des transferts de fertilité entre régions et continents. L'analyse des flux de P à l'échelle de la France et de ses régions a ainsi montré qu'une large part du bilan P excédentaire des sols bretons provenait non pas des engrais minéraux, mais des importations d'aliments pour animaux (figure 13.6). Pour rendre compte de ces flux liés aux activités humaines, impliquant d'autres secteurs que l'agriculture (ex. : transformation et transport des produits agrolimentaires, traitement des eaux usées et recyclage des

172. Voir par exemple le projet européen NitroEurope (<http://www.nitroeuropa.eu/>) et les projets ANR Acassya (<https://www6.inra.fr/acassya>) et Escapade (<https://www.n-escapade.fr/>).

173. Voir par exemple le projet européen Cantogather, https://cordis.europa.eu/project/rcn/101746_en.html.

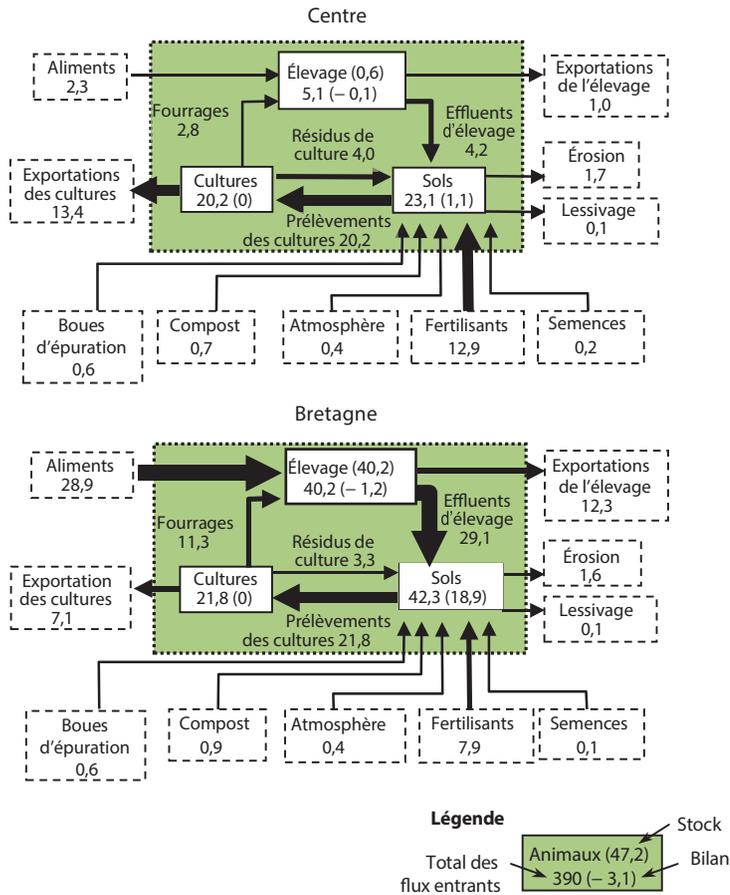


Figure 13.6. Stocks, flux et bilan P des sols de deux régions françaises (Centre et Bretagne). Moyennes de stocks (kt P) et flux (kt P/an) sur la période 2002-2006. D'après Senthilkumar K., Nesme T., Mollier A., Pellerin S., 2012. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: the importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycl. Agroecosyst.*, 92, 145-159.

déchets), des cadres d'analyse ont été empruntés au domaine de l'écologie industrielle (ex. : *substance flow analysis*). Un enjeu pour l'avenir sera de développer des modèles dynamiques et spatialement explicites, permettant d'associer des flux de matières et d'éléments minéraux pour différents scénarios d'organisation du système agroalimentaire et des autres secteurs, à différentes échelles, jusqu'au niveau mondial. Cela suppose le développement de nouvelles approches de modélisation, en mobilisant fortement les sciences économiques et sociales.

► Gestion durable des flux d'éléments dans les agroécosystèmes

Des cycles fortement connectés

Du fait d'enjeux associés différents, et parce que les principaux processus gouvernant leurs dynamiques ne sont pas les mêmes, les recherches sur l'azote

d'une part, sur le phosphore et le potassium d'autre part, ont été pendant longtemps conduites de manière disjointe. La dynamique de l'azote est majoritairement gouvernée par des processus biologiques (ex. : minéralisation, organisation microbienne, nitrification), alors que celle du potassium dépend exclusivement de processus physico-chimiques (ex. : adsorption, désorption), le phosphore et le soufre représentant une situation intermédiaire. Mais une disponibilité déséquilibrée entre ces éléments affecte le fonctionnement des écosystèmes, surtout en conditions limitantes pour l'un ou l'autre des éléments. La majorité des études sur le couplage entre les cycles (approche d'écologie stoechiométrique) sont centrées sur des écosystèmes naturels (prairies, forêts, savanes). La question se pose donc de savoir si ces études sont également importantes et transposables pour les agro-écosystèmes. On peut aisément imaginer que la question de l'équilibre entre les apports de différents éléments n'a pas lieu d'être dans des milieux très fertilisés dans lesquels les cycles des éléments sont découplés. Cependant, dans le contexte de l'agroécologie, et plus spécifiquement d'une diminution des intrants avec pour idée générale que les agroécosystèmes pourraient participer à une gestion durable des cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et du carbone, au même titre que les écosystèmes considérés comme « naturels », la réduction de la dépendance aux intrants des agroécosystèmes passe par un recouplage nécessaire des cycles C-N-P. Par exemple, en présence de faibles ressources, les plantes peuvent adapter leur stratégie d'acquisition des nutriments en modifiant les allocations de C et, en retour, leur impact sur leur environnement. De même, caractériser le rôle du soufre dans l'amélioration de la résistance des cultures aux stress (ex. : eau, pathogènes) et dans la valorisation de l'azote disponible (couplage étroit entre N et S) permet d'éviter la carence en S et d'améliorer la productivité tout en réduisant les émissions azotées.

Le couplage du cycle de l'azote avec celui du carbone s'est rapidement avéré incontournable du fait de processus clés associés au fonctionnement microbien dans les sols, au fonctionnement de la plante et de l'animal (élevage) impliquant des interactions entre les deux éléments (ex. : minéralisation-organisation de l'azote au cours de la décomposition des matières organiques), mais les interactions avec d'autres éléments ont été peu étudiées. Sur P et K, l'effort de recherche a beaucoup porté sur la compréhension des mécanismes physico-chimiques de mobilisation-transport dans la rhizosphère. Malgré l'ampleur des connaissances acquises, cet effort n'a pas réellement permis de renouveler les indicateurs utilisés en routine par les laboratoires pour caractériser la disponibilité en P et K des sols. Des progrès sur le mode de raisonnement de la fertilisation P et K ont été proposés, et leur adoption a abouti à une réduction significative des doses, mais celui-ci reste fondamentalement basé sur la notion de courbe de réponse et la détermination de valeurs seuils à atteindre et/ou à maintenir dans le sol pour que la disponibilité en P et K soit non limitante.

Dans un contexte où l'objectif principal assigné à la fertilisation était de satisfaire les besoins des cultures en complétant l'offre du sol par des apports d'engrais minéraux, la disjonction des cadres de raisonnement relatifs à chacun des éléments ne posait pas de problème majeur. L'usage massif d'engrais minéraux N-P-K et la forte disponibilité des nutriments dans les sols qui en résultait permettaient de s'affranchir de l'étude des interactions entre éléments, puisque ce niveau élevé de disponibilité limitait fortement ces interactions. En revanche, en prairie et dans les

zones d'élevage utilisant des engrais organiques, cette approche disjointe des différents éléments s'est vite avérée insuffisante. Une première étape a été de prendre en compte les apports d'éléments minéraux par les produits organiques, en tenant compte de leur cinétique de libération (ex. : immédiate pour K, fonction d'interactions C/N complexes pour N). Cependant, le rapport N/P des effluents d'élevage étant généralement plus faible que celui des végétaux, un calcul de la quantité à apporter basé sur N conduit à une accumulation de P dans le sol. Réciproquement, un apport d'engrais organiques calculé sur la base du P conduit à proposer un apport d'azote minéral de complément, ce qui est paradoxal dans un contexte d'excédents structurels en N et P du fait d'une forte densité d'élevage à l'échelle régionale. L'évolution du contexte visant à réduire l'usage des engrais de synthèse et les limites de l'approche mono-élémentaire ont favorisé l'émergence de deux domaines de recherches, en partie liés :

- le recyclage des produits organiques : à l'Inra, la mise en place d'un dispositif national dédié, l'ORE PRO¹⁷⁴ (pour « produits résiduels organiques »), est illustrative de l'effort de prise en charge de cette problématique (voir chapitre 17) ;
- un effort d'analyse des interactions entre les cycles des différents éléments (C, N, P, K, S...), comme par exemple l'effet de la disponibilité en P sur le cycle de l'azote *via* la fixation symbiotique par les légumineuses.

Dans un contexte de réduction des intrants, et d'augmentation concomitante des services demandés à l'agriculture (ex. : stocker du carbone dans les sols pour atténuer le changement climatique), l'étude des interactions entre cycles devient encore plus nécessaire. Compte tenu du rapport C/N de la matière organique du sol (C/N \approx 10) et de sa faible flexibilité stœchiométrique, une augmentation de 4 pour mille par an du stock actuel de C (environ 200 kg de C pour un stock initial de 50 t par ha) suppose un stockage concomitant de 20 kg de N. Fournir cet azote par un apport supplémentaire d'engrais irait à l'encontre de l'objectif de réduction de leur usage, et d'autres leviers sont à l'évidence préférables (ex. : réduction des pertes, augmentation de la fixation symbiotique). La prise en compte des interactions entre cycles apparaît ainsi incontournable lors de la conception et de la mise au point de systèmes agroécologiques.

Vers des systèmes de culture à bas intrants et/ou valorisant mieux les interactions entre espèces

L'agriculture française (et européenne) est actuellement placée face au défi de produire plus pour satisfaire les besoins croissants de la population mondiale mais sans dégrader l'air, les eaux et les sols, de produire une nourriture saine et diversifiée mais sans augmentation notable des prix. Ce contexte à haut risque pour les exploitants peut aussi offrir des opportunités de transformation vers des systèmes agricoles plus durables, moins consommateurs en intrants N et P. Lors de l'intensification des systèmes de production au xx^e siècle, des agriculteurs et des chercheurs ont anticipé les conséquences négatives des évolutions en cours et exploré des modes de production plus autonomes et économes beaucoup moins consommateurs d'intrants, souvent basés sur la fixation symbiotique pour l'entrée d'azote dans les systèmes et sur le recyclage pour N et P. À la même époque, des systèmes traditionnels complexes associant plusieurs cultures, parfois plusieurs étages de

174. <https://www6.inra.fr/qualiagro/Nos-partenaires/Le-reseau-SOERE-PRO>.

végétation et développés sur d'autres continents (Amérique du Sud et centrale, Asie du Sud-Est), ont formalisé certains des principes de l'agroécologie. Les recherches conduites dans le département EA s'emparent de plus en plus de ces bases agronomiques et écologiques pour l'étude de systèmes mobilisant des choix de rotations et d'espèces et des techniques culturales appropriés en vue de mieux mobiliser les ressources naturelles pour la nutrition (voir chapitre 14) et la protection des cultures et de mieux explorer les capacités du milieu. Les intercultures peuvent jouer un rôle de production (ex. : fourrages) ou de précédent favorable pour assurer une fourniture en N (P dans une moindre mesure) aux cultures suivantes.

De façon générale, la qualité biologique des sols et la préservation de leur matière organique sont devenues des sujets d'étude essentiels à l'Inra, et en particulier dans le département EA, tout comme la conception et l'évaluation de systèmes de culture innovants intégrant les risques pour l'environnement associés aux nutriments. Ces approches mobilisent également les sciences sociales, souvent à l'échelle de territoires, autour d'une expertise agronomique sur l'étude des cycles biogéochimiques et la mise au point d'outils d'aide à la décision pour la fertilisation.

Toutes ces orientations posent de nouveaux défis aux approches développées jusqu'ici qui, si les principes de base restent souvent valables, devront être éprouvées dans des systèmes à faibles niveaux d'intrants, donc avec des flux attendus faibles, et où la composante biologique devra être davantage prise en compte. De nouvelles références expérimentales restent à acquérir dans nombre de ces systèmes.

► Conclusion

Les travaux de recherche sur les cycles biogéochimiques ont fortement évolué depuis vingt à trente ans. Tout en maintenant des points forts autour du raisonnement de la fertilisation, associant souvent des partenaires du développement agricole, la vision de l'Inra s'est progressivement davantage orientée vers les problématiques environnementales, en lien avec les perturbations de ces cycles provoquées par l'action anthropique, et vers la prise en compte d'échelles plus larges. Dans le contexte général de l'évolution des systèmes de production agricoles, les compétences réunies au sein des unités du département EA ont permis d'opérer une synergie entre agronomie, science du sol, biogéochimie, hydrologie et bioclimatologie pour répondre à ces nouveaux enjeux. Cette évolution s'est également appuyée sur des collaborations avec d'autres départements de l'Inra tels Phase, SAD et BAP, ainsi que sur des collaborations construites sur le long terme avec nos partenaires académiques au sein de nos UMR (écoles d'agronomie, universités, Cirad, CNRS, etc.) et du développement agricole.

Cette synergie a pu se construire grâce au choix fait par l'Inra de maintenir un dispositif très intégratif et collectif, largement pluridisciplinaire, dans les domaines de la production agricole et de l'environnement, contrairement à la plupart des établissements de recherche européens et même dans le monde. L'Inra, à travers ses équipes et ses partenariats, s'est ainsi positionné de manière particulièrement forte grâce à la gamme des compétences qu'il rassemble autour de l'agronomie et de l'environnement, pour appréhender les enjeux environnementaux et agronomiques et les questions scientifiques et opérationnelles sur les grands cycles biogéochimiques en interaction avec les activités agricoles. Cette capacité est renforcée par les

interfaces que l'institut a su créer avec les acteurs agricoles concernés, en se nourrissant de leurs expériences et de leur expertise, en répondant à leurs questionnements, voire en les entraînant dans ces nouvelles voies. Ce positionnement a permis à l'Inra et en particulier au département EA de se positionner dans des consortiums d'une part par le biais de la modélisation intégrative de ces grands cycles dans le domaine de l'agriculture et de l'environnement terrestre, d'autre part par ses dispositifs expérimentaux à moyen (unités expérimentales) et long (Observatoires de recherche en environnement) termes.

De plus, par les nouvelles ouvertures vers les sorties environnementales, par son implication dans des expertises (locales, nationales et internationales) et grâce aux liens étroits avec les partenaires du développement agricole, l'étude des cycles des éléments majeurs est un domaine de recherche où la recherche agronomique a largement contribué à éclairer les acteurs des politiques publiques. Les travaux qui ont été conduits rendent notamment possibles des analyses englobant l'ensemble des impacts liés aux perturbations des cycles par les activités agricoles. Ils pourront aussi trouver de nouveaux champs de développements dans le domaine de la santé et de l'environnement.

Pour en savoir plus

- Comifer (B. Colomb coord.), 2017. *Guide de la fertilisation raisonnée*, Éditions France agricole, 606 p.
- Denoroy P., Dubrulle P., Vilette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser M. *et al.*, 2004. REGIFERT, *Interpréter les résultats des analyses de terre*, coll. Techniques et Pratiques, Inra Éditions, Paris, 132 p.
- Lemaire G., Carvalho P., Kronberg S., Recous S. (eds), 2018. *Agroecosystem Diversity: Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality*, Academic Press, Elsevier, 458 p.
- Pellerin S., Butler F., Guiard-van Laethem C., 2014. *Fertilisation et environnement. Quelles pistes pour l'aide à la décision ?*, Acta/Éditions Quæ, Paris, 288 p.
- Sutton M.A., Bleeker A., Howard C.M., Bekunda M., Grizzetti B., de Vries W. *et al.*, 2013. *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management*, Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative, 128 p., <http://www.initrogen.org/publications/our-nutrient-world>.

Un renouvellement indispensable des paradigmes qui ont fondé la fertilisation des cultures en agronomie

Gilles Lemaire

D'une approche de type « pronostic » de la nutrition minérale des cultures conduisant à des excès de fertilisation...

L'étude de la nutrition minérale des cultures en agronomie a été fondée sur deux paradigmes essentiels : la loi « du facteur limitant »¹⁷⁵ et la loi « des rendements décroissants »¹⁷⁶. Ces lois ont permis de développer une approche de la fertilisation des cultures basée sur la formulation d'un « pronostic » de la réponse du rendement des cultures à des apports croissants d'éléments fertilisants par l'estimation du besoin des cultures et par la prévision de la fourniture des éléments dans le sol. Cette approche s'est avérée être *a posteriori* une simplification excessive du fait d'une prise en compte purement séquentielle des éléments nutritionnels limitants successifs considérés indépendamment les uns des autres ; de la vision binaire (limitant vs non limitant) de ces éléments, ignorant leur degré de co-limitation ; et des incertitudes d'un pronostic statistique de type « dose-réponse » pour définir la dose dite « optimale ».

Pour les éléments peu mobiles dans le sol comme le phosphore (P) et le potassium (K), ces pronostics ont été couplés aux analyses de sol afin de distinguer statistiquement des familles de courbes de réponse, donnant ainsi lieu à une abondante recherche en physico-chimie mais aboutissant souvent, pour les mêmes raisons liées à l'incertitude du pronostic, à des prescriptions souvent excédentaires : « apporter un peu trop pour être certain d'avoir assez ». Pour l'azote (N), la temporalité des besoins des cultures et de la minéralisation de la matière organique du sol a amené les agronomes à formaliser une écriture « prédictive » du bilan de N d'une culture¹⁷⁷. Là encore, cette approche de type pronostic, malgré les paramètres contextuels qu'elle implique, aboutit en règle générale à des fertilisations excédentaires du fait de la surestimation systématique des rendements probables et donc du besoin réel de la culture.

... À une approche dynamique de type « diagnostic » permettant un meilleur ajustement

Les travaux de Lemaire et Salette¹⁷⁸ (1984) ont permis de développer une approche dynamique conjointe du prélèvement de N et de la croissance en matière sèche du peuplement végétal qui a abouti au concept de « courbe de dilution de N » et d'indice de nutrition N : INN (voir figure ci-après). Cette approche s'étant révélée pertinente pour un large spectre de cultures, il devenait alors possible d'établir un diagnostic d'état de nutrition N d'une culture en situation réelle en estimant directement *in situ* sa biomasse et sa teneur en N. Ainsi, d'une approche de pronostic soumise aux aléas de la prévision, on a pu passer à une approche de diagnostic prenant explicitement en compte le niveau de satisfaction du besoin réel des cultures dans des contextes précis et variés. Les deux variables clés, la biomasse de la culture et sa teneur en N, peuvent être estimées par les outils de la télédétection, ce qui ouvre la porte à des diagnostics « en temps réel » à haute résolution spatio-temporelle permettant un pilotage de la fertilisation azotée à différentes échelles (parcelle, exploitation, territoire, bassin versant, etc.) et pouvant déboucher sur des applications concrètes, notamment en agriculture de précision. Deux conséquences importantes concernant l'analyse des interactions génotype-milieu émergent de ce concept : d'une part, la co-régulation de

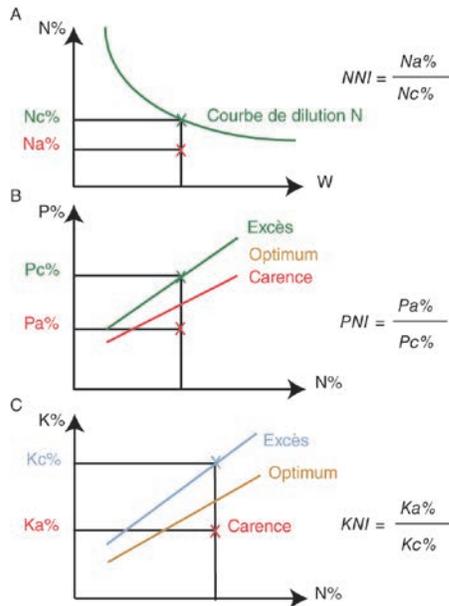
175. von Liebig J., 1855. *The relationship of chemistry to agriculture and the agriculture experiment of Mr J.B. Lawes*, 2nd edition, Braunschweig.

176. Mitscherlich E.A., 1924. *Die Bestimmung des Düngerbedürfnisses des Bodens*, Paul Parey, Berlin.

177. Rémy J.-C., Hébert J., 1977. Le devenir des engrais dans le sol. *Comptes Rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 63, 700-710.

178. 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, *Agronomie*, 4, 431-436.

l'absorption de N à la fois par la disponibilité de N minéral dans le sol et par la capacité de croissance du peuplement végétal rend inopérante la notion même de disponibilité en N d'un sol, puisque celle-ci dépend en partie de propriétés inhérentes au peuplement lui-même ; et, d'autre part, l'efficacité d'utilisation de N par une culture s'accroît avec l'augmentation de biomasse de celle-ci (concept de dilution de N), ce qui revient à dire que les différences d'efficacité entre cultures, si elles existent, n'ont un sens que si on les compare à biomasse équivalente.



Détermination des indices de nutrition pour N, P et K utilisant (A) la courbe de dilution N critique, et (B et C) les relations N%-P% et N%-K%.

Sources : Lemaire G., Jeuffroy M.H., Gastal F., 2008. Diagnostic tool for plant and crop N status in vegetative stage. theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28, 614-624 ; Salette J., Huché L., 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse du végétal : principes, mise en œuvre, exemples. *Fourrages*, 125, 3-18.

Le concept de « dilution » fonctionne également pour le phosphore, le potassium et le soufre. Ainsi, un diagnostic global de la nutrition minérale d'une culture *in situ* peut être réalisé sur une base stœchiométrique permettant une analyse des interactions entre éléments. Ces diagnostics de nutrition N, P, K, etc., doivent permettre d'aboutir à un pilotage des apports de fertilisants au plus près des besoins correspondant aux niveaux de rendement objectifs, sans avoir à passer par des pronostics de réponse des cultures, trop soumis aux incertitudes prévisionnelles. Concilier nutrition minérale optimale des cultures et protection de l'environnement devient alors un objectif atteignable. Le défi se situe maintenant dans l'inclusion de ces concepts généraux dans des outils de diagnostics et d'aide à la décision utilisables au champ par les agriculteurs.

La rhizosphère : des interactions racine-sol-micro-organismes aux leviers de l'agroécologie

Philippe Hinsinger, Loïc Pagès, Laurent Philippot

► Concept de rhizosphère et enjeux de connaissance

La rhizosphère est un concept qui a été initialement défini par Lorenz Hiltner¹⁷⁹ en Allemagne en 1904 comme le volume de sol localisé autour des racines et soumis à leurs activités. Dès le début du xx^e siècle, ces travaux remarquablement visionnaires ont souligné l'importance de prendre en compte les interactions plante-sol-micro-organismes dans ce volume de sol singulier pour comprendre la santé et la nutrition des plantes. Depuis les années 1990, les recherches sur la rhizosphère se sont considérablement développées jusqu'à nos jours et ont confirmé que le fonctionnement des plantes dépend très largement des interactions avec le microbiome dont la rhizosphère est le siège, mais aussi de nombreux processus mis en œuvre par les racines et les acteurs de la faune du sol, dans le cadre d'interactions abiotiques et biotiques, trophiques ou non. Ce chapitre retrace l'évolution des travaux conduits dans la communauté française, notamment à l'Inra, avant et plus encore depuis l'émergence du département Environnement et Agronomie (EA) en 1998.

La rhizosphère à la française

Les pionniers des recherches sur la rhizosphère en France sont présents dans trois groupes qui ont ensuite rejoint le département EA. Dans le département Agronomie, c'est l'équipe de Nancy qui ouvrira la voie dès les années 1980, avec

179. Hartmann A., Rothballer M., Schmid M., 2008. Lorenz Hiltner, a pioneer in rhizosphere microbial ecology and soil bacteriology research. *Plant and Soil*, 312, 7-14.

ses travaux originaux sur l'exsudation racinaire, qu'Hiltner avait identifiée comme un des processus majeurs déterminant les interactions entre racines et communautés microbiennes du sol. Ses recherches en conditions hydroponiques axéniques ont permis de comprendre quelques-uns des déterminants majeurs de ce processus d'exsudation, en particulier le rôle des contraintes mécaniques et l'effet des micro-organismes *via* leur activité catabolique. Ils ont également été les premiers à souligner l'impact du processus d'exsudation sur la disponibilité des éléments traces métalliques. En parallèle, c'est au sein de deux unités du département de Science du sol que les recherches ont été les plus actives. Dans le groupe de microbiologie du sol à Dijon, les travaux ont porté notamment sur la symbiose fixatrice d'azote chez les légumineuses (Fabacées), et plus particulièrement sur l'écologie des rhizobiums, avec la mise en évidence de l'importance des différences entre souches dans la capacité à former des nodosités sur les racines de la plante-hôte, et à fixer l'azote atmosphérique dans ces structures symbiotiques¹⁸⁰. Enfin à Montpellier dans les années 1980, ce sont les travaux de l'équipe de Science du sol qui ont tracé la voie d'une compréhension du rôle des racines dans les processus de formation des sols, en s'appuyant essentiellement sur une approche naturaliste et sur la mise en œuvre de techniques de micromorphologie des sols. Ses travaux sur les structures rhizomorphes calcaires, puis sur les minéraux et roches silicatés et phosphatés autour de 1990, en lien avec les modifications considérables de pH susceptibles de se produire à proximité des racines¹⁸¹, initieront la mise en œuvre d'approches expérimentales visant à identifier les processus impliqués dans l'altération et la formation de minéraux dans la rhizosphère, et leurs conséquences, en outre, sur l'adaptation des plantes aux sols calcaires et sur la nutrition minérale, potassique et phosphatée, des cultures.

Au-delà des départements de l'Inra qui allaient fonder le département EA, la communauté française est alors essentiellement présente dans le champ de la microbiologie des sols, qui commence à se fédérer au travers d'une série de colloques francophones « Rhizosphère », à Lyon, à Aix-en-Provence, puis à Dijon en 2001 : cette série atteint ici son apogée avec plus de 300 participants, en s'efforçant pour la première fois, sous la houlette de son comité scientifique animé par Philippe Lemanceau, d'intégrer les connaissances de l'écophysiologie végétale, des sciences du sol, aux côtés de l'écologie microbienne des sols¹⁸².

Au cours des années qui ont précédé la constitution du département EA, trois évolutions majeures ont marqué la communauté travaillant sur la rhizosphère :
 – de la microbiologie des sols à l'écologie microbienne de la rhizosphère : à la fin du xx^e siècle, les progrès rapides réalisés dans le domaine de la biologie moléculaire ont permis d'étudier des environnements complexes comme la rhizosphère à l'aide de techniques moléculaires fondées sur l'extraction directe des acides nucléiques du sol et leur amplification par réaction de polymérisation en chaîne. Grâce à ces méthodes, il a été enfin possible d'accéder à l'abondance et à la diversité des communautés microbiennes dans les sols en évitant l'écueil de l'impossibilité de cultiver la plupart des micro-organismes du sol. Les travaux menés à l'unité de

180. Amarger N., Lobreau J.P., 1982. Quantitative study of nodulation competitiveness in rhizobium strains. *Applied and Environmental Microbiology*, 44, 583-588.

181. Hinsinger P., Plassard C., Tang C.X., Jaillard B., 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant and Soil*, 248, 43-59.

182. Voir le numéro spécial (n° 23) de la revue *Agronomie* en 2003 consacré à ce colloque.

Microbiologie des sols de Dijon ont alors conduit au développement d'une méthode d'extraction d'ADN du sol qui a été standardisée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Sur la base de ces travaux, l'UMR Agro-écologie de Dijon a développé une autre norme qui permet désormais de quantifier l'abondance des divers groupes microbiens dans les sols ;

– de la cartographie des racines à la modélisation de l'architecture des systèmes racinaires : à la fin des années 1980, les écophysiolgistes d'Avignon ont proposé des modèles ouvrant la voie à une description dynamique et géométrique de la rhizosphère, permettant ainsi d'établir le lien entre rhizosphère et développement racinaire, et d'intégrer la dynamique spatiale du fonctionnement des pointes racinaires (exsudation, respiration, absorption hydrique et minérale) à l'échelle de la plante entière. Depuis, la modélisation de ces liens n'a cessé de progresser, avec notamment les collaborations entre les unités PSH et Emmah en Avignon conduisant à des travaux novateurs sur le transport de l'eau dans la rhizosphère¹⁸³, et bien plus tard avec l'UMR Eco&Sols de Montpellier concernant les liens entre l'absorption des nutriments et les autres processus biogéochimiques propres à ce micro-environnement ;

– concernant le sol, celui-ci était jusque-là très largement considéré comme un support des cultures par les agronomes, tandis que les pédologues, s'ils reconnaissaient depuis Dokoutchaïev au XIX^e siècle un rôle indirect de la végétation dans la zonation des sols à l'échelle du monde, attribuaient un rôle assez secondaire aux processus biotiques dans la formation des sols, réduit implicitement à l'action de la faune et plus encore des micro-organismes du sol. Les travaux conduits en science du sol à Montpellier dans les années 1980 et au début des années 1990 dans les départements qui ont préfiguré le département EA ont conduit à revoir ces positions en montrant que les plantes, au travers de leurs racines et des processus rhizosphériques associés, sont capables de modifier profondément, à court terme, les propriétés des sols, y compris celles considérées comme relativement stables telles que la minéralogie des sols¹⁸⁴. Ces travaux ont ainsi montré que la rhizosphère était un *hot-spot* du fonctionnement biogéochimique du sol, déterminant la biodisponibilité des nutriments pour les plantes.

La reconnaissance de l'importance des travaux de recherche sur la rhizosphère dans le département EA s'est traduite par sa mention explicite dans un des champs thématiques dans la structuration initiale de ce nouveau département en 1998, celui de l'Écologie du sol et de la rhizosphère, confié à Jean-Claude Fardeau. Un réseau coanimé par Benoît Jaillard et Alain Sarniguet (département SPE) a alors permis à la communauté active de l'Inra de se fédérer dans ce domaine.

La rhizosphère en Europe : construction d'une vaste communauté

L'organisation du colloque Rhizosphère de Dijon et son succès en 2001 avaient conduit son comité scientifique à considérer qu'il était grand temps de dépasser les frontières nationales et à proposer un événement international pour marquer le centenaire du concept de rhizosphère. Cette idée a été développée dans le cadre de

183. Doussan C., Pagès L., Pierret A., 2003. Soil exploration and resource acquisition by plant roots: an architectural and modelling point of view. *Agronomie*, 23, 419-431.

184. Hinsinger P., 2013. Plant-induced changes of soil processes and properties. In: *Soil Conditions and Plant Growth* (P.J. Gregory, S. Nortcliff, eds), Wiley-Blackwell, UK, 323-365.

l'Action Cost 631 Umpire (Understanding and Modeling Plant-soil Interactions in the Rhizosphere Environment) qui a vu le jour en 2002, coordonnée par Walter W. Wenzel (Autriche) jusqu'en 2004, puis par Philippe Hinsinger (UMR Eco&Sols à Montpellier) jusqu'en 2006. Cette Action a eu le mérite de fédérer une communauté européenne très active dans ce domaine et, à l'instar de ce qui avait été accompli avec succès à Dijon, de permettre de réduire les barrières disciplinaires pour rassembler les spécialistes des plantes, du sol et des communautés microbiennes autour de cet objet commun, lieu central de leurs interactions, la rhizosphère (encadré 14.1).

Dans le même temps, la place de la rhizosphère dans le schéma stratégique de département (SSD) 2004-2008 du département EA est paradoxalement devenue moins visible qu'auparavant. Ce document ne lui fait référence que dans le cadre du champ thématique « Fonctionnement des sols, cycles biogéochimiques et écologie fonctionnelle », principalement en lien avec les enjeux autour de la nutrition minérale des plantes et le déterminisme de la biodisponibilité des nutriments majeurs. Le département EA incitait alors fortement ses chercheurs à investir sur un nombre limité d'espèces modèles, tandis que les chercheurs impliqués sur ces thématiques avaient jusqu'alors plutôt exploré une diversité d'espèces végétales en vue d'appréhender la gamme des processus rhizosphériques mis en jeu. Étonnamment, le champ thématique « Modélisation des plantes et interactions génotype-environnement » ne fait alors nullement référence à la rhizosphère, pourtant au cœur des enjeux. Cela montre que les travaux sur la rhizosphère au sein du département EA se situaient alors davantage du côté des sciences du sol que de l'écophysiologie végétale, au moins en apparence. Avec le rapprochement de microbiologistes du sol issus des départements EA et SPE, un pôle de visibilité internationale sur l'écologie microbienne de la rhizosphère sera constitué sur Dijon à compter de 2003, autour de Philippe Lemanceau. Cependant, des travaux originaux relevant bien du champ de l'écophysiologie racinaire seront alors conduits dans plusieurs unités du département EA, notamment sur l'alimentation hydrique en Avignon, sur la nutrition phosphatée à Montpellier et sur l'exsudation racinaire à Nancy.

Au cours des années 2000, trois évolutions majeures ont marqué la communauté travaillant sur la rhizosphère, en France et au niveau international :

- la communauté du département EA a développé le couplage entre la dynamique de l'architecture racinaire et différentes fonctions rhizosphériques. Ainsi, les travaux conjoints des unités PSH et Emmah en Avignon ont permis une représentation inédite des flux et des états de l'eau dans une rhizosphère structurée par l'architecture racinaire hydraulique¹⁸⁵. De manière similaire, la modélisation des flux de carbone vers la rhizosphère, entre les unités PSH (Avignon) et LAE (Nancy), a bénéficié d'une vision intégrant cette dynamique de développement. La rhizosphère est en effet le lieu de nombreux gradients, en lien avec les flux de matières entre le sol et les racines, de sorte que sa géométrie et, *in fine*, son extension spatiale varient considérablement suivant les processus considérés¹⁸⁶. Il en

185. Doussan C., Pierret A., Garrigues E., Pagès L., 2006. Water uptake by plant roots: II. Modeling of water transfer in the soil-root system with explicit account of flow within the root system. *Plant and Soil*, 283, 99-117.

186. Pagès L., 2011. Links between root developmental traits and foraging performance. *Plant Cell and Environment*, 34, 1749-1760.

Encadré 14.1. L'initiation des congrès Rhizosphere

L'organisation de la première conférence internationale à Munich, en septembre 2004, a été un événement majeur pour marquer le centenaire du concept élaboré par Hiltner en 1904 dans cette ville de Bavière, tout en rassemblant les disciplines et les interfaces. Le congrès Rhizosphere de 2004 a ainsi réuni 480 participants et mis à l'honneur des travaux de chercheurs du département EA. Au vu du succès de cet événement international, il a alors été décidé d'inaugurer une série de conférences à intervalles de trois, puis quatre ans.

La conférence Rhizosphere 2*, organisée à Montpellier en 2007, a été celle qui a réuni le plus de participants (570) depuis lors. Les suivantes ont eu lieu à Perth (Australie, 2011), Maastricht (Pays-Bas, 2015), et la prochaine est prévue à Saskatoon (Canada, 2019), montrant clairement la dimension internationale de cette communauté très active.

* <http://www1.montpellier.inra.fr/rhizosphere-2/>.

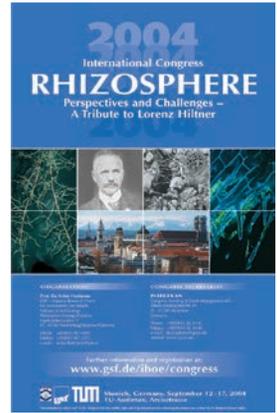


Figure 14.1. Congrès Rhizosphere de 2004.

résulte que des traits racinaires, comme la longueur spécifique, sont particulièrement pertinents pour l'acquisition de ressources peu mobiles dans le sol telles que le phosphore (les ions phosphates ne diffusent que sur des distances millimétriques), alors qu'ils le sont moins pour des ressources susceptibles de diffuser à grande distance telles que l'eau ou l'azote nitrique (le rayon d'action des racines atteignant dans ce cas plusieurs centimètres). Jusqu'alors, ces processus et les flux associés avaient été essentiellement étudiés en 1D, notamment dans les démarches expérimentales et les modèles appréhendant le fonctionnement de la rhizosphère. L'intégration du fonctionnement des racines dans des modèles en 2D ou 3D rendant compte de l'architecture des systèmes racinaires a permis de mieux comprendre le fonctionnement de la plante entière en interaction avec le sol¹⁸⁷. Au niveau international, les travaux d'imagerie et de modélisation de l'architecture physique de la rhizosphère, brillamment exposés par Iain Young lors du congrès Rhizosphere 2 à Montpellier en 2004, ont ouvert la voie vers la prise en compte explicite de la complexité de ce micro-environnement et de la diversité des niches écologiques qu'il représente pour les communautés microbiennes des sols ; – l'explosion des recherches en écologie microbienne, décuplée par les approches et outils moléculaires, a permis à l'unité de Microbiologie des sols de Dijon de mettre en évidence des effets de la rhizosphère sur les communautés microbiennes impliquées dans des fonctions d'intérêt agronomiques ou environnementales telles que les cycles biogéochimiques et la santé des plantes¹⁸⁸, en lien avec la synthèse de sidérophores ou la dégradation de pesticides. Ainsi, les travaux conduits à Dijon ont montré que la biodégradation de plusieurs herbicides, dont l'atrazine, était



Figure 14.2. Conférence Rhizosphere de 2007.

187. Dunbabin V.M., Postma J.A., Schnepf A., Pagès L., Javaux M., Wu L.H. *et al.*, 2013. Modelling root-soil interactions using three-dimensional models of root growth, architecture and function. *Plant and Soil*, 372, 93-124.

188. Raaijmakers J.M., Paulitz T.C., Steinberg C., Alabouvette C., Moëgne-Loccoz Y., 2009. The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant and Soil*, 321, 341-361.

plus forte dans la rhizosphère que dans le reste du sol¹⁸⁹. L'effet « rhizosphère » bénéfique à la biodégradation de l'atrazine n'était pas expliqué par le mucilage du maïs, suggérant que d'autres facteurs chimiques et/ou physiques spécifiques de la rhizosphère du maïs pouvaient l'expliquer. Par ailleurs, l'utilisation de ces outils par cette équipe de l'unité de Microbiologie des sols, devenue depuis l'UMR Agroécologie de Dijon, a également montré une influence différentielle de la rhizosphère sur l'activité, l'abondance et la diversité des communautés microbiennes impliquées dans le cycle de l'azote telles que les dénitrifiants¹⁹⁰ ;

– l'écologie de la rhizosphère, qui dans l'esprit de nombreux scientifiques concerne principalement l'écologie microbienne, a révélé une complexité supérieure au travers de la prise en compte des interactions multi-trophiques dont elle est le siège, impliquant la faune du sol et particulièrement la microfaune prédatrice des micro-organismes. Cette idée a notamment été développée en Europe au sein d'un réseau européen (Marie Curie Research Training Network Biorhiz) avec la participation active des UMR LAE (Nancy) puis Eco&Sols (Montpellier). La faune du sol intervient en outre au travers de processus non trophiques mettant en jeu une signalétique hormonale qui commence à peine à être prise en compte. Les plantes ne sont pas en reste dans cette communication souterraine, comme l'ont montré en France (et notamment à l'Inra dans les départements SPE et EFPA) les travaux sur le dialogue moléculaire impliqué dans l'établissement des symbioses mycorhiziennes et rhizobiennes. À l'étranger, des travaux plus récents ont montré que les racines sont capables d'émettre des appels au secours sous la forme de composés volatils qui attirent des nématodes entomophages pour les débarrasser de larves d'insectes herbivores. Cette communication souterraine qui commence à être comprise renouvelle profondément nos points de vue sur la vie dans les sols¹⁹¹.

► La rhizosphère dans le monde aujourd'hui et demain : vers de nouveaux enjeux

Au vu des progrès scientifiques accomplis et à accomplir, un ouvrage de référence a vu le jour au début de la décennie actuelle, à l'initiative de la communauté scientifique française et notamment de l'Inra, *Rhizosphere: Achievements and Challenges* (encadré 14.2), synthèse des processus écologiques dont la rhizosphère est le siège et de leurs possibles applications. À cette même période de la fin des années 2000, la prise de conscience de la nécessité d'investir dans le champ de l'intensification écologique transparait dans le premier appel à projets du programme Systema de l'ANR (en 2008), qui ouvre de nouvelles opportunités pour tendre vers une « intensification de l'usage des processus écologiques » et, en particulier, « concevoir le pilotage des fonctions écologiques des sols ». Il faudra attendre 2011, avec l'émergence des enjeux structurants dans le SSD 2011-2015

189. Piutti S., Hallet S., Rousseaux S., Philippot L., Soulas G., Martin-Laurent F., 2002. Atrazine accelerated mineralisation in maize rhizosphere soil. *Biology and Fertility of Soils*, 36, 434-441.

190. Henry S., Texier S., Hallet S., Bru D., Dambreville C., Chèneby D. *et al.*, 2008. Disentangling the rhizosphere effect on nitrate reducers and denitrifiers: insight into the role of root exudates. *Environmental Microbiology*, 10, 3082-3092.

191. Bais H.P., Park S.-W., Weir T.L., Callaway R.M., Vivanco J.M., 2004. How plants communicate using the underground information superhighway. *Trends in Plant Science*, 9, 26-32.

Encadré 14.2. Un ouvrage de synthèse qui a fait référence

Rhizosphere: Achievements and Challenges (Dessaux *et al.*, 2010) ainsi que le numéro spécial correspondant de *Plant and Soil*, paru en 2009, ont été coédités, à leur initiative, par Yves Dessaux (CNRS), Philippe Hinsinger (Inra département EA) et Philippe Lemanceau (Inra département SPE) : ils ont rassemblé vingt synthèses qui ont fait date, impliquant, parmi de nombreux collègues spécialistes du monde entier, une douzaine d'auteurs Inra des départements EA, EFPA et SPE. Ces vingt synthèses totalisent à ce jour près de 3 500 citations, cinq d'entre elles comptant 300 à 500 citations dans le Web of Science en 2018.

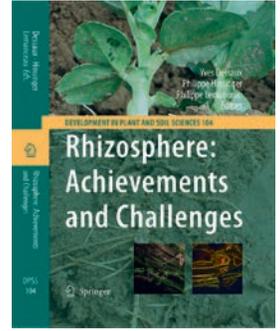


Figure 14.3. Couverture de l'ouvrage *Rhizosphere: Achievements and Challenges*.

du département EA, pour que l'intensification écologique devienne un de ses quatre enjeux majeurs. C'est cependant dès l'année 2008 que, lors de son évaluation, le département EA a accompli en quelque sorte une « révolution culturelle », revenant sur l'idée de concentrer ses efforts de recherche sur quelques espèces modèles, et déployant des travaux sur des peuplements complexes et sur les processus écologiques mis en jeu dans les agroécosystèmes, s'inscrivant résolument dans le cadre de l'intensification écologique de l'agriculture. Cette (r)évolution est illustrée par les recherches initiées alors en collaboration avec l'équipe chinoise de FuSuo Zhang sur le partage de ressources en nutriments au sein de la rhizosphère de peuplements plurispécifiques tels que les cultures associées céréales-légumineuses, à l'UMR Eco&Sols à Montpellier¹⁹², puis en collaboration avec l'UMR AGIR à Toulouse. Ce n'est que tout récemment, dans le SSD 2016-2020 du département EA, que « prendre en compte les traits racinaires et rhizosphériques dans les modèles de culture » a figuré parmi les fronts de science identifiés autour de la « Production végétale pour de nouveaux usages et contextes ». De façon moins explicite, les travaux sur la rhizosphère contribuent désormais aussi à un autre front de science identifié dans l'enjeu structurant autour de la « Valorisation et gestion de la biodiversité dans les agroécosystèmes » : il s'agit de « comprendre, modéliser et valoriser les mécanismes d'interactions biotiques multiples et leur pilotage par les pratiques culturales et le génotype des plantes ». Enfin, deux autres fronts de science identifiés dans le cadre de l'enjeu structurant « Bouclage des cycles N-P et stockage du carbone dans les sols » s'appuient largement sur les travaux conduits sur l'acquisition des nutriments dans la rhizosphère, la fixation symbiotique de l'azote et, plus généralement, sur le rôle des communautés telluriques et des interactions plante-sol dans les cycles biogéochimiques et leurs couplages.

Trois évolutions majeures se dessinent désormais, auxquelles le département EA contribue :

- les enjeux de la fonctionnalité : les outils de modélisation fonctionnelle qui ont été développés ces dernières années entre les unités PSH, Eco&Sols et Emmah, en associant processus écophysiologicals et biogéochimiques, permettront d'explorer *in silico* et *in situ* la diversité des situations offertes en croisant de nombreux génotypes et environnements. Outre les modèles biophysiques, les outils moléculaires utilisés pour caractériser les communautés microbiennes, et plus encore les

192. Hinsinger P., Betencourt E., Bernard L., Brauman A., Plassard C., Shen J.B. *et al.*, 2011. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. *Plant Physiology*, 156, 1078-1086.

fonctions qu'elles assurent, devraient nous aider dans cette exploration pour aller vers une nouvelle écologie, plus fonctionnelle, de la rhizosphère. L'évolution rapide des technologies de séquençage haut débit de l'ADN et de l'ARN permet désormais d'étudier la diversité des communautés microbiennes totales et actives dans les sols. Le développement de ces approches permet de mieux comprendre les mécanismes par lesquels les plantes influencent, voire sélectionnent, les communautés microbiennes fonctionnelles, notamment pour les fonctions d'intérêt, qu'elles soient agronomiques ou environnementales. Les enjeux de connaissance actuels sur le microbiote font de la rhizosphère un des lieux d'investigation privilégiés en écologie microbienne et questionnent notre appréhension du monde végétal, au travers des concepts d'holobionte¹⁹³ ou de phénotype étendu ;

– les enjeux de la complexité spatiale de la rhizosphère et de sa dynamique temporelle : alors que l'immense majorité des données acquises dans ce domaine sont obtenues en microcosme, et sur des plantes au stade plantule, de nouveaux outils moins invasifs et des méthodologies d'investigation non destructives permettent d'appréhender l'évolution spatio-temporelle de certains processus rhizosphériques¹⁹⁴, y compris au champ, au cours de la vie d'une plante. Un vaste consortium allemand dirigé par Doris Vetterlein (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH) se lance actuellement dans cette grande aventure, tandis que des équipes françaises du département EA creusent la question littéralement en profondeur, notamment à l'UMR Eco&Sols (Montpellier). Il est en effet grand temps de se préoccuper du sous-sol, de quelques décimètres sous la surface jusqu'à plusieurs mètres de profondeur. L'écologie de la rhizosphère en profondeur est un terrain quasiment vierge à ce jour, et constitue une véritable nouvelle frontière absolument fascinante, et sans doute déterminante de l'adaptation au changement climatique, et peut-être aussi de son atténuation, *via* le stockage de carbone dans les horizons du sous-sol !

– les enjeux biotechnologiques : la prise de conscience de l'intérêt de considérer des traits racinaires/rhizosphériques est récente chez les généticiens et les sélectionneurs, mais elle s'amplifie nettement désormais, ouvrant des champs nouveaux pour l'application des connaissances sur les systèmes racinaires et leur fonctionnement rhizosphérique. Le développement d'outils à haut débit pour le phénotypage de traits racinaires tel qu'il est porté actuellement par l'UMR Agroécologie à Dijon devrait nous doter de capacités nouvelles¹⁹⁵ ; ce développement va jusqu'à la prise en compte de traits liés au microbiote rhizosphérique, en particulier aux communautés symbiotiques, tels que les nodosités de légumineuses ou les mycorhizes. Un autre domaine d'application des connaissances de l'écologie de la rhizosphère concerne les inoculants microbiens, qui demeurent assez peu couverts par l'Inra et le département EA à ce jour, tandis que de nombreux acteurs existent dans la communauté scientifique internationale et dans la sphère de la recherche-développement privée, et qu'il existe une vraie demande de données de référence sur cette question.

193. Vandenkoornhuysen P., Quaiser A., Duhamel M., Le Van A., Dufresne A., 2015. The importance of the microbiome of the plant holobiont. *New Phytologist*, 206, 1196-1206.

194. Roose T., Keyes S.D., Daly K.R., Carminati A., Otten W., Vetterlein D., Peth S., 2016. Challenges in imaging and predictive modeling of rhizosphere processes. *Plant and Soil*, 407, 9-38.

195. Jeudy C., Adrian M., Baussard C., Bernard C., Bernaude E., Bourion V. *et al.*, 2016. RhizoTubes as a new tool for high throughput imaging of plant root development and architecture: test, comparison with pot grown plants and validation. *Plant Methods*, 12, 31.

► La rhizosphère au cœur des défis de la transition agroécologique

Un des objectifs majeurs est d'utiliser les interactions plantes-micro-organismes dans un contexte d'agriculture durable et afin de réduire la dépendance aux intrants chimiques (fertilisants et phytosanitaires). Pour cela, il s'agit de mieux comprendre les mécanismes par lesquels les racines et les micro-organismes présents dans le sol et dans la rhizosphère sont capables non seulement d'augmenter la disponibilité des nutriments pour les plantes, mais aussi de protéger celles-ci contre des bioagresseurs et des stress hydriques, thermiques ou chimiques (ex. : métaux lourds). D'un point de vue opérationnel, cet enjeu repose sur l'identification des traits/génotypes de plantes, associée ou non à des pratiques innovantes permettant un recrutement plus efficace des micro-organismes ayant des effets bénéfiques avérés sur la santé et/ou la nutrition des plantes, et ce en prenant en compte les contraintes liées au changement climatique. Parmi ces pratiques innovantes figurent au premier rang des systèmes de culture qui font intervenir une plus grande diversité fonctionnelle dans le peuplement végétal (mélanges de variétés ou d'espèces cultivées, systèmes présentant plusieurs strates comme les systèmes agroforestiers ou incluant des plantes de service, etc.), puisqu'il est reconnu que les végétaux diffèrent considérablement dans leur aptitude à sélectionner des communautés microbiennes aux niveaux intraspécifique et interspécifique. Parmi ces communautés figurent en outre celles impliquées dans les deux symbioses majeures du monde végétal :

- la symbiose fixatrice d'azote, qui concerne principalement les légumineuses (Fabacées), est amenée à jouer un rôle de premier plan dans les systèmes de cultures agroécologiques, en substitution au recours massif aux engrais azotés dont l'empreinte environnementale est considérable ;
- la symbiose mycorhizienne concerne la majorité des espèces cultivées en leur permettant d'acquérir plus efficacement le phosphore du sol et de réduire ainsi la dépendance des cultures aux engrais phosphatés qui sont produits à partir d'une ressource non renouvelable et non substituable, les phosphates naturels, considérés désormais comme une matière première critique.

Outre ce rôle, il est maintenant reconnu que les mycorhizes constituent des réseaux mycéliens qui interconnectent les plantes voisines, qu'elles soient ou non de la même espèce, et interviennent ainsi dans les échanges de matière, notamment de nutriments, mais aussi dans les signaux moléculaires impliqués dans la communication du compartiment souterrain des agroécosystèmes. La compréhension de ces interactions souterraines complexes dont la rhizosphère est le siège, et qui concerne également des réseaux trophiques incluant de nombreux autres organismes telluriques, notamment parmi la faune du sol, ouvre de nouvelles perspectives pour la conception d'agroécosystèmes multiperformants, fondés sur une meilleure mobilisation des processus écologiques qui se produisent dans les rhizosphères des plantes cultivées ou associées.

Pour en savoir plus

- Dessaux Y., Hinsinger P., Lemanceau P., 2010. *Rhizosphere: Achievements and Challenges*, Springer, 538 p.
- Hinsinger P., Bengough A.G., Vetterlein D., Young I.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321, 117-152.
- Jones D.L., Nguyen C., Finlay R.D., 2009. Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface. *Plant and Soil*, 321, 5-33.
- Philippot L., Raaijmakers J.M., Lemanceau P., van der Putten W.H., 2013. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews in Microbiology*, 11, 789-799.
- Pierret A., Doussan C., Capowiez Y., Bastardie E., Pagès L., 2007. Root functional architecture: a framework for modeling the interplay between roots and soil. *Vadose Zone Journal*, 6, 269-281.
- Martre P., Quilot-Turion B., Luquet D., Ould-Sidi Memmah M., Chenu K., Debaeke P., 2015. Model-assisted phenotyping and ideotype design. In: *Crop Physiology. Applications for Genetic Improvement and Agronomy* (Sadras V.O., Calderini D.F., eds), Elsevier, 349-373.



PARTIE V

CONCEVOIR DES SYSTÈMES AGRICOLES POUR UN FUTUR DURABLE

La conception des idéotypes

Sophie Brunel-Muguet, Claude Doussan, Nadia Bertin, Michel Génard

► Liens génotype-phénotype : un tournant pour l'écophysiologie dans les années 1990

Si la révolution verte initiée dans les années 1960 s'est nourrie des progrès génétiques pour favoriser la création de variétés à haute performance dans des systèmes mécanisés et à forte utilisation d'intrants, le contexte actuel pousse à renouveler nos approches en prenant en compte de nouveaux enjeux : la sécurité alimentaire, la limitation des impacts environnementaux des systèmes de culture, et l'adaptation des cultures au changement climatique.

Il y a encore une vingtaine d'années, les généticiens et les améliorateurs des plantes étudiaient l'effet des interactions génotypes-milieux sur les performances des plantes en suivant des approches purement statistiques. Il était alors demandé aux agronomes de participer à l'interprétation de ces analyses dans une démarche d'« expert ». Depuis sa création, le département Environnement et Agronomie (EA) a été le moteur d'un renouvellement de ces approches en considérant les mécanismes liant les phénotypes aux génotypes, et leur modulation par l'environnement (essentiellement défini par le sol, le climat et les bioagresseurs présents), ainsi que les pratiques culturales.

Pour cela, un renforcement des collaborations entre généticiens, écophysiologistes et agronomes s'est opéré, conduisant au développement d'une démarche pluridisciplinaire et intégrative qui associe les informations génétiques (disponibles grâce à l'émergence des outils de génétique et de génomique) aux traits phénotypiques explicatifs de variables d'intérêt agronomique.

Ainsi, le nombre d'études auxquelles sont associées les sciences agronomiques et la génétique est en forte augmentation depuis les années 1990, d'après une analyse bibliométrique réalisée à partir des années 1980 (passant de 60 à 200 articles par an).

► Qu'est-ce qu'un idéotype et à quoi sert-il ?

Le concept d'idéotype s'est progressivement installé dans la réflexion agronomique depuis les années 1970 pour définir le mode de représentation de la plante idéale à sélectionner, possédant les caractères qui devraient lui conférer la meilleure adaptation à un système agricole considéré¹⁹⁶.

Si on exclut le cas simple où un caractère est contrôlé par un gène (ex. : résistance monogénique à un bioagresseur), les généticiens se heurtent encore à deux difficultés majeures pour la résolution desquelles le département EA a pu contribuer. La première difficulté réside dans la complexité des caractères qui sont l'objet de la sélection (ex. : rendement, qualité des produits, résistance aux maladies, efficacité d'utilisation de l'azote, adaptation à la sécheresse). Ces caractères résultent de nombreux processus imbriqués avec des effets *feed-back* et sont donc contrôlés par des réseaux de nombreux gènes. La seconde difficulté provient du fait que l'expression de ces caractères est aussi sous l'influence de l'environnement et des pratiques culturales. Ceci se traduit souvent par de fortes interactions génotype × environnement × conduite de cultures ($G \times E \times C$) qui rendent difficiles les travaux de génétique et leur application en sélection. Deux visions de l'amélioration des plantes émergent de ce constat : l'une privilégie la prise en compte fine de ces interactions dans les schémas de sélection afin de cibler l'innovation variétale dans un contexte spécifique, tandis que l'autre tend à les minimiser afin de faire une sélection plus généraliste. Cette dichotomie fait débat au sein du Comité technique permanent de la sélection des plantes cultivées (CTPS) pour l'inscription officielle de nouvelles variétés.

Initialement, les travaux mentionnant la notion d'idéotype visaient à définir de façon empirique une combinaison optimale de caractéristiques en adéquation avec des pratiques culturales et des conditions pédoclimatiques assez ciblées. Depuis, la modélisation prédictive a permis de tester différentes combinaisons sous des scénarios pédoclimatiques contrastés, avec l'objectif d'évaluer quantitativement l'effet de ces combinaisons sur les performances culturales. Associées à des analyses de sensibilité, les études ont alors cherché à hiérarchiser les traits des plantes en fonction de leur contexte de culture.

Ces approches sont relativement récentes au sein du département EA, puisque les premiers travaux remontent au début des années 2000 avec une forte occurrence depuis une dizaine d'années (85 % des publications recouvrent la période 2010-2018). Ces travaux ont principalement concerné des espèces fruitières (pommier, pêcher), des graminées fourragères, des grandes cultures (maïs, blé, pois), mais aussi des espèces tropicales (coton) ou encore des espèces modèles (*Medicago truncatula*, *Arabidopsis thaliana*, tomate), avec pour objectifs l'optimisation de l'architecture aérienne et l'interception lumineuse (pommier), la qualité du fruit (pêcher), la nutrition minérale, en particulier azotée (pois, maïs, *Arabidopsis thaliana*), la résistance aux pathogènes (pois, blé, tournesol), le stress hydrique (maïs, tomate, coton) ou encore la dégradabilité des composés pariétaux (maïs).

Les problématiques plus intégratives sont apparues plus tardivement et ont davantage utilisé la modélisation pour définir des idéotypes insérés dans des itinéraires techniques innovants (ex. : cultures en association).

196. Donald C.M., 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica*, 17 (3), 385-403.

Cependant, si la preuve est faite, grâce à des expérimentations numériques, que des combinaisons de caractères sont gages du maintien des performances, voire de leur amélioration dans des contextes agronomiques particuliers, force est de constater qu'encore peu de travaux d'amélioration variétale proviennent directement de la conception *in silico* d'idéotypes, ce qui souligne la nécessité de renforcer les interactions entre modélisateurs, écophysiologistes, agronomes et sélectionneurs.

► Des modèles à base de processus pour la recherche d'idéotypes

Historiquement, l'analyse des interactions $G \times E \times C$ visait à caractériser la stabilité des performances d'un génotype dans une large gamme d'environnements. Ces identifications et les prédictions des performances variétales reposaient essentiellement sur des modèles statistiques (analyse de variance, analyse en composantes principales, régression des moindres carrés partiels, etc.). Cependant, ces approches ne permettaient pas de donner une interprétation de l'origine des interactions $G \times E \times C$.

À partir des années 1990, un véritable saut conceptuel a été franchi par l'analyse des performances variétales au travers de l'utilisation de modèles simulant le système sol-plante-culture-atmosphère de façon détaillée. Ces modèles vont de l'échelle de l'individu « plante » à celle du peuplement (la parcelle) et combinent à la fois la représentation de la physiologie de la plante, des processus se déroulant dans le milieu (sol, atmosphère) et des interactions plante-milieu.

Les modèles de culture, à l'échelle de la parcelle, ont été les premiers intégrateurs d'interactions plante-milieu. Ils mettent en commun des connaissances entre agronomes (ex. : sur le développement de la plante et sa croissance), bioclimatologues (ex. : sur les transferts radiatifs et les émissions de composés gazeux) et spécialistes du sol (ex. : sur les transferts de l'eau, le cycle de l'azote et l'état structural du sol). Diverses équipes aux États-Unis, aux Pays-Bas, en Australie, et en France avec le département EA, ont développé des modèles de culture qui apportent tous leur point de vue sur le fonctionnement des parcelles cultivées.

Dans les années 2000, certains modèles ont représenté l'architecture de la plante et la croissance des organes qui la composent (tiges, feuilles, organes reproducteurs, racines). Couplés à des modèles physiologiques de complexités diverses en relation avec la croissance et l'acquisition des ressources, ces modèles architecturaux deviennent des modèles structure-fonction pouvant simuler le transfert de ressources ou de signaux, la compétition entre organes et la plasticité des réponses aux variations du milieu. Une communauté de chercheurs s'est structurée au niveau mondial d'où émerge la conception de ce type de modèles. Les chercheurs français, dont ceux du département EA, ont un bon *leadership* dans ce domaine. Il est certain que la création du département EA a favorisé, au sein de l'Inra, la collaboration entre spécialistes du microclimat, écophysiologistes et physiciens du sol, ce qui a permis le développement de modèles structure-fonction originaux (figure 15.1).

Les paramètres de ces modèles qui intègrent les processus de façon détaillée peuvent rendre compte du comportement du génotype (on parlera alors de coefficients génétiques). Ceci a ouvert la voie à la prévision *in silico* du comportement de génotypes dans différents environnements, plus ou moins variables dans

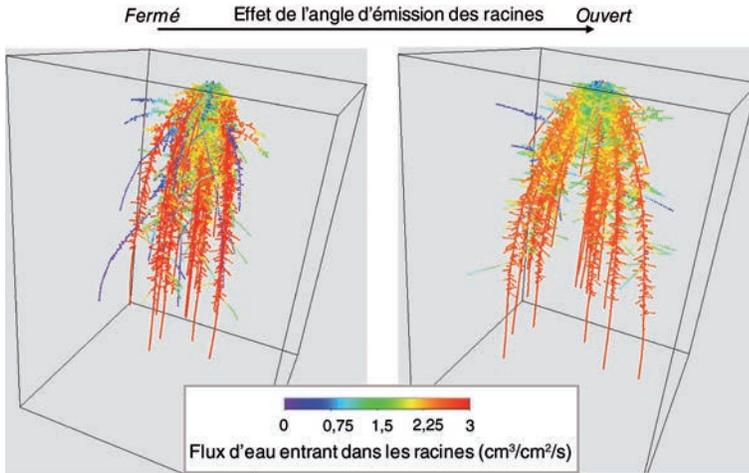


Figure 15.1. Quel phénotype favorise le prélèvement d'eau racinaire ? Un exemple du modèle structure-fonction SRI.

Effet simulé par le modèle SRI (Soil Root Interactions) de l'angle basal d'émission des racines sur le prélèvement d'eau par le système racinaire. Le système racinaire avec un angle plus fermé va plus en profondeur et montre un prélèvement plus intense également en profondeur par rapport au phénotype à angle ouvert. Ce type de trait sera sûrement plus favorable dans des situations où un manque d'eau rapide s'installe, pour aller capturer efficacement l'eau restante en profondeur.

Source : Doussan C., Lefeuvre-Mesgouez G., Pagès L., Dupuy L., Bérard A., Hinsinger P., Guiderdoni E., 2015. Which influence of root traits on water uptake? Results from a functional architectural soil-plant model. In: *Society of Experimental Biology (SEB) Meeting*, 30 juin-3 juillet 2015.

le temps. Cette caractéristique fait de ces modèles mécanistes des outils pertinents pour l'élaboration des programmes de sélection variétale.

Pour permettre la mutualisation de ces modèles et l'optimisation/simplification de leur utilisation, des plateformes de modélisation ont été développées par le département EA (ex. : plateforme Record).

Le principe d'une sélection variétale assistée par modèles à base de processus peut se décliner en trois étapes successives :

- la première étape doit déterminer les valeurs des coefficients génétiques qui permettent d'obtenir les caractères recherchés pour les idéotypes ;
- la deuxième étape est celle de la caractérisation des génotypes virtuels, qui permet d'obtenir des valeurs de coefficients génétiques proches de celles des idéotypes recherchés. Il s'agit d'identifier les combinaisons d'allèles associés à chaque coefficient génétique ;
- la dernière étape consiste soit à rechercher parmi les génotypes existants ceux qui se rapprochent le plus de l'idéotype défini pour un environnement donné, soit à proposer des stratégies de croisements permettant d'obtenir les génotypes recherchés sur la base de ces idéotypes. Pour cela, les modèles à base de processus, intégrant l'action des gènes sur leurs coefficients génétiques, peuvent être couplés à des modèles simulant le changement génotypique au cours d'un programme de sélection.

Des équipes américaines et de l'université de Wageningen aux Pays-Bas ont été les premières à explorer ces étapes, mais le département EA a été et continue d'être un des acteurs phares des recherches menées sur ces différentes étapes.

► Apparition de méthodes et de démarches adaptées pour la recherche d'idéotypes

Les modèles à base de processus sont des outils complexes non seulement par le détail mécanistique et le nombre d'équations les constituant, mais aussi par le nombre de paramètres et de facteurs d'influence (ex. : variabilité pédoclimatique) considérés. C'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser des méthodes d'analyse de leur comportement, ainsi que des méthodes de calibration et d'optimisation adaptées. Ces méthodes recouvrent, d'une part, l'analyse de sensibilité pour identifier les paramètres les plus influents ainsi que les interactions entre paramètres et, d'autre part, la calibration et l'optimisation des modèles, nécessaires pour estimer un paramètre ou une combinaison de paramètres satisfaisant un ensemble de conditions (correspondant à un idéotype).

Ces méthodes, bien maîtrisées par les chercheurs du département MIA de l'Inra, se diffusent progressivement dans la communauté des chercheurs du département EA travaillant sur la modélisation des idéotypes (quelques articles du département EA dans ProdInra sur 1998-2018), notamment au travers des rencontres et écoles-chercheurs régulières du réseau Mexico¹⁹⁷ du département MIA.

Une difficulté importante réside dans l'estimation des paramètres « génétiques », qui sont soit mesurés (situation idéale) par un phénotypage adapté, soit estimés statistiquement à partir des données issues du phénotypage de traits prédits par le modèle. Aussi, l'émergence récente des dispositifs de phénotypage (voir encadré 8.1) recouvrant des plateformes de culture en conditions contrôlées, semi-contrôlées et de plein champ, haut débit ou non, mais aussi des plateformes dédiées aux analyses métaboliques, illustre la cohérence du département EA avec les objectifs de modélisation qu'il affiche. Les projets associés visent ainsi à développer un réseau d'infrastructures et de méthodes de phénotypage haut débit¹⁹⁸.

► Le réseau Qualité des produits récoltés, un acteur des recherches sur les idéotypes

La thématique principale de ce réseau, créé en 2004, consiste à comprendre le contrôle environnemental et génétique de la qualité (organoleptique, nutritionnelle, technologique) des produits végétaux récoltés. Ces produits sont les grains (céréales, légumineuses à graines, oléoprotéagineux) et les fruits (ex. : raisins, pommes, pêches, tomates). Les recherches menées dans le réseau sont multi-échelles, de la cellule à la canopée en passant par la plante, en conditions contrôlées ou naturelles de culture. Elles sont axées sur le développement et la croissance des produits récoltés, leur sensibilité aux bioagresseurs, leur composition en métabolites primaires (ex. : sucres, acides, acides aminés, protéines, acides gras) et secondaires (ex. : caroténoïdes, polyphénols, vitamines), ces derniers ayant une importance particulière pour la nutrition humaine et la santé des plantes (protection contre les bioagresseurs).

La conception de modèles de fonctionnement intégré du fruit et du grain pour lesquels les équipes du réseau sont pionnières (elles ont été les premières au niveau

197. <https://reseau-mexico.fr>.

198. Par exemple PhénoMe, 2012, <https://www.phenome-fppn.fr/>.

Encadré 15.1. Conception par modèle d'idéotypes centrés sur la qualité des produits

Plusieurs modèles écophysiologiques d'élaboration de la qualité ont été développés notamment pour les fruits (espèces pérennes ou annuelles), qui contribuent au développement d'approches intégrées permettant de concilier des objectifs de rendement et de qualité. D'abord centrée sur le calibre, la masse fraîche et la composition en métabolites primaires, cette modélisation tend aujourd'hui à se complexifier, en intégrant le métabolisme secondaire et la valeur santé des produits, ou encore l'aptitude à la conservation et à la transformation. Grâce à l'optimisation multicritère des paramètres des modèles, il devient possible de définir des idéotypes répondant à des critères souvent antagonistes, de rendement et de qualité. Par exemple pour la tomate, la taille des fruits est souvent antagoniste de la qualité gustative. La recherche de compromis entre la réduction du calibre des fruits et l'amélioration de leur qualité gustative, notamment en condition de déficit hydrique, a mis en avant de nouvelles hypothèses sur l'importance des propriétés biophysiques des tissus conducteurs dans le pédicelle du fruit.

international à concevoir ce type de modèle) a été stratégique pour le département EA, des ponts ont ainsi été créés avec la génétique et la biologie végétale. L'intégration des processus dans des modèles a apporté une vision plus systémique et une meilleure compréhension du comportement de la plante et des effets de l'environnement (température, rayonnement, disponibilité en eau ou en éléments nutritionnels) sur l'élaboration de la qualité des produits végétaux. Elle a permis aussi d'envisager une analyse de la variabilité intra et interspécifique de la qualité et de proposer des idéotypes de bonne qualité gustative, nutritionnelle et sanitaire (encadré 15.1).

► Conclusion

La démarche combinant modélisation prédictive et phénotypage de caractères d'intérêt mise en place dans le département EA a permis l'évaluation, à l'échelle des processus, de génotypes virtuels adaptés à une large gamme de conditions environnementales et de conduites des cultures en vue de la conception d'idéotypes. L'accompagnement du département EA dans cette démarche « du génotype au phénotype » s'est manifesté par sa forte implication pour structurer à l'échelle nationale les projets et partenariats publics-privés. Ceci s'est traduit par son soutien aux Programmes d'investissements d'avenir dans le domaine de la sélection et de la création de variétés innovantes.

► Pistes pour le futur... vers un changement de paradigme ?

En ce qui concerne le futur, l'évolution du contexte agroenvironnemental-santé et des enjeux associés doit nous amener à nous poser la question des thèmes absents (ex. : modèles de production végétale utiles pour la nutrition humaine), des équipes nationales et internationales avec lesquelles des collaborations seraient à renforcer (équipes travaillant sur la transformation des produits et sur la nutrition de l'Inra) et des outils nécessaires à la mise en place de cette démarche intégrative en identifiant les limites des dispositifs de phénotypage (de mesures, d'analyses

des données, ou encore de construction et d'accessibilité des bases de données). À moyen terme, ce bilan doit permettre de s'interroger, avec le département BAP, sur :

- les finalités résultant du couplage génétique-phénotype mais encore peu explorées, comme la sélection assistée par modèle (*virtual breeding*) ;
- la prise en compte de l'épigénétique comme nouvelle source de diversité à exploiter pour l'acclimatation des plantes aux stress environnementaux (ex. : sécheresse du sol, qualité de la lumière, contrainte mécanique), mais aussi comme potentiel de régulation de l'acquisition et de l'utilisation des ressources en lien avec certains traits de qualité ;
- l'intégration du métabolisme dans les modèles de plante et le couplage avec des réseaux de gènes simplifiés.

Cependant, ces réflexions sont basées sur un paradigme dominant, celui de l'amélioration génétique par l'intégration des combinaisons alléliques idéales dans une même plante. Il est pourtant certain qu'une approche plus holiste est nécessaire pour deux raisons. D'une part, l'intégration de plusieurs traits « bénéfiques » au sein d'un même individu peut s'avérer impossible du fait de leur incompatibilité. D'autre part, les systèmes de culture fondés sur des mélanges variétaux montrent généralement une plus grande stabilité des performances et d'efficience d'usage des ressources ; ceci questionne la notion d'intégration des traits, qui pourrait s'envisager au sein d'une population de plantes plurigénotypiques plutôt qu'au sein d'un génotype. À partir de là, ne doit-on pas envisager la notion d'idéotypes pour une population de génomes interagissant entre eux ?

Le département EA est déjà bien armé pour cette perspective, qui répond aux attentes liées à l'écologisation de l'agriculture. Il va s'agir de concevoir des idéotypes de mélanges de variétés ou d'espèces adaptés à un cadre environnemental non plus seulement physique mais également biotique, à des pratiques culturales qui évoluent en fonction d'innovations technologiques et numériques, mais aussi qui prennent en compte une gamme des performances des agroécosystèmes au-delà de la production agricole (services écosystémiques).

Pour en savoir plus

Debaeke P., Quilot-Turion B., 2014. *Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable*, Inra, 254 p., Écoles-chercheurs Inra, 1.

Martre P., Quilot-Turion B., Luquet D., Ould-Sidi Memmah M., Chenu K., Debaeke P., 2015. Model-assisted phenotyping and ideotype design. *In: Crop Physiology. Applications for Genetic Improvement and Agronomy* (Sadras V.O., Calderini D.F., eds), Elsevier, 349-373.

Quelles recherches sur la qualité des produits ?

Michel Génard, Nadia Bertin, Sophie Brunel-Muguét, Hélène Gautier, Zangwu Dai

La notion de qualité des produits récoltés a largement changé ces vingt dernières années en raison à la fois de l'évolution des contextes de production et de la demande exacerbée des consommateurs pour des produits sains, bons et respectueux de l'environnement. De ce fait, la qualité inclut aujourd'hui un ensemble de critères sensoriels, nutritionnels, environnementaux, sanitaires, technologiques, socio-économiques, et doit répondre à des besoins de santé humaine et animale. Le département EA s'est largement impliqué dans l'étude des mécanismes d'élaboration de la qualité au champ et dans l'analyse des interactions $G \times E \times C$ sur de nombreuses espèces (fruits et légumes, céréales, colza), notamment au travers du réseau de recherche « Déterminismes environnementaux de la qualité des produits récoltés ». Nos recherches ont porté essentiellement sur le développement et la croissance des produits récoltés, qui déterminent leur taille à la récolte, et leur composition en métabolites primaires (ex. : sucres, amidon, acides, acides aminés, protéines, acides gras) et secondaires. Alors que les composés primaires déterminent la qualité technologique, gustative et nutritionnelle (surtout en matière d'apport énergétique), les composés dits secondaires jouent un rôle important dans la qualité sensorielle (ex. : couleur, arômes) et dans la valeur santé des produits (ex. : caroténoïdes, flavonoïdes, curcumine, composés soufrés). Dans le domaine de la nutrition humaine et animale, l'impact des composés secondaires sur la santé des consommateurs est maintenant avéré du fait de leurs actions antioxydantes, anti-inflammatoires et hormonales. À l'opposé de ces effets bénéfiques, il faut aussi noter que certains composés secondaires végétaux peuvent avoir une action délétère sur l'organisme du fait de leur action chélatrice par exemple, aggravant ainsi les déficits en certains ions essentiels (ex. : chélation des polyphénols avec le fer et le zinc). Pour les écophysiologistes, les composés secondaires jouent également un rôle dans la santé de la plante, et leur synthèse fait partie des mécanismes de défense et d'acclimatation contre les stress biotiques ou abiotiques. Ainsi, la notion de qualité est devenue plus que jamais une notion plurielle qui justifie la prise en compte des composés secondaires dans des programmes de recherche du département EA traitant de la qualité des produits végétaux, et son ouverture vers des projets pluridisciplinaires.

Ces recherches ont nécessité de réunir autour des différentes espèces étudiées (blé, pois, colza pour les grains, et tomate, pêche, pomme, raisin, clémentine pour les fruits) des chercheurs de disciplines différentes : agronomes et écophysiologistes du département EA, mais aussi généticiens et biochimistes spécialistes du métabolisme ou de la transformation des produits.

Historiquement, les progrès génétique et agronomique ont surtout visé à augmenter les rendements et ont parfois conduit à altérer la qualité, créant ainsi des relations antagonistes entre critères, par exemple entre la taille du fruit et les teneurs en métabolites primaires et secondaires. Cependant ces relations ne sont pas irréversibles. Au sein du département EA et dans un contexte de changement climatique de plus en plus pressant (élévation des températures et baisse de l'alimentation hydrique principalement), des pratiques culturales innovantes et moins consommatrices en intrants sont apparues comme un levier possible pour améliorer la qualité tout en maintenant le rendement. Par exemple, l'utilisation de filets de couleur sur culture de tomates montre que la lumière rouge induit une augmentation de la surface foliaire des plantes, entraînant une augmentation du rendement, mais aussi celle du rapport sucre/acide des fruits. D'autres travaux ont montré qu'une diminution de la fertilisation azotée, généralement apportée de façon pléthorique en culture de tomate sous serre, permet d'augmenter la synthèse de composés de défense dans les tissus et la qualité nutritionnelle des fruits (teneur en vitamine C) sans modifier de façon significative le rendement. De même, un déficit hydrique contrôlé peut favoriser l'accumulation des sucres et modifier le rapport sucre/acide de la tomate, ou stimuler la synthèse de certains caroténoïdes sans trop réduire le rendement. En zone méditerranéenne, l'accès à la ressource en eau pour irriguer les cultures devient critique, conduisant à utiliser des eaux salines pour l'irrigation, ce

qui peut induire des stress oxydatifs entraînant l'accumulation de vitamine C ou de certains caroténoïdes.

Dans le cadre de l'adaptation au changement climatique, les chercheurs du département EA ont étudié l'effet de différents événements extrêmes (déficit hydrique, fortes températures) au cours du cycle de production sur des cultures de tomates afin d'identifier des périodes critiques pour l'accumulation des composés d'intérêt dans le fruit. Ils ont ainsi montré que pendant l'été, des températures excessives inhibent la synthèse de lycopène, entraînant des défauts de coloration des fruits et une dégradation de leur qualité nutritionnelle. Ils ont aussi montré, pour les grandes cultures à grains, que des températures maximales journalières de l'air au-dessus de 25 °C altèrent le fonctionnement des plantes et les caractéristiques nutritionnelles et physiologiques des grains (ex. : modifications des profils d'acides gras associées à une augmentation néfaste du ratio oméga-6/oméga-3 chez le colza ; modification des profils protéiques chez le pois associée à une diminution des teneurs en albumines et légumineuses ; diminution des teneurs en amidon chez le blé ; dégradation de l'aptitude à la conservation de la graine chez le colza, le blé et le pois). Chez les citrus, les températures trop élevées posent des problèmes de coloration des fruits, et chez plusieurs espèces (raisin ou citrus), les équilibres sucres/acides sont impactés au cours de la maturation.

Ces températures se produisent d'ores et déjà certains printemps et débuts d'été et expliquent en grande partie les variations interannuelles de ces critères de qualité. Par ailleurs, les projections climatiques laissent envisager une fréquence accrue de ces pics de chaleur entraînant des stress hydriques ponctuels. Ceci soulève de nouvelles questions relatives à ces épisodes extrêmes dont la répétition pourrait induire un effet mémoire bénéfique pour l'acclimatation des cultures à ces stress récurrents. Ces réflexions commencent à être intégrées dans des projets portés par des écophysiologistes du département EA en lien étroit avec les bioclimatologistes.

Enfin, la conception d'un modèle de fonctionnement intégré du fruit pour lequel les équipes du département EA sont pionnières a été stratégique pour le développement des recherches sur la qualité. En effet, le fruit est un système complexe dont le comportement est difficile à prévoir et à comprendre quel que soit le niveau d'analyse. L'intégration des processus dans un modèle unique (Fruit Virtuel) capable de prédire la croissance des fruits et leurs concentrations en sucres et acides a permis d'avoir une vision plus systémique et de mieux comprendre l'effet de la plante et de l'environnement sur le fonctionnement global du système « fruit ». Cependant, les composés secondaires n'ont fait que récemment l'objet de travaux de modélisation par les chercheurs du département EA, notamment sur les anthocyanes chez le raisin. Ces molécules sont importantes pour la couleur et pour leur rôle d'antioxydant. Le modèle réalisé permet de simuler l'évolution de la concentration de plus d'une dizaine d'anthocyanes en réponse à la lumière, à la fourniture en carbone et à la charge en fruits sur les vignes.

Un des points forts du Fruit Virtuel est sa capacité à prédire un bouquet de composantes de la qualité. Cette capacité est particulièrement importante, car les chercheurs du département EA ont montré que ces composantes étaient souvent interreliées, parfois antagonistes comme le sont la concentration en acide citrique et la taille du fruit chez la pêche, ou au contraire positivement corrélées comme c'est le cas de l'acide malique et du saccharose pour cette même espèce. Cette prise en compte a permis d'aborder *in silico* la recherche de conditions de culture afin d'obtenir un bouquet de composantes de la qualité désirée.

Le développement de cette approche Fruit Virtuel a aussi entraîné, d'un point de vue plus stratégique, la création de ponts avec la génétique, la biologie végétale et la phytopathologie, renforçant ainsi les interactions avec les départements BAP et SPE. Ces disciplines sont demandeuses de modèles pour analyser la variabilité génétique et pour intégrer les connaissances de base qu'elles produisent.

D'un point de vue plus prospectif, des projets de modélisation sont en cours avec les technologues pour faire le lien entre modes de culture, qualité à la récolte et devenir de cette qualité en post-récolte et lors de la transformation.

CHAPITRE 16

Protection intégrée des cultures : d'une combinaison de techniques à une valorisation de la biodiversité

*Françoise Lescourret, Jean-Noël Aubertot, Corinne Robert,
Nicolas Munier-Jolain, Antoine Messéan, Pierre Ricci*

► Mise en perspective de la contribution des agronomes du département à la protection intégrée des cultures

La protection intégrée des cultures (PIC, ou *integrated pest management*, IPM) trouve son origine dans les efforts menés dès les années 1950 par des entomologistes pour concilier lutte chimique et lutte biologique contre les ravageurs, avec le souci de préserver les régulations biologiques. Ce concept, initialement baptisé « lutte intégrée », s'est progressivement enrichi au fil des réflexions et des expériences : intégration d'une plus large gamme de méthodes de lutte, extension aux autres bioagresseurs (agents pathogènes et adventices inclus), objectif de gestion des populations par des interventions complémentaires sur les différents stades du cycle du bioagresseur, enfin ambition d'intégrer l'ensemble des bioagresseurs d'une culture ou d'un agroécosystème.

La PIC acquiert une visibilité internationale grâce à sa reconnaissance par la FAO en 1967 et au soutien qu'elle lui apporte, ainsi qu'à des succès enregistrés sur le terrain, comme le contrôle des ravageurs du cotonnier ou la maîtrise des pullulations catastrophiques de la cicadelle brune du riz en Asie consécutives à l'introduction d'un système de culture intensif par la révolution verte. Ces travaux mettent aussi en lumière que, au-delà des méthodes de lutte proprement dites, des facteurs variétaux, agronomiques et écologiques ont un rôle important et doivent être intégrés dans la PIC au titre des méthodes préventives.

La PIC se donne pour objectif de concilier les enjeux économiques et environnementaux en limitant les interventions à l'atteinte de seuils de nuisibilité économique (fondée sur des observations de terrain), en hiérarchisant les méthodes selon leur nuisibilité environnementale, et en autorisant la lutte chimique, mais seulement en dernier recours. Déclinée en principes généraux et en listes de recommandations par culture, elle a servi de référence dans des politiques publiques visant à réduire l'utilisation des pesticides. Ainsi, elle a été inscrite dans la politique nationale aux États-Unis en 1972, avec l'engagement en 1994 de l'appliquer à 75 % du territoire agricole d'ici 2000. Dans l'Union européenne, la directive 91/914, qui durcit le processus d'autorisation de mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques, et qui entraînera le retrait continu de substances actives (d'environ un millier en 1993 à 423 en 2013), introduit également le principe de la lutte intégrée. La directive 2009/128 qui la remplace rend en outre obligatoire l'observation de principes généraux de PIC dans les États membres depuis janvier 2014.

Nous allons voir dans les lignes qui suivent comment une politique scientifique volontaire de l'Inra et une dynamique scientifique poussée par des enjeux de société ont conduit les agronomes du département Environnement et Agronomie (EA) à apporter, avec les chercheurs du département SPE, leur contribution à la PIC sur une grande diversité de cultures (cultures annuelles, vigne, cultures maraîchères et fruitières, cultures sous serre, prairies). Pour cela (figure 16.1), ils se sont appuyés sur leurs objets de recherches spécifiques : les plantes cultivées, cibles des bioagresseurs et levier potentiel de leur régulation, notamment par leur génotype, mais aussi les pratiques culturales, qui modifient les populations de bioagresseurs

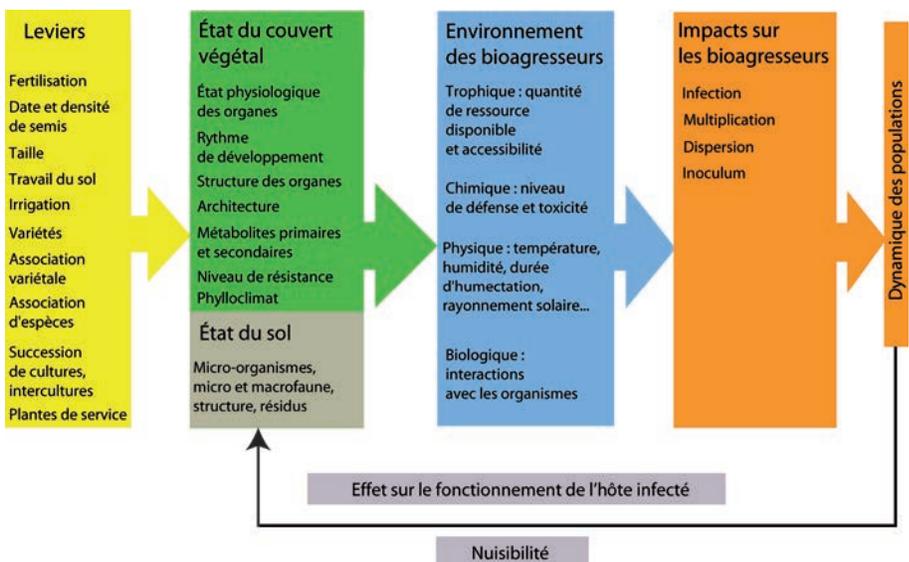


Figure 16.1. Travaux des agronomes du département EA sur les fondements techniques et bio-physico-chimiques de la PIC : on étudie, de façon analytique d'une part et systémique d'autre part, comment les leviers (pratiques, associations...), en changeant l'état des couverts végétaux et des sols, modulent l'environnement des bioagresseurs, lequel va déterminer leur développement ; on étudie également en retour la nuisibilité engendrée par ce développement.

et leur action en changeant leurs habitats et les conditions physico-chimiques de leurs cycles (notamment au niveau de la plante-hôte), leurs mouvements et leur dispersion. Au travers d'activités expérimentales et de modélisation, ils ont également contribué au développement d'une approche « système » visant à élucider le fonctionnement de l'écosystème agricole, incluant les bioagresseurs et leurs antagonistes, en interaction avec le système technique qui en modifie les états et les processus. Cette approche « système » répondait au souci de concrétiser le « I » de la PIC, et de travailler sur la robustesse et la résilience des systèmes de culture aux bioagresseurs, au-delà de l'introduction d'alternatives en substitution à la lutte chimique.

► 1998 : la nouvelle donne

Alors que des entomologistes Inra comptaient parmi les pères fondateurs de la lutte biologique et de la lutte intégrée en Europe dans les années 1960 et qu'une Action incitative programmée PIC était encore financée en 1987-1988, cette thématique tend à disparaître des priorités scientifiques de l'Inra dans la décennie suivante. Qu'est-ce qui lui permet de resurgir au tournant du siècle ? D'abord, la prise en compte de l'environnement non plus comme une simple préoccupation, mais comme un domaine d'investigation légitime pour l'Inra, en interaction avec l'agriculture et l'alimentation, où sont appelés à intervenir notamment deux nouveaux départements : EA et SPE, comme le signale le E de leurs intitulés. Ensuite, une réforme de la gouvernance interne visant à favoriser l'adaptation aux enjeux nouveaux par le décloisonnement d'un dispositif jusque-là « en silos » (chaque unité dirigée par un département, chaque département par une direction scientifique) au profit d'une logique de rattachements multiples et d'actions transversales.

En 1998, le collège de direction de l'Inra indique clairement ce qu'il attend de l'interaction entre disciplines agronomiques et de santé des plantes : à rebours de ce qui se passe sur le terrain, où pratiques « agronomiques » et pratiques « phytosanitaires » se sont déconnectées (on construit le rendement sur les premières, et on protège avec les secondes), il s'agit de travailler à (ré)intégrer le raisonnement phytosanitaire dans la conception des systèmes de culture. Le regroupement de disciplines opéré par la création du département EA (en particulier agronomie, écophysiologie et bioclimatologie), comme le rassemblement dans le département SPE des phytopathologistes, entomologistes, malherbologues (ce qui permet une approche intégrée des contraintes biotiques) et la coanimation des deux départements par la même direction scientifique Environnement, forêt et agriculture (dirigée par Jean Boiffin) constituent les prémices de l'action à mener.

Dès cette époque, des collaborations se nouent entre épidémiologistes du département SPE et écophysiologistes et bioclimatologistes du département EA pour mener des recherches qui considèrent la plante-hôte, ses bioagresseurs et l'environnement physique de façon intégrée et équilibrée. Des travaux sont conduits sur la nuisibilité des maladies pour établir des seuils de traitement. On étudie la dispersion des spores de champignons pathogènes dans sa dimension physique. Dans le même temps, l'expérimentation-système, dite « La Cage », est mise en place sur l'unité expérimentale de Versailles pour évaluer et comparer les performances agronomiques, économiques, sociales et environnementales de

quatre systèmes de culture en grandes cultures : un système conventionnel visant des niveaux de rendement élevés ; un système intégré visant à maintenir la marge économique tout en diminuant les quantités d'intrants ; un système en agriculture biologique ; un système en agriculture de conservation. Des leviers majeurs de la PIC sont introduits dans les trois derniers systèmes de culture : les résistances variétales et les pratiques culturales (dates et densité de semis) pour lutter contre les maladies cryptogamiques ; la couverture végétale pour gérer la compétition entre la culture et les adventices pour le système en agriculture de conservation.

► 1999-2003 : la mobilisation

L'élément déclenchant de cette mobilisation est le rapport demandé en 2000 par Jean Boiffin à Philippe Lucas (SPE) et Jean-Marc Meynard (EA) sur la PIC à l'Inra. Analysant les critiques adressées à ce concept, les auteurs proposent de ne plus se limiter à la recherche d'alternatives à la lutte chimique, mais de mettre le fonctionnement de l'agroécosystème au cœur de la réflexion, avec une double entrée : l'analyse du risque phytosanitaire associé au choix des pratiques agricoles et l'intégration des moyens de protection aux autres composantes du système de culture, pour déboucher sur la construction et l'évaluation de stratégies de protection (tableau 16.1).

Tableau 16.1. Positionnement de la PIC selon deux dimensions, spatiale (de la parcelle à la région) et temporelle (de l'ajustement tactique au système de culture) (d'après le rapport de P. Lucas et J.-M. Meynard, 2000).

	Parcelle (1 à 10 ha)	Îlot de parcelles (10 ² à 10 ³ ha)	Région (10 ⁴ à 10 ⁵ ha)
Ajustement tactique	Ajuster les traitements en fonction de la nuisibilité prévue des ennemis et des effets non intentionnels	Choisir les « parcelles-guides » qui révéleront les risques parasitaires	Prévoir les risques parasitaires en fonction du climat de l'année
Stratégie de campagne (itinéraires techniques)	Par des itinéraires techniques appropriés, réduire le développement des populations de bioagresseurs, leur nuisibilité, et maximiser l'efficacité des méthodes de lutte non chimiques	– Maîtriser les contaminations de proximité – Créer des zones refuges pour auxiliaires	Diversifier les sources de résistance génétique
Stratégie à long terme (systèmes de culture)	Réduire l'inoculum ou les stocks de semences dans la parcelle grâce au système de culture	Entretien des zones refuges pour auxiliaires	Coordonner les moyens de lutte variés pour préserver la durabilité des résistances et l'efficacité des moyens peu néfastes

Ce rapport fournit la trame d'une action transversale structurante (ATS PIC, 2001-2003) lancée pour mobiliser des chercheurs autour d'un appel à idées, puis coconstruire des projets portés par des groupes pluridisciplinaires. Capitalisant sur l'Action incitative programmée Ecopath (1998-2000), qui relayait elle-même une dynamique engagée dans les années 1990 à l'initiative d'épidémiologistes, d'agronomes, de bioclimatologistes et d'écophysiologistes, l'ATS PIC soutient finalement dix projets organisés par grands types de culture : grandes cultures (blé, pois, colza), cultures légumières de plein champ métropolitaines et tropicales, cultures

sous abri (tomate, rosier) et cultures pérennes (vigne, arbres fruitiers), qui mobilisent une trentaine d'unités et associent des partenaires professionnels des diverses filières. L'action est également ouverte aux départements Génétique et amélioration des plantes (GAP) et SAD.

En parallèle, des projets PIC trouvent à s'intégrer dans des actions à enjeux plus larges : action Production fruitière intégrée (2000-2003), tentative de programmation et d'animation de la filière fruitière, avec un module où est expérimentée l'articulation entre modèles concernant la culture et ses bioagresseurs ; action « Impact et acceptabilité des innovations variétales » (2001-2003) sur un volet concernant la conduite bas intrants de variétés de blé dites « rustiques ». Ces deux actions amènent à replacer la vision biotechnique de la PIC dans son contexte socio-économique et agroenvironnemental.

► 2004-2006 : la consolidation

La Politique agricole commune inscrit les préoccupations environnementales dans ses objets, et la critique des pesticides prend de l'ampleur dans l'opinion. Dans ce contexte, les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Écologie confient à l'Inra et au Cemagref la conduite d'une expertise collective sur l'utilisation des pesticides et les moyens de la réduire. L'expertise mobilise de nombreux chercheurs des départements SPE et EA (voir chapitre 4). Elle aura un fort impact dans le débat du Grenelle sur les pesticides. Elle démontre la grande dépendance de l'agriculture française aux pesticides, souligne les limites de la lutte raisonnée et insiste sur la nécessité de promouvoir une protection intégrée passant par une reconception des systèmes de culture pour atteindre des objectifs ambitieux de réduction de l'utilisation des pesticides et de leurs impacts environnementaux.

Les départements EA et SPE décident alors de se concerter pour dépasser le stade incitatif et inscrire la recherche sur la PIC dans des dispositifs pérennes. L'intervention du département EA apporte à cette recherche, initialement portée par des épidémiologistes, une contribution originale : grâce aux écophysiologistes, dont l'analyse des effets réciproques entre couvert végétal et bioagresseurs renseigne les liens entre l'état de la culture, l'évolution des épidémies et la nuisibilité ; grâce à l'agronomie systémique, qui fournit un corpus de concepts et méthodes pour représenter, construire, évaluer et expérimenter des systèmes de culture.

Pour assurer une acculturation durable entre ces disciplines, les deux départements s'efforcent de rassembler leurs équipes soit dans des unités de recherche en coresponsabilité : dynamique déjà engagée sur les adventices à Dijon (encadré 16.1) et poursuivie à Sophia Antipolis (cultures sous serres) et Avignon (arboriculture) ainsi qu'à Dijon sur le compartiment sol ; soit à proximité immédiate : Grignon (grandes cultures), Guadeloupe (cultures tropicales).

Des expérimentations visant à concevoir des systèmes de culture initiées dans l'ATS PIC pour comparer l'effet de stratégies de protection ont vocation à être maintenues dans la durée. En accord avec le département GAP, un espace leur est dédié dans plusieurs unités expérimentales, notamment à Dijon-Époisses (grandes cultures), Bordeaux-Couhins (vigne), Gotheron (arboriculture) et Sophia Antipolis (cultures sous serres). Un réseau PIC est créé en 2004 pour assurer une animation collective ; toujours actif et élargi au Cirad, il est devenu un creuset de la réflexion sur la PIC.

Encadré 16.1. Création et dynamique de l'unité Biologie et gestion des adventices

La gestion des adventices en grandes cultures est un domaine privilégié de la protection intégrée, car les molécules herbicides dans les eaux sont sources de préoccupations environnementales et sociétales. Les adventices persistent pour la plupart durablement dans le sol sous forme de graines, bulbes ou rhizomes, de sorte que leur gestion se raisonne à une échelle pluriannuelle. Du fait de la perception des risques à long terme, les agriculteurs sont souvent démunis pour limiter leur dépendance aux herbicides.

À la fin des années 1980, il n'y avait pas de véritable agronomie de la flore adventice à l'Inra. L'unité de Malherbologie de Dijon (département de Pathologie végétale) conduisait des travaux d'écologie botanique afin de mieux connaître la biologie des espèces et de quantifier les stocks semenciers des sols agricoles, mais conduisait aussi des expérimentations au champ pour évaluer la nuisibilité des espèces avec une perspective de pilotage des décisions de désherbage (définition de seuils de nuisibilité), ou encore des travaux sur la génétique de la résistance aux herbicides. La thèse de Philippe Debaeke, soutenue en 1987, a ouvert la voie en démontrant comment une approche analytique permettait de comprendre les effets des systèmes de culture sur l'évolution démographique des adventices. Il a mis en place les bases de la modélisation de la dynamique démographique des communautés, fondée sur le cycle biologique des plantes annuelles, et adapté un modèle de culture pour simuler les relations de compétition culture/adventices.

Au milieu des années 1990, avec la montée des pressions sociétales sur les pesticides et notamment les herbicides, J. Boiffin, alors chef du département d'Agronomie, pressent le besoin de développer cette agronomie de la flore adventice, et met en place une nouvelle équipe à Dijon (deux chercheurs et un ingénieur). Cette équipe doit bénéficier des compétences locales d'écophysiologie et de malherbologie, ce qui conduit à la fusion des unités d'Agronomie et de Malherbologie pour former la future unité Biologie et gestion des adventices (BGA). Les travaux conduits par cette équipe se revendiquent explicitement de la protection intégrée, avec trois approches complémentaires :

- la modélisation des effets des systèmes de culture en interaction avec le climat et les états du milieu sur la démographie des adventices. Elle a d'abord concerné une seule espèce, avec le modèle AlomySys sur le vulpin des champs. Elle a ensuite porté, avec FlorSys, sur une flore multispécifique (toutes espèces d'adventices) et sa compétition pour la lumière avec une culture donnée. Le paramétrage de FlorSys a nécessité la relance de travaux d'écologie comparative des espèces ;
- l'expérimentation pluriannuelle de systèmes de culture, d'abord pour la gestion de vulpins résistants aux herbicides à Lux, puis à Époisses pour la gestion d'une communauté plurispécifique et la réduction de la dépendance aux herbicides. Ces deux dispositifs expérimentaux ont permis de démontrer l'efficacité de combinaisons de leviers d'action à effets partiels ;
- des travaux sur les processus décisionnels en matière de désherbage, avec des enquêtes sur les processus décisionnels des agriculteurs (collaboration des départements EA et SAD), une analyse critique du concept de seuil d'intervention pour le déclenchement des traitements, et le développement d'un prototype d'outil d'aide à la décision pour le désherbage (Decid'Herb), mimant les processus décisionnels complexes et multicritères.

Évidemment, tous les travaux sur les adventices et la protection intégrée menés à l'Inra au cours de cette période ne sont pas dijonnais. La composante adventice est prise en compte par différentes équipes du département EA, à Grignon et à Toulouse en particulier.

Depuis les années 1990, et en particulier au cours de la dernière décennie, les recherches sur la protection intégrée contre les adventices se sont diversifiées : la modélisation de la compétition racinaire vient compléter le modèle FlorSys, permettant d'objectiver des règles de pilotage de la fertilisation pour limiter la croissance des adventices ; le développement de systèmes agricoles en semis direct a naturellement nécessité de lancer des études sur les effets des états du milieu en l'absence de travail du sol, ainsi que des couverts végétaux, de leurs modes d'implantation et de destruction ; le recrutement de compétences en écologie a contribué à mieux considérer des processus de régulation des infestations négligés jusque-là (prédation par des organismes granivores), souvent plus gérés à l'échelle paysagère qu'à l'échelle de la parcelle agricole, et à prendre en compte la contribution de la flore adventice à la biodiversité comme un nouveau critère de durabilité ; des méthodes d'investigation nouvelles se développent, fondées sur l'analyse de gros jeux de données provenant de sites ateliers et de réseaux.

► 1999-2006 : les résultats de la dynamique scientifique

Les recherches sur l'effet de l'architecture des plantes et du couvert végétal sur les bioagresseurs (essentiellement les champignons pathogènes) *via* la modification de leur environnement se sont intensifiées. Au-delà du pédoclimat, l'architecture des couverts dépend fortement des génotypes et des pratiques culturales. Dans le cas des agents pathogènes aériens, elle détermine la quantité de surface pouvant être infectée et sa dynamique, les distances à parcourir par les spores depuis les feuilles infectées vers les feuilles saines, et le microclimat, important pour le développement du pathogène. Ces travaux atteignent durant la période des niveaux élevés de maturité et d'interdisciplinarité, avec la contribution conjointe de chercheurs des départements EA, SPE, GAP et MIA au sein du réseau Épidémiologie et architecture (ÉpiArch). Grâce à des expérimentations et à des modèles, ils hiérarchisent l'effet de différents traits architecturaux dans les épidémies (modèle Septo3D), ils montrent que la réduction de la croissance de la plante et l'augmentation de la porosité du feuillage atténuent l'infection et la dispersion des spores de champignons pathogènes.

La montée en puissance de ces travaux bénéficie du développement de nouveaux outils : outils de mesure fine de l'environnement (microclimat), de l'état physiologique de la plante (mesures de métabolites) et des bioagresseurs ; outils de modélisation avec les modèles de plante virtuels qui simulent le développement des plantes en 3D. Des modèles 3D de plantes développés dans le département EA sont couplés avec des modèles épidémiques, grâce notamment à la plateforme OpenAlea dans le cadre d'une collaboration entre le Cirad, l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) et l'Inra.

Une expérimentation est mise en place à Dijon-Époisses afin de comprendre les effets cumulatifs de cinq systèmes de culture contrastés sur le niveau de maîtrise des adventices et la multiperformance : un système de référence avec des objectifs de rendements élevés et maîtrisant la flore adventice à l'aide d'herbicides ; un système suivant les préceptes de l'agriculture de conservation et mobilisant moins d'herbicides ; deux systèmes mobilisant les principes de la PIC en combinant des leviers à effets partiels, avec ou sans désherbage mécanique ; un système sans herbicide. La nécessité d'embrasser la multiperformance des systèmes de culture apparaît de plus en plus fortement, et un ingénieur est recruté au sein du réseau PIC afin d'épauler les dynamiques expérimentales pour l'évaluation multicritère (méthodes d'analyse de cycle de vie dans un premier temps, puis méthodes agrégatives dans un second temps).

C'est durant cette période également que différents travaux de modélisation basés sur des processus sont initiés dans l'objectif d'assister la conception de solutions de type PIC. Des modèles sont conçus pour représenter les effets des pratiques agricoles sur le développement de populations de bioagresseurs. Le modèle AlomySys sur les adventices voit le jour (encadré 16.1). La question du pilotage des interactions fonctionnelles entre une culture fruitière et un ravageur est pour la première fois abordée par modélisation dans le cas du système pêcher-puceron vert. Le modèle, qui s'appuie sur un formalisme mathématique de type Lotka-Volterra, rend compte d'actions et de rétroactions comme la stimulation de la croissance foliaire par la taille, la croissance des populations de pucerons suite à cette stimulation, les dégâts subséquents au feuillage, la croissance

compensatoire du feuillage, et les conséquences induites sur le rendement et la qualité des fruits.

On le voit, cette période est déterminante pour le renouvellement des modèles ayant trait à la PIC, par une approche intégrative visant à représenter les interactions clés entre pratiques culturales, fonctionnement écophysologique des peuplements cultivés, et dynamiques de populations de bioagresseurs.

► À partir de 2007 : des développements encouragés par les politiques publiques

Des réflexions majeures sont menées, tant au niveau européen que national, sur la nécessité de réduire significativement le recours aux pesticides. En France, en octobre 2007, le Grenelle de l'environnement, grand débat national participatif entre l'État, les collectivités territoriales, la société civile, les entreprises et les salariés, débouche sur la mise en œuvre du plan Écophyto. En parallèle, le « paquet pesticides » européen est adopté, dont la directive 2009/128 selon laquelle, notamment, les États membres doivent adopter des plans d'action nationaux pour fixer des objectifs quantitatifs et des moyens — dont la PIC — pour réduire la dépendance aux pesticides. Le plan Écophyto y correspond de fait et anticipe cette directive.

Ces réflexions et ces décisions réglementaires engagent une transformation drastique de la façon de protéger les cultures. La recherche est alors fortement sollicitée pour fournir des solutions nouvelles permettant de relever ce défi, et sa contribution s'inscrit dans différents programmes de recherche.

Afin de préparer l'adoption de la directive sur l'utilisation durable des pesticides, la Commission européenne appelle à une mise en commun des compétences pour élaborer des stratégies durables de protection des cultures. Initiateur et pilote du réseau d'excellence Endure (2007-2010), l'Inra partage avec ses partenaires de neuf autres pays européens son approche de la PIC en tant que processus de progrès vers des systèmes de production moins favorables et plus résistants aux bioagresseurs pour réduire la dépendance à une lutte directe. On y expérimente notamment, sur des études de cas, la conception de systèmes de culture innovants en s'appuyant sur l'élaboration d'un outil d'évaluation multicritère de la durabilité globale. Sur la base de cette « preuve de concept », un projet de recherche intégré de même ampleur, PURE (2011-2015), également coordonné par l'Inra, entreprend d'élaborer des stratégies intégrées pour les principaux systèmes agricoles européens, en mettant en œuvre des boucles de progrès : conception, évaluation, adaptation, expérimentation, complétées par des modules plus analytiques chargés de produire et d'introduire des connaissances et des innovations technologiques. Tout au long de ces projets, s'est constitué un réseau de partenaires européens impliqués dans la transformation de la protection des plantes qui continue à échanger grâce à différentes initiatives (groupe de recherche européen Endure, ERA-NET C-IPM). Endure et le réseau PIC organisent conjointement depuis 2009 des écoles-chercheurs internationales régulières pour faire partager à une large communauté les avancées des recherches en PIC.

Au niveau français, le programme « pesticides » du ministère de l'Écologie initié en 1999, d'abord ciblé sur les transferts et impacts, s'ouvre progressivement aux stratégies innovantes de réduction d'utilisation, y compris à des travaux sur la

conception de systèmes de culture. Le plan Écophyto élabore dans son axe recherche et innovation un programme scientifique, inventaire des questions de recherche prioritaires suscitées par le plan. Ces questions sont transmises à la communauté scientifique à partir de 2011 au travers de différents appels à projets, et les agronomes du département EA s'impliquent dans un ensemble de projets pour et sur le plan Écophyto. Différentes personnalités de l'Inra, dont des chercheurs du département EA, prennent part à plusieurs instances de gouvernance du plan, qui est pour l'institut à la fois un moteur pour les recherches en PIC et une cible directe de leur impact (encadré 16.2). Dans sa version révisée en 2016, le plan

Encadré 16.2. Impacts des recherches en protection intégrée des cultures : le plan Écophyto

Après l'expertise collective Pesticides et le Grenelle de l'environnement, l'étude Écophyto R&D sur la faisabilité de la réduction de l'utilisation des pesticides est commanditée à l'Inra en 2007 par les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement. Elle mobilise 80 experts Inra, dont différents chercheurs et ingénieurs du département EA, et hors Inra. Elle utilise l'ensemble des références accessibles, issues notamment des travaux sur la PIC de l'Inra ; les références technico-économiques acquises sur les essais-système en PIC y participent de façon notable. Remis en 2010, le rapport fournit des scénarios de réduction d'utilisation aux niveaux régional et national pour les grandes cultures, la viticulture, l'horticulture, l'arboriculture, et une analyse des stratégies des acteurs concernés. Le rapport propose également un dispositif de production (en stations et en fermes) et de gestion des références expérimentales sur les systèmes économes en pesticides.

Les propositions de l'étude Écophyto R&D ont été largement reprises dans le plan Écophyto*, notamment pour la mise en place des réseaux d'expérimentation Dephy-Expe et de démonstration Dephy-Ferme, et d'un système d'information pour le recueil, l'analyse, la valorisation et le partage des références acquises dans ces réseaux (Agrosyst, développé par l'Inra).

Dans la première phase du plan, dans Dephy-Expe, 41 réseaux dans 170 sites permettent de tester des systèmes de culture économes en pesticides dans un objectif de transfert en lien avec Dephy-Ferme. Différentes unités expérimentales et équipes de recherche relevant du département EA se mobilisent comme partenaires ou comme pilotes de ces essais. À titre d'exemple, on peut souligner qu'une évaluation à mi-parcours montre que cinq des huit sites du réseau zéro pesticides (Rés0Pest) parviennent à satisfaire des objectifs ambitieux de durabilité. Une seconde génération de réseaux expérimentaux voit le jour à partir de 2018. Dans Dephy-Ferme (178 fermes volontaires au démarrage en 2010, près de 3 000 en 2018), les projets d'adaptation de pratiques s'inspirent largement des reconceptions de systèmes testées à l'Inra, et utilisent des guides de conception (Stephy, CEPviti, Écophyto Fruits, systèmes de cultures légumiers, systèmes de cultures tropicaux) dont la réalisation a été majoritairement coordonnée par l'Inra. L'analyse des situations et des trajectoires après quelques années met en exergue des principes majeurs, comme la diversification des successions culturales pour limiter de nombreux stress biotiques, ou la nécessité de combiner, pour chacun de ces stress, plusieurs leviers alternatifs à la lutte chimique (génétiques, culturaux, physiques, biologiques, biotechniques...), car ils n'ont en général que des effets partiels. Elle montre qu'il n'y a pas forcément d'incompatibilité entre réduction des pesticides et performance économique. Les baisses d'indice de fréquence de traitement phytosanitaire sont manifestes dans le réseau, même si cela n'a pas encore diffusé dans l'ensemble de l'agriculture française.

* Gary C., Munier-Jolain N., Pellissier F., Colinet L., Gaunand A., 2014. Mise en place d'une politique publique de réduction des usages de pesticides : le plan Écophyto. Étude Asirpa réalisée pour l'évaluation du département EA, 14 p., <http://www.ecophytopic.fr/dephy/dephy-reseau-dephy>.

Écophyto se donne explicitement pour objectif de rendre possible, par l'avancée des connaissances scientifiques et des innovations techniques, une mutation des systèmes de production et de gestion de l'espace vers plus d'autonomie vis-à-vis des intrants, permettant de viser une diminution de 50 % de l'utilisation des pesticides à l'horizon 2025.

En même temps que les politiques publiques orientent les recherches, les chercheurs sont mobilisés pour éclairer la décision publique. En novembre 2017, l'Inra reçoit une lettre de saisine conjointe de quatre ministères afin de dresser un état des lieux des usages et d'identifier des alternatives au glyphosate dans l'agriculture française. Le département EA contribue de manière significative à ce travail à partir de son expertise et en tenant compte des incidences économiques et organisationnelles des alternatives au glyphosate.

La mise en pratique de nouvelles stratégies de protection par des agriculteurs crée un contexte nouveau pour les recherches sur la PIC, qui ne sont plus limitées à des dispositifs expérimentaux. Ces recherches peuvent exploiter des données acquises en conditions réelles, par exemple les observations relatives aux situations de production et aux pratiques dans les fermes engagées dans le réseau Dephy Écophyto, comme dans la thèse pionnière de Martin Lechenet (2017) intitulée « Étude de la faisabilité de la réduction de l'usage des pesticides en grandes cultures par l'analyse d'un réseau national de fermes de démonstration Écophyto ». L'exploitation de ces vastes jeux de données fournit aujourd'hui un moyen pour esquisser un corpus de références et de règles pertinentes pour une agronomie de systèmes agricoles soumis à la contrainte d'une faible utilisation des pesticides.

Cette mise à l'épreuve de la pratique, en lien avec un contexte réglementaire, interroge les chercheurs sur les freins et les leviers à la transformation de la protection et de la production. Il existe une étroite interrelation entre les facteurs d'ordre biologique, technique, sociologique, économique, juridique... qui ne peuvent être traités indépendamment, ni même séquentiellement. C'est le défi que se sont fixé les participants au projet GéDuPIC (ANR 2007-2010) : envisager la question de la transition vers de nouvelles formes de protection des cultures simultanément du point de vue des différentes disciplines que mobilise la considération d'un système élargi à la dimension des sciences humaines. Cette exigence s'impose sans doute particulièrement à l'agronomie en raison de sa dimension « science de gestion ».

Le métaprogramme Smach (Sustainable Management of Crop Health) prolonge ces actions en structurant depuis 2011 une communauté interdisciplinaire Inra sur la gestion durable de la santé des cultures. Une plus grande implication des chercheurs en sciences humaines est l'une de ses réussites, au-delà de la mobilisation des disciplines biophysiques habituelles.

► À partir de 2007 : les agronomes du département élargissent leur champ d'activités

La réduction de l'utilisation des pesticides est une des facettes de l'enjeu majeur qu'est la durabilité des agroécosystèmes ; leur réponse au changement climatique en est une autre. À la dynamique scientifique exposée précédemment s'ajoute le montage de projets sur l'étude des interactions entre les plantes et les biogresseurs sous l'influence du changement climatique (projets ANR Climator,

métaprogramme Accaf CLIF). On examine l'effet du changement climatique sur les dynamiques des bioagresseurs et les conséquences sur les pertes de récolte. Plus largement, la perspective d'une écologisation de l'agriculture pour faire face à l'enjeu de durabilité et l'émergence afférente de l'agroécologie comme branche disciplinaire introduisent un changement de paradigme pour les chercheurs en agronomie. Ces derniers adoptent une vision plus écologique des interactions entre les plantes cultivées et les bioagresseurs, et de leur pilotage par les pratiques culturales, en creusant les dimensions trophiques et chimiques de ces interactions. On met notamment en évidence une influence importante de la fertilisation azotée sur la quantité de ressources pour la production de spores d'agents pathogènes présente dans les feuilles. Des travaux sur le pathosystème tomate-*Botrytis cinerea* démontrent l'importance des sucres, dont les concentrations relatives sont modifiées suite à la fertilisation, dans la défense des plantes. Cette vision plus intégrative du triptyque plantes cultivées-bioagresseurs-pratiques culturales se prolonge dans des travaux récents sur les réponses évolutives des bioagresseurs aux changements du climat et des pratiques culturales, menés en collaboration avec des écologues évolutifs.

En lien avec les ambitions des politiques publiques de cette période, mais aussi avec les mouvements précités (nouveaux enjeux sociétaux, émergence de l'agroécologie), on note dans les activités de recherche un élargissement des échelles d'espace et de temps, et la prise en compte d'un niveau de complexité plus élevé des systèmes étudiés. Ainsi, la logique des essais-système est associée à des niveaux de rupture plus forts. Le réseau PIC, soutenu par le GIS GCHP2E et le plan Écophyto, met en place en 2012 un réseau expérimental sur huit sites en France sans aucune utilisation de pesticides (Rés0Pest), y compris pour les traitements de semences, et sans observer le cahier des charges de l'agriculture biologique, dans des systèmes de grande culture ou de polyculture-élevage. Les systèmes sont basés sur des stratégies agroécologiques de diversification de successions culturales, de valorisation des résistances variétales, d'association d'espèces, d'introduction d'intercultures et de techniques de substitution aux pesticides en dernier ressort. Pour la première fois, des expérimentations-système sont conçues à des niveaux supraparcellaires. La plateforme Co-Designed Agroecological System Experiment (CA-SYS) est lancée en 2017 à Dijon-Époisses, en coconception avec les partenaires régionaux. On mobilise ici l'ensemble du domaine expérimental pour mettre en place des stratégies de régulation des bioagresseurs valorisant au mieux les processus écologiques, en faisant la part belle aux infrastructures paysagères.

De manière parallèle aux dynamiques expérimentales, les démarches de modélisation se complexifient. Le modèle AlomySys monospécifique donne naissance au modèle FlorSys plurispécifique (encadré 16.1). On aborde pour la première fois l'impact des pratiques agricoles sur la durabilité des résistances variétales (modèle Sippom). La modélisation joue ici un rôle de support aux interactions interdisciplinaires (agronomie-pathologie végétale-génétique des populations) et permet d'aborder des échelles de temps et d'espace allant au-delà de celles de l'itinéraire technique et de la parcelle. De la même manière, on complexifie la représentation des effets des pratiques sur les bioagresseurs tels que les méligèthes du colza, et leurs parasitoïdes, à l'aide d'un formalisme spatialement explicite permettant d'intégrer également les effets des espaces non agricoles.

► Aujourd'hui et demain : une protection intégrée des cultures encore plus biodiversifiée

La perspective d'une écologisation de l'agriculture pour assurer la durabilité des agroécosystèmes introduit de nouveaux défis pour la PIC. Il ne s'agit plus seulement de protéger une culture contre un bioagresseur majeur, mais de prendre en compte des complexes et des cortèges de bioagresseurs, à l'aide de démarches d'observation et de modélisation renouvelées. En matière de modèles, la voie a été ouverte par FlorSys précédemment évoqué, par le modèle Wheatpest, qui simule les dommages causés par 13 bioagresseurs au blé et a été généralisé par la plateforme Xpest, et par la plateforme de modélisation qualitative Injury Profile Simulator (Ipsim). La culture, du reste, ne sera plus une culture monospécifique mais une association spatio-temporelle de plantes, cultivées et/ou de service, et d'infrastructures agroécologiques. On attend de cette biodiversité « planifiée » qu'elle soit bénéfique à la santé des plantes. À l'interface de l'agroécologie, de la protection des cultures et de la gestion de la biodiversité, une protection agroécologique des cultures (PAEC) voit le jour, avec des principes et de premières applications en cultures maraîchères et fruitières auxquels contribuent des agronomes du département EA. La santé du sol en est un des axes majeurs. Comment choisir la biodiversité planifiée ? Comment l'agencer dans le temps et dans l'espace ? Comment la gérer pour qu'elle agisse directement ou indirectement (par la biodiversité « associée » qui la colonise et au rang de laquelle sont les auxiliaires des cultures) et garantisse une protection des cultures efficace ? Quels sont les processus sous-jacents ? Ces questions ont été inscrites dans le SSD 2016-2020 du département EA, et suscitent déjà des projets innovants sur la diversification des cultures (projets UE-H2020 Remix et DiverImpacts, tous deux coordonnés par l'Inra et commencés en 2017).

Remerciements

Nous remercions Philippe Lucas pour les interactions fructueuses que nous avons eues avant la rédaction.

Pour en savoir plus

Charbonnier E., Ronceux A., Carpentier A.S., Soubelet H., Barriuso E., 2015. *Pesticides. Des impacts aux changements de pratiques*, coll. Savoir-faire, Quæ, Versailles, 400 p.

Deguine J.P., Gloanec C., Laurent P., Ratnadass A., Aubertot J.N., 2016. *Protection agroécologique des cultures*, coll. Savoir-faire, Quæ, Versailles, 287 p.

Ricci P., Bui S., Lamine C., 2011. *Repenser la protection des cultures. Innovations et transitions*, coll. Sciences en partage, Quæ/Educagri, Versailles, 250 p.

Expertises et études Inra :

Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M., 2005. Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, Inra, France, 64 p.

Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I., Volay T., 2010. *Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse de l'Etude*, Inra, France, 90 p.

Reboud X. *et al.*, 2017. Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française. Inra à la saisine, 85 p.

CHAPITRE 17

Vers une gestion territoriale du recyclage des matières organiques résiduaire

Sabine Houot, Dominique Patureau

La fertilisation organique des cultures et des prairies est une pratique multi-séculaire traditionnellement basée sur l'épandage des déjections animales. Au cours du xx^e siècle, les engrais minéraux sont venus compléter, voire supplanter la fertilisation organique, en permettant une gestion plus aisée des principaux éléments fertilisants (l'azote, N, le phosphore, P, et le potassium, K). Pourtant, chaque année, environ 300 millions de tonnes de matières organiques résiduaire (couramment appelées PRO, pour produits résiduaire organique) retournent au sol soit par épandage, soit par retour direct des déjections animales en prairies pâturées. Ces ressources proviennent dans leur très grande majorité des effluents d'élevage (94 %). D'autres activités anthropique (industries, collectivités) génèrent des ressources organique valorisable en agriculture : 73 % des boues d'épuration, 14,5 % des déchets ménager, 35 % des déchets industriels sont ainsi valorisé en agriculture. Le contexte actuel, avec la loi de transition énergétique, définit une feuille de route de l'économie circulaire qui rend obligatoire le tri et le recyclage des fractions organique de nos déchets, ce qui devrait augmenter les ressources organique valorisable en agriculture. Actuellement, les PRO épandus représentent environ 40, 70 et 80 % respectivement du N, P et K épandus sur cultures et prairies.

Ces PRO sont utilisés en agriculture avant tout pour leurs intérêt agronomique. Ils se substituent au moins partiellement aux engrais minéraux, souvent issu de ressources minière, comme le phosphore. Ils contribuent aussi à l'entretien, voire à l'augmentation des teneur et stock de matière organique dans les sols. Cependant, leur retour au sol ne peut être envisagé que si les risque associé à la présence de contaminant chimique ou biologique sont acceptable pour l'environnement et l'homme. Les impact lié à leur valorisation agronomique sont

les plus immédiats et fréquents, avec des problèmes de surfertilisation en azote ou en phosphore conduisant à la dégradation de la qualité des eaux. Ceci est lié à une prise en compte insuffisante de la fourniture d'éléments nutritifs par les PRO dans le raisonnement de la fertilisation minérale complémentaire. Ces impacts négatifs pourraient contrebalancer les bénéfices environnementaux des pratiques de recyclage. La connaissance de l'ensemble des bénéfices et risques associés à ces pratiques et leurs maîtrises sont des enjeux majeurs pour l'optimisation du recyclage.

Par ailleurs, les PRO sont souvent issus d'un traitement visant à modifier les caractéristiques des déchets initiaux et à améliorer leurs propriétés (ex. : compostage pour hygiéniser, homogénéiser et stabiliser les matières premières) ou pour valoriser au préalable la ressource organique initiale (ex. : extraction de molécules d'intérêt avant épandage des PRO restants). Ainsi la méthanisation est actuellement en plein essor, en particulier dans le monde agricole, à la suite du plan EMAA (Énergie, méthanisation, autonomie azote) lancé par le ministère de l'Agriculture en 2013. Celle-ci permet de produire une énergie renouvelable *via* la production de biogaz, et les digestats issus de ces procédés sont valorisés en agriculture. On peut ainsi définir des filières de valorisation (figure 17.1) pouvant inclure plusieurs étapes à prendre en compte pour comprendre en quoi les traitements préalables influent sur les caractéristiques des PRO épandus et sur leurs effets après apport au champ. Les évaluations bénéfices/risques doivent être faites à l'échelle de ces filières. Les processus et émissions lors des traitements d'amont sont à intégrer dans l'évaluation environnementale des modes de fertilisation

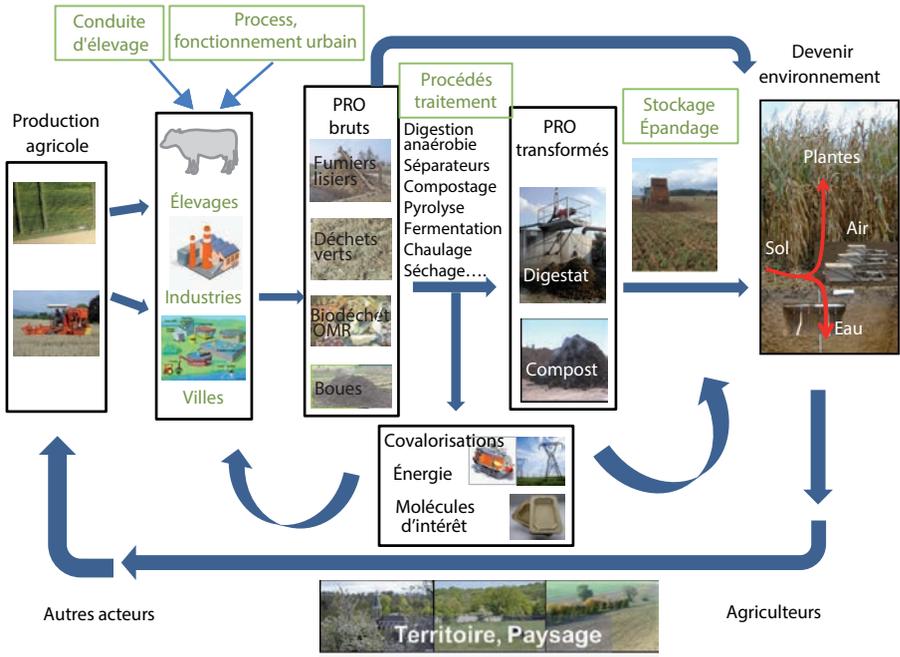


Figure 17.1. Représentation schématique des filières de recyclage des matières organiques résiduelles et des étapes à prendre en compte dans la maîtrise de ce recyclage et du bouclage des cycles à l'échelle territoriale. PRO : produits résiduels organiques ; OMR : ordures ménagères résiduelles.

incluant les PRO et leur comparaison par rapport aux modes de fertilisation avec des engrais minéraux.

Enfin, les activités de l'agriculture étant variables selon les régions, avec des territoires plus ou moins spécialisés en élevage, elles conduisent également à une distribution spatiale très hétérogène des ressources en PRO d'origine agricole, avec des zones de production souvent excédentaires en région d'élevage et d'autres très déficitaires dans les plaines céréalières. Les transferts entre régions deviennent alors nécessaires, ce qui entrave la valorisation optimale des PRO, partiellement résolue par leur traitement préalable. D'autres ressources en PRO restent incomplètement valorisées, en particulier en contexte urbain et périurbain. La valorisation de ces nouvelles ressources pourrait compenser le manque de ressources agricoles. Par ailleurs, au sein d'une exploitation ou d'un territoire, les sols et les cultures sont distribués spatialement, ont des aptitudes différentes à recevoir des épandages et des besoins différents en matière organique et en fertilisants. Au sein des territoires, la cohabitation entre différents acteurs peut générer des contraintes supplémentaires vis-à-vis du recyclage des PRO. Ces contraintes (ressources locales excédentaires ou déficitaires, types de ressources disponibles, besoins des sols et des cultures, multiplicité des acteurs présents) sont à prendre en compte dans leur ensemble pour optimiser la valorisation des ressources organiques, avec des choix de modes de traitement préalable, de modulation des mélanges traités pour mieux répondre aux besoins des cultures, de localisation des centres de traitement, de transformations facilitant le transport et les échanges entre régions... L'évolution va donc vers la nécessité d'une gestion spatiale et territoriale des ressources qui prenne en compte les attentes des différents acteurs et les besoins des différentes filières de valorisation (ex. : valorisation agricole et production d'énergie).

L'évolution des recherches au sein du département Environnement et Agronomie (EA) a permis de répondre à cette double nécessité de prise en compte des filières et des contextes territoriaux pour optimiser la valorisation des ressources organiques résiduelles et contribuer ainsi à la circularité des territoires.

► Un développement et une structuration des recherches à l'Inra pour répondre à des enjeux sociétaux

Premiers jalons historiques

En 1998, au moment de la création du département EA, les effluents d'élevage sont différenciés des déchets urbains et industriels dans les travaux sur le recyclage des matières organiques résiduelles à l'Inra. On s'intéresse déjà à la disponibilité des éléments fertilisants tels que l'azote dans ces matières. Beaucoup de questions se posent sur les boues d'épuration et les composts urbains, pour lesquels la réglementation en matière d'épandage nécessite une révision importante. L'Ademe diffuse une collection de fascicules sur les boues auxquels contribue l'Inra. On étudie les capacités épuratrices des sols à éliminer les charges polluantes contenues dans des eaux ou effluents liquides, mais la valorisation des éléments nutritifs dans ces effluents n'apparaît pas comme l'objectif premier de l'épandage. Au contraire, ces épandages sont considérés comme des sources de contamination potentielle des sols par les éléments traces qu'ils peuvent contenir. En 1998, l'Inra lance le

programme de recherche et développement interdisciplinaire Agrede¹⁹⁹ pour répondre aux questions posées en conclusion d'une réflexion menée conjointement par l'Ademe, l'APCA (Assemblée permanente des chambres d'agriculture), des instituts techniques et le ministère en charge du Développement durable sur le bilan environnemental des épandages, leurs impacts sur la qualité des produits agricoles, l'organisation et l'économie des filières de recyclage et le développement d'outils pour mieux caractériser les produits épandus et leurs effets. Ce premier grand programme marque le début d'une structuration des recherches sur cette thématique au sein de l'Inra, avec la mise en œuvre de programmes pluridisciplinaires et trans-départements de recherche.

Au moment du lancement du programme Agrede, la réglementation concernant les épandages de boue change (arrêté du 8 janvier 1998) : leur encadrement et leur contrôle se renforcent avec la mise en place de seuils de concentration pour les éléments traces métalliques (ETM) et pour quelques contaminants organiques dans les boues, mais aussi avec le suivi de leurs concentrations dans les sols. Cette nouvelle réglementation contribue à stabiliser la filière de valorisation agricole des boues. Pour les amendements organiques tels que les composts de déchets verts, de biodéchets, de boue, d'autres leviers réglementaires sont établis *via* la rédaction de normes produits (ex. : les normes NFU44 051 et 44 095 pour les amendements organiques ou NFU42 001 pour les engrais). La conformité d'une matière aux dénominations et spécifications définies dans ces normes sort celle-ci du statut de déchet et permet son apport au sol sans plan d'épandage.

En 1999, le Laboratoire de biotechnologies de l'environnement (LBE) est rattaché au département EA, avec comme objectif de prendre davantage en compte la notion de filière intégrée et d'aborder la question du devenir et de l'impact des produits de dépollution. Ainsi, après s'être intéressé surtout au processus de dépollution des effluents et des déchets, le LBE se tourne vers un concept de bioraffinerie environnementale incluant la conception, la mise en œuvre et l'optimisation de procédés biologiques sobres, performants, fiables et évolutifs autour de filières durables de valorisation des différents résidus issus des activités humaines. Cette évolution passe par la prise en compte du double intérêt du traitement pour produire de l'énergie *via* le méthane, et d'un digestat valorisable en agriculture. D'autres applications comme la production de biohydrogène et de molécules pour la conception de produits biosourcés sont également envisagées.

Le Système d'observations et d'expérimentations au champ sur les produits résiduaux organiques

La mise en place des cadres réglementaires évoqués précédemment permet de prévenir les impacts potentiels à court terme du retour au sol des PRO. Cependant, des questionnements sur les impacts à long terme d'apports répétés demeurent. Dès 1974, des sites expérimentaux au champ sont mis en place à Bordeaux qui ciblent particulièrement les conséquences d'apports de boues très contaminées (excédant les pratiques classiques d'épandage) sur les teneurs en ETM dans les sols (teneurs dépassant les seuils réglementaires). Ces premiers essais permettent d'ap-

199. Tercé et Fraval, 2003. Agrede : Agriculture et épandage de déchets urbains et agro-industriels. *Les Dossiers de l'environnement de l'Inra*, 154 p.

procher des situations de « pires cas » de contamination. En 1996, un autre site au champ est mis en place à la ferme expérimentale de l'École nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires (Ensaia) à La Bouzule, en Meurthe-et-Moselle, afin de tester l'effet d'apports répétés sur la qualité des sols, des récoltes, des eaux, avec un objectif spécifique sur l'évaluation des impacts écotoxicologiques sur les organismes des sols. À la suite de ces sites historiques, le réseau de sites du Soere PRO est initié en 1998. Dans ce réseau, les évolutions des compartiments sol, plante, eau et air sont suivies au fur et à mesure des épandages de produits résiduels organiques. Ces sites, localisés dans différentes conditions pédoclimatiques, représentent différentes filières de PRO agricoles et urbains en France métropolitaine, mais aussi en conditions tropicales, et impliquent des unités de recherche de l'Inra, du Cirad et de l'IRD. Les données collectées sont rassemblées dans un système d'information commun. Il a été labellisé Soere en 2011 et est intégré à l'infrastructure de recherche AnaEE depuis 2012 (voir chapitre 8). Ce réseau est ainsi le support de travaux de recherche et ouvert à la collectivité scientifique nationale et internationale²⁰⁰.

Appui aux politiques publiques

Le département EA contribue régulièrement à des expertises scientifiques collectives (ESCo) et à des études prospectives pour répondre aux demandes de différentes instances (voir chapitre 4). Les conclusions et sorties de ces travaux ont pour vocation de venir en appui aux politiques publiques. Le recyclage des matières organiques résiduelles a fait l'objet d'une expertise faisant le point sur tous les effets observés après apport au sol (ESCo Mafor, 2014)²⁰¹. Le retour au sol des effluents d'élevage était également largement abordé dans l'ESCo sur les flux d'azote en élevage (2012). L'étude de 2013 sur les leviers à mettre en place pour réduire les émissions de GES a montré que le rôle potentiel des apports de PRO dans l'augmentation des stocks de carbone des sols pouvait être important localement, mais avec une assiette de déploiement spatial assez faible comparé à d'autres pratiques. Cependant, la valorisation de ressources nouvelles d'origine urbaine pourrait contribuer en zone périurbaine à l'augmentation des stocks de carbone dans les sols, et répondrait ainsi à l'objectif « 4 pour 1 000 »²⁰² visant à un taux d'augmentation annuelle des stocks de carbone organique dans les sols de 4 pour 1 000 (étude se terminant en 2019).

Le département EA participe également à des instances de normalisation de l'Agence française de normalisation (Afnor), normes sur lesquelles reposent largement les réglementations en matière d'épandages agricoles, et d'homologation à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) pour les matières fertilisantes.

200. Pour en savoir plus, consulter <https://www6.inra.fr/valor-pro>.

201. Houot S., Pons M.N., Pradel M., Caillaud M.A., Savini I., Tibi A. (eds), 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduelle sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective, Inra-CNRS-Irstea, France.

202. Initiative « 4 pour 1 000 » : <https://www.4p1000.org/fr>.

► Évaluation des filières du traitement jusqu'à la valorisation au champ

Des traitements pour valoriser les déchets organiques en amont du retour au sol : exemple de la méthanisation

La méthanisation nécessite la conception, la mise en œuvre et l'optimisation de procédés biologiques. C'est une bioconversion qui accepte un large spectre d'intrants en matière de composition biochimique et de caractéristique physique et rhéologique, produit un vecteur énergétique multifonctionnel (chaleur, électricité, biocarburant, injection dans le réseau de gaz naturel), permet une valorisation des intrants à la fois sous forme d'énergie et de matière, et enfin permet d'atténuer les risques chimiques et microbiologiques associés aux intrants. Elle est étudiée selon une approche multi-échelle (processus/bioprocédés/filière) et constitue une base idéale pour un questionnement multidisciplinaire (écologie microbienne, génie des procédés).

La caractérisation des matières à dégrader (*via* des techniques spectrométriques telles que l'infrarouge et la fluorescence 3D) et la constitution de bases de données ont permis de compléter la notion de biodégradabilité avec celles de biodisponibilité et bioaccessibilité. Intégrées dans les modèles, il est désormais possible de simuler l'hydrolyse des matières, prédire la cinétique de production de méthane et la conduite et l'optimisation du procédé, notamment pour le mélange des intrants et la codigestion de plusieurs substrats.

L'optimisation des prétraitements adaptés à chaque type de substrat permet de maximiser la production d'énergie. Ces prétraitements ont des conséquences sur l'ensemble du procédé, avec par exemple la réduction des coûts de pompage et de brassage (diminution de la viscosité), l'amélioration de la déshydratabilité et de l'hygiénisation dans le cas des boues d'épuration.

La meilleure compréhension des processus physiques et biologiques mis en œuvre dans les procédés de digestion anaérobie, en lien avec la spécificité des caractéristiques des intrants et le type de procédé, permet d'optimiser le procédé par la maîtrise des leviers abiotiques et de prédire les cinétiques de production de biogaz et la qualité du digestat composant la matière organique résiduelle.

Ceci s'est traduit par le développement de procédés innovants et l'optimisation de procédés existants adaptés aux substrats à traiter, avec en particulier la conception de procédés faisant l'objet de brevets (ex. : le procédé Ergenium²⁰³ a fait l'objet d'une licence avec la société Naskeo) et un investissement important sur la méthanisation en voie sèche.

Maîtrise et prévision des intérêts agronomiques des apports des produits résiduels organiques au champ

On distingue deux principales classes d'intérêt agronomique des PRO :
 – un intérêt amendement, correspondant à leur capacité à entretenir, voire augmenter les teneurs et les stocks de matière organique dans les sols (amendement organique) ; certains PRO sont aussi des amendements basiques permettant d'augmenter le pH des sols trop acides ;

203. <https://www.biogaz-europe.com/exposants-parlent/article/nouveaute-naskeo-le-procede-ergenium/>.

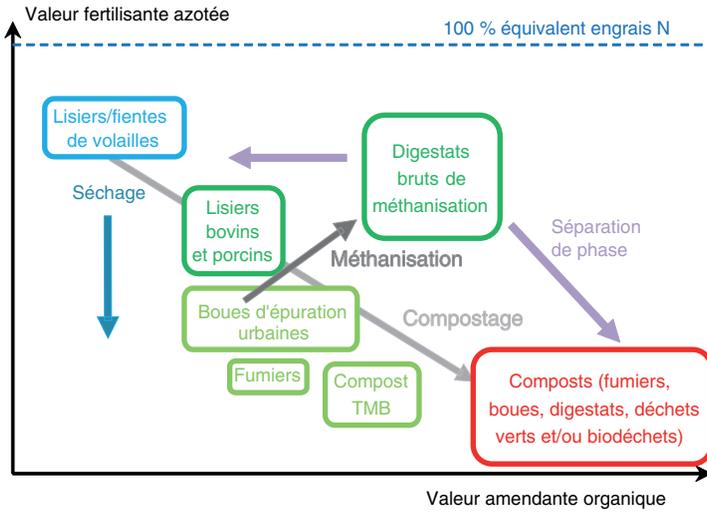


Figure 17.2. Lien entre valeur fertilisante azotée et valeur d'amendement organique des PRO. Interaction avec les modes de traitement des PRO (d'après Houot *et al.*, 2016). Compost TMB : compost issu de tri mécano-biologique.

– un intérêt fertilisant, d'autant plus important que les teneurs en éléments fertilisants (comme N, P, K, calcium, Ca, magnésium, Mg) et leur disponibilité pour les cultures sont importantes.

Les PRO amènent également des oligo-éléments qui peuvent être considérés comme des contaminants lorsque leurs concentrations deviennent trop élevées (comme cuivre ou zinc). Ces valeurs « fertilisant » ou « amendement » sont liées entre elles (figure 17.2). Une grande part de l'azote des PRO peut être sous forme organique. La disponibilité de cet azote dépend de la vitesse de minéralisation des formes organiques, donc de la stabilité de ces matières organiques. Par conséquent, plus la valeur d'amendement des PRO sera élevée, moins ils auront de valeur fertilisante azotée. La figure 17.2 montre bien les effets du traitement des PRO : le compostage augmente la valeur d'amendement mais diminue la valeur fertilisante azotée ; la méthanisation permet d'augmenter à la fois la valeur d'amendement et de fertilisant, mais la séparation de phase dissocie les digestats solides ayant un intérêt amendant des digestats liquides qui concentrent la valeur fertilisante azotée ; enfin, le séchage diminue la valeur fertilisante azotée en raison de la perte par volatilisation d'une partie de l'azote minéral.

La valeur d'amendement des PRO est liée aux caractéristiques des matières organiques qui les constituent. Ces caractéristiques biochimiques évoluent au cours des traitements par compostage ou méthanisation. Des méthodes de fractionnement biochimique permettent de suivre cette évolution en cours de traitement pour prédire la stabilité finale et le carbone résiduel restant dans les sols après apport de PRO. L'indice de stabilité de la matière organique (ISMO) (norme FDU 44-162²⁰⁴) permet de prédire l'évolution des teneurs en carbone organique

204. Afnor, 2016. Norme FDU44 162. Amendements organiques et supports de culture. Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique, <https://www.boutique.afnor.org/norme/fd-u44-162/>.

dans les sols en cas d'apport régulier de PRO, dont l'augmentation peut dépasser 4 pour 1 000 par an pour des doses d'apports agronomiques de PRO tels que des composts. Des méthodes de caractérisation rapide des PRO par spectroscopie proche infrarouge peuvent également prédire les fractions biochimiques et être utilisées pour paramétrer directement les modèles de simulation de l'évolution des stocks de carbone organique dans les sols (figure 17.3).

L'évolution des méthodes de fractionnement a permis leur adaptation à tous les types de PRO, incluant non seulement les amendements organiques, mais aussi les boues d'épuration et les digestats. En couplant des approches de fractionnement des matières organiques avec une caractérisation de la complexité de la matière organique extraite, cette nouvelle méthode permet de prédire le devenir de la matière organique à la fois dans les procédés (c'est-à-dire méthanisation et compostage) et dans le sol après épandage (figure 17.4).

De nombreux travaux ont été menés pour caractériser la valeur fertilisante azotée des PRO. L'azote y est essentiellement présent sous forme organique, à l'exception notable des lisiers, des digestats bruts et liquides ou des effluents agro-industriels. La proportion de N présent sous forme organique et minérale (essentiellement ammoniacale), la stabilité de ses formes organiques et l'équilibre entre le carbone et l'azote (rapport C/N) sont très variables non seulement entre grands types de matières (agricoles, urbaines, industrielles), mais aussi au sein d'un même

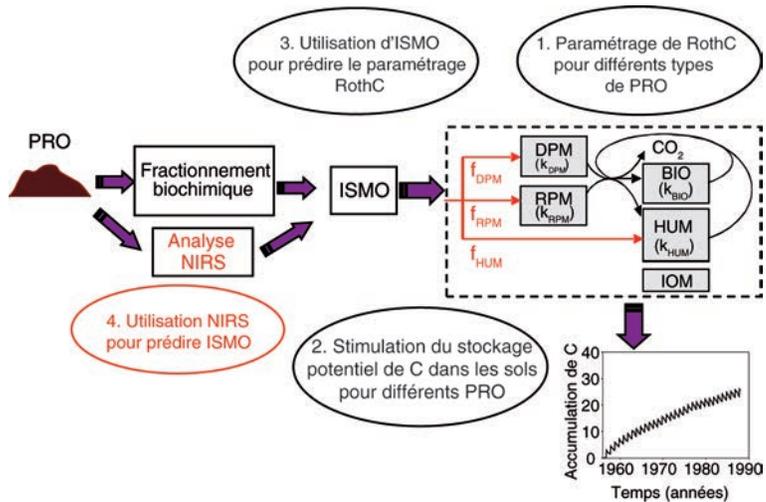


Figure 17.3. Intérêt des méthodes de fractionnements biochimiques et de l'indicateur ISMO (Indice de stabilité de la matière organique) et des méthodes de caractérisation rapides par spectroscopie proche infrarouge (NIRS, *near infra-red spectroscopy*) pour paramétrer le modèle RothC simulant les évolutions des teneurs en C organique dans les sols au fur et à mesure des apports de PRO. Dans le modèle RothC, le carbone organique du PRO est fractionné en une fraction décomposable (DPM, *decomposable matter*), résistante (RPM, *resistant matter*) et humifiée (HUM). La matière organique du sol est distribuée en une fraction correspondant à la biomasse microbienne (BIO), la matière organique humifiée (HUM) et une fraction inerte (IOM). Tous les compartiments se décomposent selon des constantes de vitesse k (k_{DPM} , k_{RPM} , k_{HUM} , k_{BIO}).

Sources : Peltre C., Thuries L., Barthes B., Brunet D., Morvan T., Nicolardot B., Parnaudeau V., Houot S., 2011. Near infrared reflectance spectroscopy: a tool to characterize the composition of different types of exogenous organic matter and their behaviour in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1, 197-205 ; Peltre C., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Kätterer T., Houot S., 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 52, 49-60.

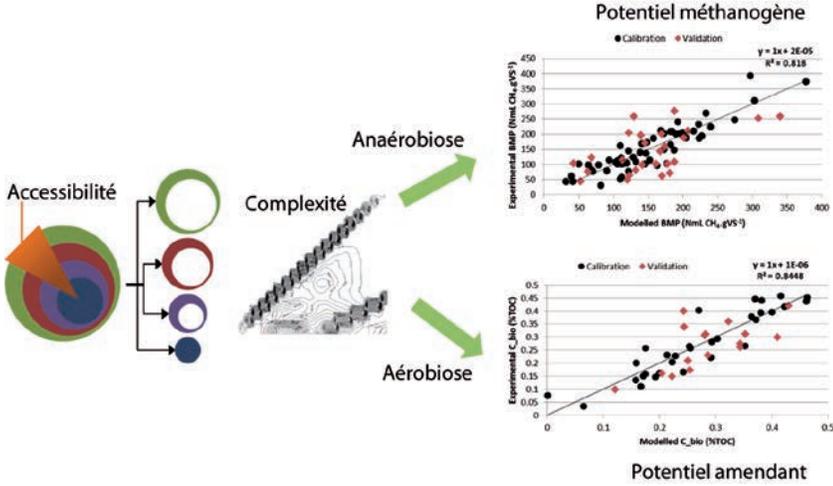


Figure 17.4. Fractionnement chimique et caractérisation par fluorescence des matières extraites d'un PRO pour prédire à la fois son potentiel méthanogène et son potentiel amendant pour les sols (au travers du carbone résiduel obtenu en fin d'incubation dans un sol en condition aérobie).
Source : Jimenez J., Lei H., Steyer J.P., Houot S., Patureau D., 2017. Methane production and fertilizing value of organic waste: organic matter characterization for a better prediction of valorization pathways. *Bioresource Technology*, 241, 1012-1021.

type (ex. : les fumiers). La dynamique de minéralisation de l'azote des PRO dépend de la biodégradabilité de leur matière organique et de leur rapport C/N :

- quand la matière organique est stable, sa minéralisation est lente, la valeur fertilisante azotée à court terme est faible, voire nulle, mais la valeur d'amendement est importante ;
- quand la vitesse et l'intensité de la minéralisation de la fraction organique sont élevées et que le rapport C/N est inférieur à la fourchette 8-15, la valeur fertilisante azotée est importante dans l'année qui suit l'apport ;
- quand la matière organique du PRO est facilement biodégradable mais que le rapport C/N est élevé (supérieur à 8-15), les micro-organismes du sol prélèvent du N minéral dans le stock du sol pour dégrader la matière organique, ce qui se traduit par une diminution transitoire de la disponibilité de N pour les plantes (organisation de l'azote).

Des classes de disponibilité d'azote sont définies, et l'attribution à ces classes est prédite à partir des fractions biochimiques qui les composent. Enfin, la disponibilité des éléments fertilisants est souvent référencée par rapport à un engrais minéral de référence ; on parle alors de valeur équivalente engrais, qui varie de 0 à 100 % en fonction des PRO.

Cependant, la connaissance de la biodisponibilité potentielle de l'azote des PRO ne suffit pas à prévoir l'utilisation réelle de ces sources d'azote par les plantes. D'autres paramètres sont à prendre en compte, comme les doses d'apport, les conditions pédoclimatiques, qui conditionnent la dynamique de minéralisation de l'azote, et la coïncidence entre présence de plantes et dynamique de minéralisation d'azote dans le sol. Les dynamiques de minéralisation de l'azote organique sont intégrées dans les outils d'aide à la décision tels qu'Azofert (voir chapitre 13) et permettent de calculer la fertilisation minérale complémentaire. Le mode et la

période d'apport des PRO sont également à prendre en compte. Ainsi, des apports en surface sans enfouissement peuvent conduire à la perte par volatilisation de l'azote sous forme ammoniacale, ce qui diminue fortement la valeur fertilisante des PRO. Des doses trop élevées ou l'absence de coïncidence entre absorption de N par les plantes et dynamique de minéralisation peuvent générer des risques de lixiviation de nitrates. Des émissions accrues de protoxyde d'azote (N_2O) peuvent également être observées après apport. Même si ces émissions n'ont pas d'impacts sur l'intérêt agronomique des PRO, l'impact environnemental peut être conséquent et compenser en partie l'intérêt du stockage de carbone lié aux apports de PRO ou les économies d'engrais faites. Pour les digestats de méthanisation, la séparation de phase apparaît bénéfique pour diminuer les risques d'émission de N_2O .

La modélisation des transformations conjointes du carbone et de l'azote permet de mieux comprendre le devenir des PRO après apport au sol. À l'échelle de l'agrosystème, elle permet de prendre en compte l'ensemble des flux d'azote, celui d'absorption par les plantes, mais également ceux correspondant à la lixiviation ou aux émissions gazeuses. Plus récemment, le couplage de modèles simulant les procédés de traitement et l'apport au sol a permis de représenter le devenir des matières organiques au cours du compostage puis après apport au sol. Des démarches similaires sont en cours pour le couplage digestion anaérobie et retour au sol des digestats.

La construction d'outils d'évaluation tels que Syst'N (voir encadré 13.3) simulant les pertes d'azote en fonction des pratiques culturales permet de tester et de comparer des scénarios de pratiques et ainsi d'aller vers une amélioration de ces pratiques. D'autres démarches de constitution de bases de données internationales de volatilisation d'ammoniac devraient permettre de mieux calculer les facteurs d'émission en fonction des pratiques.

Les travaux sont moins nombreux concernant la valeur fertilisante phosphatée des PRO. Le phosphore est largement sous forme minérale et sa disponibilité est souvent similaire à celle des engrais minéraux. Des apports répétés de PRO montrent une augmentation des formes minérales essentiellement dans les sols, avec une modification de la spéciation des formes du phosphore qui pourrait conditionner sa disponibilité.

En lien avec l'augmentation des teneurs en matière organique dans les sols, une amélioration des propriétés physiques des sols, comme la stabilité structurale des sols limoneux, est observée. À court terme, la stimulation de l'activité microbienne peut provoquer des augmentations plus intenses mais fugaces de la stabilité des agrégats. L'augmentation des teneurs en matière organique permet aussi une augmentation de la réserve utile des horizons amendés.

Les apports de PRO augmentent généralement les activités biologiques dans les sols. Ces augmentations sont en lien avec celles des teneurs en carbone organique dans les sols ; les apports peuvent aussi changer les structures des populations microbiennes, qui elles-mêmes peuvent modifier les émissions de composés organiques volatils par les sols. Les apports de composts peuvent aussi modifier la réceptivité des sols à certains micro-organismes phytopathogènes en lien avec leurs effets sur la structure des populations microbiennes et la stimulation des activités microbiennes dans les sols. Ces effets sont variables selon le type de compost et de pathosystème considéré. L'augmentation de la biomasse lombricienne est

également observée plus ou moins durablement dans des sols amendés par des composts ou fumiers, avec des effets plus marqués quand la biodégradabilité résiduelle des amendements reste importante.

► **Quels impacts environnementaux au champ associés à la présence de contaminants dans les produits résiduels organiques ?**

Les travaux sur les risques de contamination des sols et des récoltes en lien avec la présence d'ETM ont débuté dès les années 1980, avant la mise en place de la réglementation en 1998 limitant les concentrations en ETM dans les boues. Des boues ayant des concentrations élevées en ETM et apportées à de fortes doses entraînent une concentration de ces éléments dans les horizons de surface, et des horizons profonds dans le cas des sols sableux. La même tendance est observée en cas d'apport de composts urbains et fumiers à des doses proches des doses utilisées par les agriculteurs : les teneurs en certains ETM (cuivre et zinc essentiellement) augmentent dans les horizons superficiels d'apport, de même que leur mobilité dans la solution sol en lien avec l'augmentation de matières organiques dissoutes. La phytodisponibilité des éléments traces vis-à-vis des cultures varie en fonction des caractéristiques physico-chimiques des sols, ce qui permet de mieux évaluer, en fonction du type de sol, les risques de son augmentation pour les plantes lors d'apports de boues. En cas d'apports massifs de boue, les teneurs en cuivre augmentent dans les parties aériennes d'une culture de maïs, avec un impact négatif significatif sur la production de racines et de biomasse aérienne, mais sans atteindre de concentrations critiques dans les grains. De même, la synthèse des résultats expérimentaux d'essais anciens avec application de fortes doses de boues ayant de fortes concentrations en cadmium montre une augmentation des teneurs en cadmium dans les sols et dans le blé récolté sur ces sols ; en revanche, dans les essais respectant la réglementation mise en place en 1998, aucune augmentation des teneurs en cadmium dans le blé n'est observée. Il peut également y avoir des interactions entre les différents effets des apports de PRO : ainsi, l'augmentation du pH du sol induite par l'apport de certains PRO peut diminuer la mobilité de certains ETM tels que le cadmium par rapport à un traitement recevant des engrais minéraux. Les résultats expérimentaux obtenus dans les sites du Soere PRO alimentent ainsi des travaux sur la prévision de l'évolution des teneurs en cadmium dans les sols agricoles en fonction des pratiques culturales en France²⁰⁵.

Ces vingt dernières années ont vu le développement de méthodes d'extraction et d'analyse de contaminants organiques persistants (démarche initiée dans le cadre du programme Agrede), et émergents (hormones, résidus de médicaments) dans des matrices complexes liquides et solides que sont les PRO bruts et traités, les sols et les lixiviats. Nous avons ainsi pu quantifier des molécules pharmaceutiques dans les divers PRO apportés sur les parcelles du Soere PRO, évaluer les flux apportés au sol et les comparer aux stocks faibles retrouvés dans les sols sur plusieurs années d'épandage, et en déduire la plus ou moins grande persistance de ces molécules et leur faible impact écotoxicologique dans les sols et dans le transfert vers les eaux

205. Sterckeman T., Gossiaux L., Guimont S., Sirguy C., Lin Z., 2018. Cadmium mass balance in French soils under annual crops: Scenarios for the next century. *Science of the Total Environment*, 639, 1440-1452.

profondes du sol²⁰⁶. Les interactions avec les matières organiques des PRO et les conditions physico-chimiques telles que le pH conditionnent cette disponibilité et mobilité des molécules pharmaceutiques et leur devenir dans l'environnement.

Le devenir des contaminants organiques a également été étudié lors des traitements par compostage, méthanisation, séchage ou chaulage. Au cours du compostage, la dissipation de certains contaminants organiques peut atteindre plus de 50 % par des processus différents : dégradation biologique effective ou formation d'interactions fortes avec les composés organiques empêchant l'extraction des contaminants. Au cours de la digestion anaérobie, les processus de dissipation sont plus faibles, avec toutefois une évolution vers des compartiments peu accessibles de matière organique dans le cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Après séchage ou chaulage des boues, les molécules pharmaceutiques restent fortement extractibles et donc potentiellement mobiles au cours du stockage des boues. La modélisation permet de simuler conjointement les évolutions de la matière organique au cours des traitements et celle des contaminants organiques après les apports de PRO au sol.

La diversité des molécules à étudier contraint à développer des outils génériques. C'est ainsi que l'outil TyPol, qui permet de classer les contaminants organiques en reliant leurs propriétés moléculaires à leur comportement dans l'environnement et à leurs effets écotoxicologiques, a été développé²⁰⁷. Cet outil permet de choisir des molécules parmi des classes de comportement, de classer des molécules dont on ne connaît pas le comportement environnemental, de positionner les produits de transformation au regard des molécules parents.

La présence potentielle de pathogènes dans les PRO et leur rémanence dans les sols amendés participent également du questionnement concernant les impacts sanitaires de leurs apports. Les méthodes classiques de dénombrement des pathogènes présents dans les PRO avant épandage ont été appliquées sur les sols amendés d'un site du Soere PRO et n'ont pas quantifié d'accumulations de ces germes pathogènes par rapport au traitement témoin. La fréquence de détection des pathogènes varie beaucoup avec les germes étudiés. Les détections sont plutôt rares, mais dans certains cas la détection de résistances aux antibiotiques dans les germes retrouvés pointe un risque de leur dissémination dans l'environnement.

► Intégration des effets et gestion territoriale

Beaucoup de travaux se sont focalisés sur un seul des effets des apports de PRO en agriculture : stockage du carbone, substitution des engrais, accumulation d'ETM dans les sols et transfert dans les cultures, effets sur la biologie des sols... Mais tous ces effets sont simultanés et peuvent même avoir des interactions. Ainsi, l'augmentation de la matière organique entraîne également celle de l'azote potentiellement disponible et donc la diminution de la complémentation azotée des cultures ; l'augmentation du pH des sols après apport de PRO engendre la

206. Bourdat-Deschamps M., Ferhi S., Bernet N., Feder F., Crouzet O., Patureau D. *et al.*, 2017. Fate and effects of pharmaceuticals and personal care products after repeated applications of organic waste products in long-term field experiments. *Sci. Total Environ.*, 607-608, 271-80.

207. Servien R., Mamy L., Li Z., Rossard V., Latrielle E., Bessac F., Patureau D., Benoit P., 2014. TyPol – A new methodology for organic compounds clustering based on their molecular characteristics and environmental behaviour. *Chemosphere*, 111, 613-622.

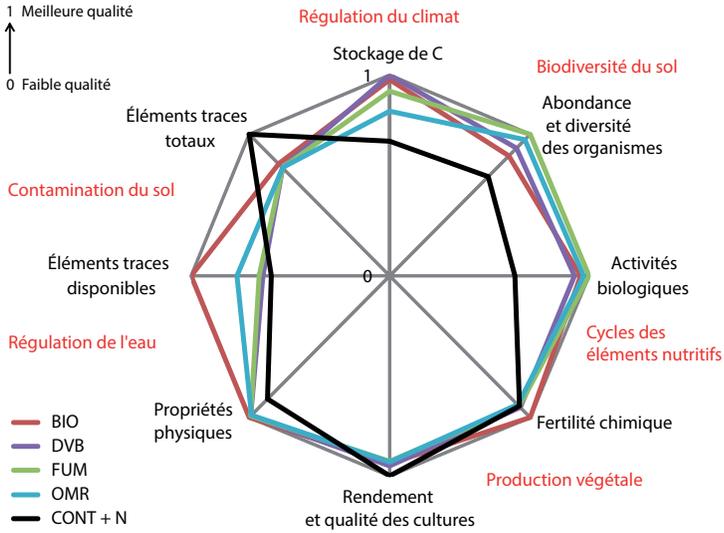


Figure 17.5. Représentation agrégée de l'ensemble des effets d'apports répétés de composts et fumiers dans l'essai QualiAgro en comparaison à une fertilisation minérale classique. Les indicateurs mesurés sont regroupés en indices de qualité (mentionnés en noir sur la figure) transcrivant différents services ou dysservices liés aux apports de PRO (mentionnés en rouge sur la figure). Pour tous les indices, la valeur de 1 représente la qualité de sols ou de récolte la meilleure (d'après Obriot *et al.*, 2017). BIO : composts de biodéchets ; DVB : compost de boue ; FUM : fumier de bovins ; OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles ; CONT + N : fertilisation minérale.

diminution de la disponibilité des ETM. Certains bénéfiques peuvent être associés à des impacts environnementaux : l'augmentation de la disponibilité d'azote pour les cultures peut s'accompagner de celle de la lixiviation du nitrate vers les eaux, le stockage du C peut être accompagné de l'augmentation des émissions de GES, etc. Il faut connaître et quantifier ces antagonismes pour les prendre en compte et les intégrer dans des outils d'évaluation multicritère de la pratique de recyclage. Des méthodes de *data mining*, traitements statistiques de jeux de données importants correspondant à des suivis multiparamètres au fur et à mesure d'apports de différents types de boue d'épuration, ont ainsi permis de caractériser des évolutions conjointes de paramètres agronomiques ou de la biodisponibilité des éléments traces²⁰⁸. D'autres approches prennent en compte les antagonismes des effets. Elles utilisent l'agrégation de différents effets des apports de PRO sous forme d'indices de qualité des sols ou des récoltes pour représenter différents services et dysservices rendus par ces apports et les comparer à une fertilisation minérale classique, montrant les services pour lesquels ils ont le plus d'effets²⁰⁹ (figure 17.5).

Une même approche d'utilisation d'indices de qualité des sols appliquée dans un territoire d'élevage met en évidence que les apports d'effluents d'élevage ne sont pas forcément les leviers déterminants de l'amélioration de la qualité des sols : le

208. Cortet J., Kocev D., Ducobu C., Dzeroski S., Debeljak M., Schwartz C., 2011. Using data mining to predict soil quality after application of biosolids in agriculture. *Journal of Environmental Quality*, 40, 1972-1982.

209. Obriot F., Stauffer M., Goubar Y., Cheviron N., Peres G., Eden M., Revallier A., Vieublé-Gonod L., Houot S., 2016. Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 232, 165-178.

mode d'occupation des sols, en particulier les prairies, a un effet plus important. L'évaluation d'une pratique d'épandage doit être contextualisée par rapport aux systèmes de culture et d'élevage pratiqués pour la comparer aux autres leviers d'amélioration de la qualité des sols.

L'analyse de cycle de vie est une autre méthode d'évaluation multicritère largement utilisée pour comparer des filières de traitement des déchets. Elle a été utilisée pour comparer les impacts environnementaux de scénarios de traitement des lisiers sur un territoire ou pour analyser les effets au champ des apports de différents PRO en prenant en compte la substitution des engrais, mais également les émissions gazeuses après apport. Dans ces analyses, il est important de prendre en compte les filières complètes incluant le traitement amont et l'épandage, car les émissions en amont peuvent contrebalancer les effets positifs au champ. Ainsi, les émissions de GES lors des traitements par compostage peuvent contrebalancer le stockage de C au champ observé après apport de composts au champ.

Enfin, le raisonnement des apports de PRO ne peut s'appliquer uniquement à l'échelle de la parcelle, mais plutôt à des échelles spatiales des exploitations agricoles (l'agriculteur prend la décision d'épandre sur certaines parcelles) ou à l'échelle d'un territoire pour optimiser et maximiser la valorisation des PRO en prenant en compte les besoins des cultures, les caractéristiques des sols, le stockage du carbone, les pertes de nitrates par lixiviation, les flux de contaminants associés aux éléments nutritifs, etc., pour déterminer les doses, les types de PRO à appliquer aux moments les plus favorables dans les successions de cultures et sur les sols afin d'exprimer au mieux ces bénéfices. On montre ainsi que dans un territoire périurbain en Île-de-France, la valorisation des PRO peut permettre de stocker du carbone dans les sols à des taux supérieurs à 4 pour 1 000 par an. En revanche, le recyclage de PRO ne permet de substituer que 37 % des engrais de synthèse quand on veille à ne pas surfertiliser les sols en phosphore²¹⁰. En effet, la recherche d'une fertilisation équilibrée non seulement en azote, mais aussi dans les autres éléments peut apparaître comme un facteur limitant le plein recyclage.

À l'échelle territoriale, des approches de métabolisme, en quantifiant les flux d'éléments entre les entités d'un territoire (population, agriculture, élevage, espaces verts et plateformes de traitement biologique des déchets organiques), montrent que le recyclage des biodéchets, des déchets verts et des excréments humains sous forme de matières fertilisantes ainsi que le développement de circuits courts de fourniture alimentaire contribuent à reboucler les systèmes alimentaires, alors qu'ils sont actuellement largement ouverts avec une forte importation des aliments, des engrais pour les cultures, et une exportation des biodéchets et des excréments humaines²¹¹.

210. Noirot-Cosson P.E., 2016. Optimisation de l'insertion des produits résiduels organiques dans les systèmes de cultures d'un territoire francilien : évolution des stocks de carbone organique des sols et substitution des engrais minéraux. Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement, École doctorale ABIES, Paris, 266 p.

211. Verger Y., Billen G., Garnier J., Esculier F., Barles S., Petit C., Tedesco C., 2016. Visions prospectives de l'agriculture sur le plateau de Saclay. Rapport d'activité Piren-Seine (<https://www.piren-seine.fr/fr/content/rapports-annuels-2016>).

► Conclusions et perspectives

Au cours de ces vingt dernières années, les travaux sur la valorisation des matières organiques résiduelles se sont fortement développés, largement reconnus au sein de l'Inra (Lauriers de l'Inra 2017 au LBE) et aux niveaux national et international. Le contexte de ces travaux a évolué : si, hier, on cherchait à se débarrasser d'effluents ou de déchets, à traiter une charge polluante dans des effluents liquides, on sait maintenant qu'il est nécessaire de recycler les nutriments, de boucler les cycles et de valoriser ces matières organiques. Les futurs chantiers de recherche sur la valorisation des matières organiques résiduelles s'inscrivent dans les grandes orientations de l'Inra : assurer la sécurité alimentaire, développer une agriculture multiperformante, explorer différentes voies de valorisation des bioressources. Ces chantiers vont de l'exploration de nouvelles pistes de valorisation des déchets, en amont du recyclage agricole, à la nécessité d'approfondir les conséquences du recyclage des PRO en agriculture et à celle de repenser l'organisation des recherches vers plus d'interactions entre disciplines pour mieux répondre aux questions.

Face au développement des énergies renouvelables se pose la question de trouver des modes de stockage de l'énergie, souvent produite sous forme d'électricité. Ainsi la biométhanation, étape convertissant l'hydrogène et le dioxyde ou le monoxyde de carbone en méthane, couplée à la digestion anaérobie et à l'électrolyse de l'eau, permet de transférer et de stocker dans le réseau de gaz les excédents d'électricité d'origine solaire ou éolienne et de valoriser le dioxyde de carbone présent dans le biogaz. Au sein des filières de traitement, l'approche multi-valorisation en cascade de la biomasse « matière + énergie » est également explorée pour augmenter la rentabilité économique de ces filières et répondre à la demande croissante du marché en produits biosourcés. La prise en compte de la valorisation agronomique conduit à la recherche de meilleurs compromis pour répondre à ces objectifs multiples dans la conception et la conduite des procédés. Ainsi, ces approches de bioraffinerie environnementale pourraient permettre de ne plus subir la qualité des PRO, mais de la contrôler en réalisant de l'ingénierie reverse.

Concernant la valorisation agricole des PRO, un des premiers chantiers à poursuivre reste l'évaluation du devenir des contaminants après leur introduction dans les agrosystèmes, leurs impacts environnementaux et leurs effets sur la sécurité des productions agricoles fertilisées avec des PRO, et ceci à court et long terme en cas de pratiques régulières d'apport. Les métabolites issus de la dégradation des contaminants doivent être pris en compte. Par ailleurs, des contaminants émergents tels que les nanoparticules, susceptibles d'être présentes dans les effluents et les déchets urbains, commencent aussi à être étudiés. L'outil TyPol devrait permettre de définir des molécules représentatives des grands types de comportements dans l'environnement des contaminants organiques, et les essais de longue durée du Soere PRO offrir des situations à explorer en priorité sur ces questions afin d'appréhender les effets de l'introduction régulière de PRO dans les pratiques de fertilisation. La dissémination dans l'environnement de pathogènes ou de gènes de résistance à des antibiotiques reste également une question à traiter. Un chantier associé au précédent concerne l'étude des impacts écotoxicologiques éventuels liés au recyclage, et des impacts sur la biodiversité et le fonctionnement biologique des sols. Concernant les impacts écotoxicologiques, l'enjeu est de dissocier les effets positifs des

apports de matières organiques sur les organismes vivants du sol, des impacts écotoxicologiques qui pourraient exister en raison de la présence de contaminants. Il en découle que les critères analytiques retenus dans la réglementation nécessiteraient d'être révisés pour tenir compte de cette diversité de contaminants. L'enjeu est de déterminer des molécules « indicatrices » de la qualité des PRO épandus, sans entraîner de coûts analytiques prohibitifs pour les filières de recyclage. L'efficacité des traitements pour assurer l'innocuité des matières épandues est un enjeu de pérennisation des filières.

D'autres questions se posent sur les effets du développement de ces filières, sur l'intensification du recyclage sur le fonctionnement des cycles biogéochimiques majeurs dans les sols, mais aussi sur le fonctionnement biologique des sols. Plus largement, ces questions concernent aussi les systèmes de culture dans les exploitations, voire même les systèmes d'exploitation et leurs modèles économiques au sein des territoires. Ainsi le développement de la méthanisation modifie la qualité des matières organiques retournant au sol, qui sont plus stabilisées en sortie de méthaniseur que les matières organiques retournant au sol habituellement. Si le bilan global du carbone dans le sol semble être identique, la diminution des entrées de carbone facilement biodégradable dans les sols pourrait modifier le fonctionnement biologique des sols. La question se pose particulièrement en cas d'introduction dans les méthaniseurs de résidus de récolte ou de cultures intermédiaires. D'autres questions se posent quand des mélanges de déchets territoriaux sont traités, modifiant les flux d'éléments susceptibles de retourner au sol. Elles doivent être abordées à l'échelle des filières et à l'échelle territoriale.

On a largement vu l'importance de prendre en compte les filières de production, de traitement et d'épandage des PRO pour en maîtriser à la fois les intérêts agronomiques et les impacts environnementaux. On ne comprendra les effets après apport au champ que si on apprend en quoi les traitements en amont conditionnent les caractéristiques des produits épandus. Dans le cas des élevages, les filières incluent la maîtrise de la nutrition des animaux. Ainsi en 2017, le GIS Apivale est créé, regroupant différentes structures de recherche (Anses, Irstea, Inra, AgroCampus Ouest, universités) pour renouveler et intégrer la valorisation des effluents d'élevage dans des approches plus systémiques prenant en compte les filières d'élevage et de traitement, mais également la gestion territoriale de ces effluents d'élevage²¹².

Ces mêmes questions se posent pour d'autres filières organiques issues du métabolisme urbain ou industriel au sein d'un territoire. Si des structures telles que le Soere PRO et son système d'information associé permettent de quantifier les effets à long terme au champ et de prédire des trajectoires d'évolution des agrosystèmes, ces sites sont en nombre limité, et la constitution d'une base de données de caractérisation de la diversité des PRO existants est nécessaire pour quantifier la variabilité des trajectoires d'évolution en fonction des types de PRO. La prise en compte de la variabilité des effets observés en fonction du type de PRO (et la maîtrise de cette variabilité lors des procédés en amont), du contexte pédoclimatique et des systèmes de cultures récepteurs, permet d'optimiser au sein des terri-

212. Dourmad J.Y., Edouard N., Hassouna M., Keita A., Lassalas J. *et al.*, 2017. "APIVALE", An experimental platform for an integrated approach of organic effluent recycling and valorization. *International Symposium on Emissions of Gas and Dust from Livestock (EmiLi)*, mai 2017, Saint-Malo, France.

toires la valorisation des ressources organiques, en maximisant les effets bénéfiques tout en limitant les impacts, sur la base de scénarios spatialisés et modélisés qui placent les acteurs impliqués au cœur des simulations (agriculteurs, collectivités, traiteurs de déchets, etc.). L'utilisation de plateformes de modélisation multi-agents et spatialisée telles que Maelia²¹³ offre des pistes prometteuses dans les travaux en cours. La pluridisciplinarité est nécessaire ainsi que le rapprochement avec les départements dédiés aux sciences sociales et aux sciences animales, mais également aux procédés de transformation afin de contribuer à des systèmes alimentaires durables et inscrits dans une économie circulaire.

Enfin, de nouvelles pistes de valorisation se développent. Des sols sont ainsi entièrement reconstitués pour réhabiliter des friches industrielles ou d'anciennes carrières, valorisant souvent des ressources en PRO ou autres déchets et créant ainsi des technosols ayant leur propre pédogenèse pour recoloniser des milieux par une activité biologique et la croissance de végétaux. En agriculture urbaine, la production maraîchère sur des substrats souvent d'origine résiduaire et produits localement fournit une palette de services allant de la production végétale à la régulation climatique, tout en contribuant au bouclage local des cycles. Dans ces nouvelles filières et milieux, se posent des questions similaires de qualité sanitaire des végétaux produits et de bilan environnemental favorable, avec la nécessité d'approches multidisciplinaires et prenant en compte les acteurs concernés.

Pour en savoir plus

- de Guardia A., 2018. *Compostage et composts. Avancées scientifiques et techniques*, Éditions Lavoisier, coll. Tec & Doc, 646 p.
- Houot S., Pons MN., Pradel M., Tibi A., 2016. *Recyclage de déchets organiques en agriculture : effets agronomiques et environnementaux de leur épandage*, Éditions Quæ, coll. Matière à débattre et décider, 199 p.
- Moletta R., 2015. *La méthanisation*, 3^e édition, Éditions Lavoisier, coll. Tec & Doc, Paris, 528 p.
- Peyraud J.-L. et al., 2014. *Réduire les pertes d'azote dans l'élevage*, Expertise scientifique collective, Éditions Quæ, coll. Matière à débattre et décider, 167 p.

213. Therond O., Sibertin-Blanc C., Balestrat M., Gaudou B., Hong Y et al., 2014. Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. In: *7th Int. Congress on Env. Modelling and Software (iEMSs)* (D.P. Ames, N.W.T. Quinn, A.E. Rizzoli, eds), San Diego, CA, USA, 8 p.

La conception de systèmes agroécologiques

Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Marc Meynard

L'amélioration des pratiques agricoles constitue, depuis l'émergence de l'agronomie au XVIII^e siècle, un des fondamentaux de cette discipline. Dans les dernières décennies, et en particulier depuis les années 1990, les objectifs des systèmes de production se sont diversifiés du fait des attentes sociétales concernant l'environnement, la qualité des produits, les conditions de travail. Aujourd'hui, les pratiques agricoles ont quitté la sphère privée de l'agriculteur pour devenir objets de débat public, de controverses, de normes, de réglementations. Il s'agit de produire des aliments en quantité de plus en plus importante pour faire face à l'augmentation de la population mondiale, mais aussi de la biomasse à usage non alimentaire ; les critères de qualité demandés par les filières se sont diversifiés et pèsent sur les prix ; la diminution des nuisances environnementales de l'agriculture est devenue une préoccupation du grand public et une cible majeure des politiques publiques (loi sur l'eau et ses différentes déclinaisons, plan Écophyto sur la réduction de l'usage des pesticides, etc.). Les acteurs des territoires (associations, administrations locales, voisins, consommateurs) interpellent les agriculteurs sur les effets de voisinage de l'usage de pesticides, l'évolution des paysages et la gestion des ressources locales (eau, biodiversité, sols, etc.), mettant en exergue la multifonctionnalité de l'agriculture.

Cette multiplicité des défis posés à l'agriculture suppose un profond changement des systèmes agricoles. L'augmentation de l'efficacité d'utilisation des intrants, longtemps privilégiée par les agronomes, ou la substitution de certaines techniques par d'autres, moins agressives vis-à-vis de l'environnement, ne suffisent plus pour relever les défis majeurs qui se posent aujourd'hui. La nécessité d'une activité intense de conception de systèmes agricoles innovants ne fait plus débat, et a été un objectif constant du département Environnement et Agronomie (EA) depuis sa création.

Avec le développement de l'agroécologie en France²¹⁴, la montée en puissance des travaux de recherche concernant la conception de systèmes de culture agroécologiques, pendant la période 1998-2018, a été marquée par de grandes évolutions thématiques et méthodologiques, qui structureront le plan de ce chapitre.

► La maturité du concept de système de culture

Les expressions « itinéraire technique » et « système de culture » désignent des « manières de produire ». Le système de culture correspond à l'ensemble coordonné des actes techniques mis en œuvre en pluriannuel sur une parcelle ou un ensemble de parcelles, alors que l'itinéraire technique recouvre l'ensemble des actes techniques mis en œuvre sur une parcelle pendant un cycle de production. En employant ces concepts, les agronomes affirment qu'il est essentiel de s'intéresser à la cohérence qui existe entre les actes techniques mis en œuvre successivement sur une parcelle agricole. Celle-ci a deux origines (Meynard *et al.*, 2001) :

- les actes techniques mis en œuvre sur une même parcelle résultent de décisions fortement liées les unes aux autres, raisonnées par un décideur majeur (l'agriculteur) dans un cadre unique défini par des objectifs de production, des ressources disponibles (travail, sol, trésorerie...) et des savoirs ;
- les différentes techniques agissent sur les mêmes composantes de l'agroécosystème : une même technique joue sur plusieurs composantes et processus, une même composante est influencée (contrôlable) par plusieurs techniques. Du fait de cette absence de relation bi-univoque, il existe de fortes interactions entre techniques.

La mobilisation des concepts d'itinéraire technique et de système de culture par la recherche est encore récente au moment où le département EA naît ! Dans les années 1970 à 1990, les recherches étaient majoritairement orientées vers l'amélioration d'une technique, isolée des autres : par exemple, les travaux emblématiques sur la méthode du bilan pour gérer la fertilisation azotée. La conception de nouvelles techniques avait pour principal objectif une augmentation de l'efficacité des intrants, dont l'offre avait explosé depuis les années 1960-1970. La recherche de combinaisons cohérentes de techniques a débuté dans les années 1980, par la conception d'itinéraires techniques du blé visant à atteindre de nouveaux objectifs²¹⁵ (ex. : moins de nuisances environnementales, marge moins variable). Pour traiter de cette cohérence, l'élargissement de l'échelle temporelle a été amorcé, au début des années 1990, par des travaux sur les successions de culture et les effets précédents. Mais ce n'est qu'à la fin des années 1990 et au début des années 2000 que le centre de gravité des travaux s'est déplacé sur la conception de systèmes de culture, puis sur l'organisation spatiale de ces derniers.

Au début des années 2000, les recherches sur les systèmes de culture affichent trois objectifs : l'évaluation des pratiques agricoles, la mise au point de nouveaux systèmes de culture, l'acquisition de connaissances concernant les effets des systèmes de culture sur le fonctionnement de l'agrosystème. Le département EA a alors soutenu l'organisation de deux écoles-chercheurs portant sur les systèmes de culture, en 2001 et 2002, insufflant de fait une dynamique collective autour de ce

214. Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 503-515.

215. Meynard J.-M., 1985. *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*, Institut national agronomique, Paris-Grignon.

« nouvel » objet. Ces écoles-chercheurs visaient à partager et permettre un apprentissage de la démarche générale d'évaluation/conception de systèmes de culture et à faire percevoir la nécessité de prendre en charge une diversité de « déterminants » des systèmes de culture. C'est à la suite de ces écoles que le travail au niveau pluriannuel est devenu majoritaire, afin de prendre en charge des objectifs ambitieux combinant production (quantitative et qualitative) et impacts environnementaux. Plusieurs approches ont été successivement proposées : la modélisation, l'analyse statistique des pratiques en vue d'identifier celles susceptibles d'atteindre les combinaisons de performances visées, le prototypage de systèmes nouveaux à expérimenter, reposant sur une mobilisation d'experts, l'expérimentation de systèmes de culture en stations, ou enfin les ateliers pour la conception de systèmes de culture chez les agriculteurs. Les travaux sur les itinéraires techniques se sont poursuivis : la simplification offerte par le cadre du cycle cultural permet des explorations méthodologiques, comme la mobilisation d'algorithmes issus de l'intelligence artificielle, ou le couplage entre conception et évaluation multicritère.

L'accroissement des travaux sur cet objet a été marqué, dans les vingt dernières années, au niveau international, par la structuration d'une communauté scienti-

Encadré 18.1. Intitulés des champs thématiques du département EA depuis sa création, décrits dans les différents schémas stratégiques du département réussis

Schéma stratégique du département 1999-2002

Champ thématique 1 : Écophysiologie et conduite des cultures

Champ thématique 2 : Écologie du sol et de la rhizosphère

Champ thématique 3 : Cycles biogéochimiques

Champ thématique 4 : Études des transferts et maîtrise des états physiques du milieu

Champ thématique 5 : Organisation spatiale et fonctionnement des écosystèmes cultivés

Champ thématique 6 : Conception et évaluation des systèmes de culture

Schéma stratégique du département 2004-2008

Champ thématique 1 : Agronomie systémique et bases biophysiques de la gestion des écosystèmes cultivés

Champ thématique 2 : Modélisation des plantes et de l'interaction génotype-environnement

Champ thématique 3 : Fonctionnement des sols, cycles biogéochimiques et écologie fonctionnelle

Champ thématique 4 : Transferts et échanges de masse et d'énergie dans l'environnement

Schéma stratégique du département 2011-2015

Champ thématique 1 : Agronomie systémique et ingénierie agroécologique

Champ thématique 2 : Écophysiologie végétale

Champ thématique 3 : Biogéochimie, écologie et physique des sols

Champ thématique 4 : Physique et écologie des paysages

Schéma stratégique du département 2016-2020

Champ thématique 1 : Agronomie des systèmes agricoles

Champ thématique 2 : Écophysiologie des plantes et des peuplements végétaux

Champ thématique 3 : Biogéochimie, écologie et physique des sols

Champ thématique 4 : Physique et écologie des paysages

fique, notamment *via* le réseau international Farming Systems Design (cinq congrès, en 2007, 2009, 2011, 2013, 2015, le prochain en 2019), dans lequel la France a été fortement contributrice. La maturité du concept de système de culture est également perceptible par la place prise par cet objet dans le développement agricole : en attestent la création (2007) et l'activité du RMT Systèmes de culture innovants, centré sur cet objet (Reau et Doré, 2008) ; l'évolution des programmes de travail des chambres d'agriculture depuis une dizaine d'années ; les travaux et les éléments de communication autour du plan Écophyto ; la collaboration récente entre instituts techniques (mono-filières) pour travailler ensemble sur des systèmes de culture innovants pluri-espèces (Systèmes de production performants et respectueux de l'environnement, Syppre).

Mais paradoxalement, alors que le système de culture occupait une place de plus en plus centrale dans les travaux des agronomes français et internationaux, la référence explicite à ce concept a disparu des intitulés des champs thématiques du département (encadré 18.1), du fait de l'élargissement spatial des échelles appréhendées.

► L'élargissement de l'horizon spatial : de la parcelle au paysage et au territoire

Alors que les recherches sur la mise au point de techniques, d'itinéraires techniques, puis de systèmes de culture, sont longtemps restées cantonnées à la parcelle, des travaux sur la conception de systèmes de culture à l'échelle du paysage, puis du territoire (incluant les acteurs, leurs réseaux et leurs stratégies), ont été entrepris à partir du milieu des années 2000.

Dans un premier temps, le département EA a mis à son agenda la modélisation spatialement explicite de l'agroécosystème (1999-2002), intégrant transferts verticaux et horizontaux non seulement de variables physiques, classiques pour le département (chaleur, eau, sédiments, gaz), mais aussi de variables biologiques plus nouvelles (pollen, spores, graines, particules). Les travaux visaient d'abord la compréhension de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture sur les flux d'eau, de sédiments et d'organismes biologiques (gènes, bioagresseurs), déterminants pour l'agriculture et l'environnement. Dans un second temps, ces modèles ont été mobilisés pour proposer des scénarios pour la gestion collective de la durabilité des résistances des plantes aux pathogènes, du contrôle des maladies et des attaques d'insectes en réduisant le recours aux pesticides, de la qualité de l'eau dans les aires d'alimentation de captage, ou de la coexistence des filières (OGM/non OGM). Puis, plus récemment, en lien avec le développement de l'agroécologie à l'Inra et la mobilisation d'objets et de concepts issus de l'écologie, les recherches à cette échelle ont intégré les espaces semi-naturels, non cultivés mais anthropisés, déterminants pour les cycles des ravageurs et de leurs ennemis naturels (biocontrôle paysager).

Pour favoriser la mobilisation des acteurs concernés par ces problématiques, les chercheurs ont développé, en collaboration étroite avec le département SAD, des méthodes de conception participative²¹⁶. Deux orientations se sont alors dessinées. D'une part, l'intérêt, pour les acteurs, de produire et d'évaluer des scénarios

216. Moraine M., Melac P., Ryschawy J., Duru M., Therond O., 2017. A participatory method for the design and integrated assessment of crop-livestock systems in farmers' groups. *Ecol. Indic.*, 72, 340-351.

prospectifs de ce que pourrait être l'agriculture future dans un territoire a induit le développement de nouveaux outils de scénarisation participative. D'autre part, de développer des méthodes combinant différents outils de surveillance et de pilotage du changement dans le but d'accompagner la transition dans ces territoires, et non plus seulement de construire une cible future partagée. Ces outils ont été utilisés pour l'amélioration de la qualité de l'eau dans les aires d'alimentation de captages. Les recherches sur l'accompagnement du changement pour une transition durable des territoires n'en sont qu'à leurs débuts. Leur amplification dans l'avenir est une condition indispensable à la contribution de la recherche aux changements profonds de l'agriculture qui sont attendus pour relever les défis majeurs du XXI^e siècle. Il ne s'agira plus, dans le futur, uniquement de concevoir des organisations spatiales virtuelles de systèmes de culture, mais d'aider les acteurs, par des méthodes et outils adaptés, à gérer les coordinations entre eux, à construire collectivement et à animer dans la durée des projets collectifs ambitieux (ex. : reconnecter culture et élevage, boucler les cycles des nutriments). Cet objectif suppose une mobilisation des connaissances des praticiens dans les processus de conception. Si des travaux ont commencé à aborder cette question, elle constitue un des défis scientifiques du futur pour le département EA, pour lequel la collaboration avec le département SAD est indispensable.

► Les connaissances mobilisées dans la conception : du règne des modèles à l'irruption des savoirs profanes

La conception de nouveaux systèmes de cultures s'est beaucoup appuyée sur la modélisation, car les modèles intègrent les interactions entre techniques, et entre techniques et états du milieu et du peuplement, rendent compte des processus influencés par le climat et les modes de gestion, et peuvent *a priori* couvrir de larges gammes de conditions agricoles. Ils constituent de ce fait de très bons outils candidats pour gérer la complexité des agrosystèmes. Cette caractéristique a conduit à de très nombreux exemples d'utilisations de modèles pour proposer des modifications techniques dans la recherche. Sur la base de cette expérience, une formalisation de l'usage de modèles pour la conception a été proposée (Bergez *et al.*, 2010).

La modélisation des agroécosystèmes s'est beaucoup développée dans le département EA depuis sa création, et le système de culture a progressivement trouvé sa place dans les modèles. Citons le cas exemplaire du modèle de culture Stics, dont les formalismes ont été choisis pour leur robustesse face à la diversité des situations agricoles et la prise en compte des techniques culturales dans la simulation des interactions eau-azote²¹⁷, et qui a été progressivement enrichi pour prendre en compte les successions de culture, les cultures intermédiaires, les cultures pluriannuelles et les bioagresseurs (voir chapitre 9). Des modèles spécifiques ont également été développés pour rendre compte des effets cumulatifs des techniques culturales : modèle simulant l'évolution de la structure du sol en relation avec les opérations de travail du sol, modèle simulant les effets des systèmes de culture sur les adventices, ou sur l'évolution des résistances des populations de bioagresseurs. Pour raisonner la

217. Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B. *et al.*, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.

conception et l'insertion d'innovations techniques dans les systèmes de culture et les exploitations agricoles, des couplages spécifiques de modèles ont été proposés : couplage entre modèles de culture, de tassements du sol et d'organisation du travail pendant des périodes de compétition entre opérations techniques pour concevoir des idéotypes variétaux ; modèles de culture couplés avec des typologies d'exploitations agricoles, pour évaluer l'adaptation d'innovations aux caractéristiques des exploitations et mieux cibler les innovations à privilégier selon le contexte.

Cependant, en France comme à l'étranger, de nombreux travaux ont fait le constat d'une faible mobilisation des modèles en dehors de la recherche, alors qu'ils étaient souvent présentés comme susceptibles d'outiller les changements techniques²¹⁸. Ce constat est en partie lié au faible nombre de facteurs pris en compte dans la plupart des modèles : à côté des conditions climatiques, seuls l'eau et l'azote sont, la plupart du temps, simulés, deux facteurs sur lesquels les connaissances sont les plus riches et les mieux quantifiées. Ce constat a suscité des travaux, d'une part, sur les caractéristiques que devraient avoir les modèles pour favoriser leur mobilisation par des acteurs, d'autre part, sur l'intérêt et les modalités de la mobilisation de leurs futurs utilisateurs dès la conception des modèles, et enfin sur le couplage entre modèles de culture et règles de décision des acteurs. Ces réflexions ont également abouti à la construction de modèles spécifiques, manipulables par les acteurs eux-mêmes, pour favoriser leur autonomie dans la conception de changements de pratiques : par exemple le modèle dynamique Syst'N (voir encadré 13.3), qui simule l'ensemble des pertes azotées liées aux successions de culture et itinéraires techniques sur une parcelle, le modèle quantitatif PerSyst, qui simule l'ensemble des techniques culturales et successions en grande culture, et paramétré à dire d'experts, ou le modèle qualitatif hiérarchisé Ipsim, qui simule les infestations liées aux bioagresseurs en fonction des techniques et des conditions biotiques et abiotiques de l'environnement pour la diversité des conditions agricoles. L'implication des acteurs dans la construction des changements de pratiques agricoles à ces échelles a ainsi progressivement conduit à un changement dans les types de modèles mobilisés, mais aussi à leur mise en place dans le processus de conception.

On observe depuis une dizaine d'années une mobilisation, de plus en plus fréquente, des connaissances des acteurs de terrain dans les démarches de conception de systèmes techniques. Cette évolution est en partie motivée par l'incapacité des connaissances scientifiques incorporées dans les modèles à couvrir une large gamme de facteurs, de conditions et de techniques rencontrées dans la réalité agricole, nécessaire pour une adaptation locale des pratiques et des innovations. Paradoxalement, cette inadéquation des modèles à prendre en compte la diversité régionale des conditions de production s'est accentuée avec le raffinement des modèles et la prise en compte d'un nombre croissant de processus : en effet, comme le soulignait déjà Passioura en 1996, au-delà d'un certain seuil, l'accroissement de la complexité d'un modèle n'augmente pas ses capacités prédictives, à cause de l'augmentation des erreurs liées à l'estimation de paramètres et de variables d'entrée en nombre croissant. Pour pallier cette difficulté, la mobilisation de savoirs d'origines diverses est au cœur des démarches participatives, formalisées par

218. Prost L., Cerf M., Jeuffroy M.-H., 2012. Lack of consideration for end- users during the design of agronomic models. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 32, 581-594.

exemple dans les ateliers de conception qui font appel aux acteurs de l'agriculture. Le développement de travaux de capitalisation de l'énorme masse de connaissances des acteurs de terrain, pour accompagner la conception de systèmes adaptés localement, démarrés récemment autour de l'outil GECO²¹⁹ du plan Écophyto, constitue un enjeu fort pour l'avenir de l'agriculture.

► De la conception basée sur un diagnostic agronomique à la mobilisation des méthodes multicritères

Les agronomes se sont, depuis longtemps, appuyés sur des diagnostics *a posteriori* pour identifier les pratiques à l'origine du dysfonctionnement de l'agrosystème ou de la non-atteinte de certaines performances visées, ou atteintes dans des conditions proches. Le diagnostic agronomique régional²²⁰ constitue ainsi, depuis longtemps, un point de départ pour l'amélioration des systèmes de culture. L'articulation entre diagnostic et conception a pris différentes formes, selon les cas explorés, résumées par Meynard *et al.* (2001) et illustrées sur la figure 18.1 :

- le diagnostic, réalisé à la fin du cycle de culture, permet de hiérarchiser les améliorations techniques à réaliser, sous la forme de recommandations ou de préconisations auprès des acteurs locaux ;
- les résultats du diagnostic permettent de constituer la base de la construction d'un modèle semi-empirique, utilisé pour la conception d'itinéraires techniques : le diagnostic est alors mobilisé pour hiérarchiser les processus et facteurs à prendre en compte dans le modèle, et pour établir certaines relations quantitatives ;
- le diagnostic réalisé lors du test d'innovations dans des réseaux de parcelles permet d'améliorer celles-ci et de connaître leur domaine de validité.

Après 1998, deux évolutions ont marqué le diagnostic agronomique : d'une part un élargissement de la gamme des variables de sortie considérées vers des critères de qualité des produits récoltés, des impacts environnementaux, et des *trade-offs* entre critères parfois antagonistes, et d'autre part des progrès méthodologiques. Cependant, malgré son intérêt pour l'amélioration des pratiques, du fait de la lourdeur de sa mise en œuvre et du fait du faible écho de cette méthode dans

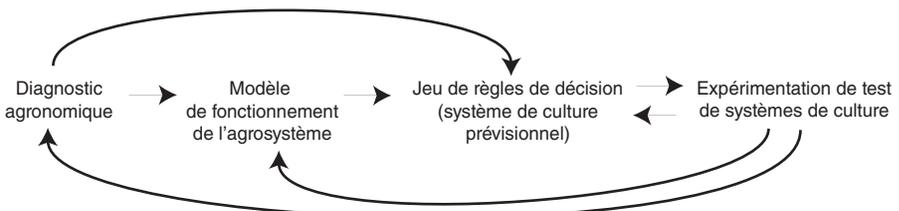


Figure 18.1. Démarche de mise au point et d'amélioration des systèmes de culture (d'après Meynard *et al.*, 2001).

219. Trouche L., Aubin S., Soullignac V., Guichard L., 2016. Construction d'un modèle sémantique pour organiser les connaissances dédiées à l'agroécologie. Le cas d'Agro-PEPS/GECO. *Agronomie Environnement et Sociétés*, 6 (2), 141-150. <http://geco.ecophytopic.fr/>.

220. Doré T., Sebillotte M., Meynard J.-M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agr. Syst.*, 54, 169-188

la littérature internationale, l'utilisation du diagnostic agronomique reste limitée dans les travaux de recherche sur la conception des systèmes.

Initiée dans les années 1990, la construction d'indicateurs d'évaluation des systèmes de culture a plus fortement contribué à la conception de systèmes de culture. La diversité des indicateurs pris en compte a permis de prendre en charge les trois piliers du développement durable (voir chapitre 10). Par ailleurs, le développement et l'organisation de bases de données partagées et structurées ont abouti à une homogénéisation des paramètres mobilisés pour leur calcul, en particulier pour les indicateurs issus de l'analyse de cycle de vie (ACV). La facilité de calcul des indicateurs a entraîné une explosion de leur développement et un déploiement de l'évaluation multicritère, aujourd'hui fréquemment utilisée dans les processus de conception-évaluation, soit *ex ante* (tri de solutions candidates), soit *ex post* (dans des expérimentations-système ou des parcelles d'agriculteurs). Les batteries d'indicateurs aujourd'hui disponibles (ex. : Indigo[®], MASC, ACV) constituent un véritable progrès pour proposer une vision multicritère du système, notamment avec une large prise en compte des impacts environnementaux. Cependant, elles conduisent à standardiser et à normer l'évaluation, en évacuant les critères de choix des acteurs, critères pourtant essentiels pour comprendre et orienter leurs actions. Par ailleurs, elles ne permettent pas de rendre visible la construction des solutions candidates, car les indicateurs ne donnent pas accès aux facteurs explicatifs d'un défaut de performance, ni aux processus sur lesquels agir pour améliorer les performances finales. Le développement d'indicateurs intermédiaires pour piloter la conception constitue aujourd'hui un défi pour accompagner une profonde reconception des systèmes chez les acteurs dans le cadre de la transition agroécologique, comme proposé par exemple dans les tableaux de bord.

Alors que la conception a été l'apanage des chercheurs dans les dernières décennies, on assiste actuellement au développement des dynamiques de conception dans le développement agricole, et chez les acteurs concernés par l'agriculture en général. Face à cette évolution, la recherche se concentre davantage sur la production de méthodes et d'outils pour accompagner ces dynamiques.

► De la conception par les agronomes à la conception par les agriculteurs

Pendant les années 1980-2000, et encore aujourd'hui, la conception de systèmes visant à atteindre de nouveaux objectifs était avant tout une affaire d'agronomes, chercheurs et ingénieurs du développement agricole (Reau et Doré, 2008). Des agronomes ont ainsi conçu des prototypes de systèmes de culture économes en intrants, de systèmes peu émetteurs en GES ou peu consommateurs en énergie fossile, de systèmes valorisant les légumineuses, etc. Ces prototypes sont destinés à être testés dans des expérimentations-système en station expérimentale ou chez des agriculteurs, puis à être diffusés vers les agriculteurs.

Cependant, du fait de l'existence d'interactions fortes entre pratiques et environnement, mais aussi parce que les agriculteurs n'ont pas tous les mêmes objectifs pour leurs systèmes de production, ces prototypes ne sont jamais appliqués tels quels : *a minima*, l'agriculteur adapte les prototypes à sa propre situation, mais le plus souvent il réinvente un nouveau système, les prototypes lui servant de source d'inspiration.

Aujourd'hui, contestant les processus d'innovation descendants, inadaptés à la diversité des conditions d'exercice de l'activité agricole, les chercheurs considèrent les agriculteurs comme des sources majeures d'innovation. Depuis les années 2010, certains agronomes ont orienté leurs travaux vers la mise au point de méthodes, outils et ressources pour accompagner la conception par les agriculteurs (Reau et Doré, 2008) : par exemple les ateliers de conception avec les agriculteurs, le guide Stephy, l'outil AgroPeps/GECO, le jeu sérieux Rami Fourrager²²¹. Cette orientation vers des recherches participatives, qui constitue un axe fort et structurant de collaborations avec le département SAD pour une agronomie ancrée dans la réalité agricole, reste cependant minoritaire au sein du département EA.

La conception de systèmes de culture par et avec les agriculteurs a été formalisée en deux grandes approches²²¹ (tableau 18.1). D'une part, la conception *de novo* vise à concevoir des systèmes cibles performants sans se préoccuper, au moins dans un premier temps, de la transition, de la manière de passer du système actuel à l'innovant. On privilégie l'invention, la rupture. Les recherches sur la conception *de novo* par les agriculteurs se sont largement inspirées des méthodes de prototypage (Lançon *et al.*, 2007), combinant la mobilisation de connaissances scientifiques et expertes, et se sont déployées dans le développement agricole sous la forme d'ateliers de conception. Ainsi, entre 2007 et 2011, 37 ateliers de conception réalisés par la recherche et/ou le développement agricole ont été recensés en France ; depuis, de nombreux conseillers se sont approprié la démarche. D'autre part, la conception *pas-à-pas*, qui vise à organiser le changement. Un système existant sert de point de départ ; il est graduellement modifié en s'appuyant sur des boucles d'apprentissage, pour aboutir à un système innovant qui n'était pas connu à l'avance. La conception *pas-à-pas* se prête bien à une mobilisation progressive des agriculteurs, dans une démarche de développement. Le producteur, souvent accompagné par un technicien ou par un collectif de pairs, met au point, année après année, son nouveau système, en même temps qu'il apprend à le piloter, se convainc de son intérêt, et réorganise progressivement son travail et ses moyens de production. Dans les deux cas, des ruptures par rapport aux systèmes actuels sont nécessaires pour atteindre

Tableau 18.1. Les deux familles d'approches pour la conception innovante de systèmes de culture ou d'élevage (d'après Meynard et Dourmad, 2014. *Prod. Anim.*, 27, 77-88).

	Conception <i>de novo</i>	Conception <i>pas-à-pas</i>
Principe général	Invention d'un système en rupture par rapport à l'existant	Évolution progressive d'un système existant
Conduite de la transition	Non	Oui
Méthodes	Exploitation à l'aide de modèles agronomiques ou zootechniques ; ateliers de conception participative	Boucle d'amélioration continue : diagnostic du système actuel, identification de solutions, mise en œuvre, nouveau diagnostic...
Avantages	Exploration de solutions très innovantes ; source d'inspiration pour la conception <i>pas-à-pas</i>	Apprentissage progressif des nouveaux systèmes ; adaptation aux contraintes spécifiques de la ferme
Risques	Faible réalisme	Conservatisme

221. Meynard J., Dedieu B., Bos A., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic* (Darnhofer I., Gibon D., Dedieu B., eds), Springer, Paris, 407-432.

des combinaisons d'objectifs ambitieux. Pour faciliter de telles ruptures, la conception innovante, formalisée dans le cadre de la théorie C-K, est de plus en plus mobilisée par les agronomes (Prost *et al.*, 2017) pour organiser et gérer les processus de conception et leur relation avec la production de connaissances.

Dans cette perspective, des ressources pour le pilotage de la conception *pas-à-pas* tenant compte des interactions pluriannuelles ont été développées : le schéma décisionnel, le tableau de bord, des indicateurs. Dans le futur, de tels outils devraient être plus largement proposés par la recherche pour accompagner et faciliter ces processus et la transition agroécologique. Pour permettre aux agriculteurs de choisir, parmi une diversité presque infinie de solutions techniques, les méthodes d'évaluation ont également évolué, non seulement en passant d'une évaluation monocritère à une évaluation multicritère aujourd'hui systématique, mais également en passant d'une vision stricte du chercheur, qui définit les indicateurs pertinents, à une prise en compte des critères d'évaluation des acteurs, y compris de la pluralité des visions d'un collectif d'acteurs.

► Le développement des expérimentations-système

Le besoin de conception de systèmes de culture innovants a également conduit à un renouvellement des modalités d'expérimentation en agronomie. S'appuyant sur une synthèse des modalités d'expérimentation de nouveaux itinéraires techniques dans des réseaux de parcelles agricoles²²², c'est à la fin des années 1990 que se sont réellement développées les expérimentations de systèmes de culture. L'Action incitative programmée Gestion des intrants a d'abord permis la naissance de trois expérimentations de systèmes de culture, à Toulouse, Rennes et Versailles (Debaeke *et al.*, 2009), dispositif auquel l'essai de Dijon, focalisé sur la gestion intégrée des adventices, s'est ensuite ajouté. Sur la base des acquis méthodologiques, et en relation avec le développement des ateliers de conception de systèmes de culture innovants chez nos partenaires, les essais-système de culture se sont ensuite largement déployés dans le cadre du RMT Systèmes de culture innovants : près de 80 essais comparant des systèmes de culture ont été mis en place en France à partir de 2008.

Une nouvelle manière d'expérimenter a ainsi vu le jour, avec des ruptures conceptuelles et méthodologiques :

- on teste des systèmes de culture, et non plus des techniques toutes choses égales par ailleurs. Cela nécessite d'anticiper l'ensemble des modalités techniques qui seront mises en œuvre à l'échelle pluriannuelle, alors qu'on ne connaît pas, à l'avance, les résultats annuels ni les états du milieu qui peuvent influencer les choix techniques sur chaque culture. Alors que l'expérimentation factorielle classique vise à séparer les effets des techniques, voire à mettre en évidence leurs interactions, on accepte d'emblée que les effets des techniques soient confondus, comme dans la réalité ! C'est la cohérence entre les techniques qui intéresse l'expérimentateur, pas l'effet de chacune d'elles ;
- le test des systèmes consiste à en comparer les résultats aux objectifs et aux principes qui ont présidé à leur conception. On distingue ainsi une évaluation

222. DERF-ACTA, 1996. Expérimenter sur les conduites de cultures : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation. *Journées techniques*, 10 janvier 1996, Paris, 130 p.

globale, qui vise à évaluer les systèmes sur des critères de durabilité, hiérarchisés selon les souhaits des concepteurs ou des utilisateurs, une évaluation agronomique, qui a pour but de vérifier que le modèle conceptuel sous-jacent à la conception est bien valide, et une évaluation de la faisabilité du système. Contrairement à l'expérimentation factorielle classique, la comparaison des traitements expérimentaux (ici, les systèmes testés) n'est pas au cœur de l'analyse des résultats des expérimentations-système ;

- tester des systèmes de culture nécessite de grandes parcelles expérimentales, dont les dimensions sont liées aux largeurs des outils et aux processus mobilisés dans le modèle conceptuel sous-jacent. Comme on ne privilégie pas les comparaisons de traitements expérimentaux, les expérimentateurs renoncent parfois aux blocs-répétitions pour conserver aux essais une taille raisonnable ;

- lorsque les techniques testées n'ont pas permis d'atteindre les objectifs souhaités, on est parfois amené à accepter que les systèmes évoluent au cours du temps. On est alors dans une expérimentation de systèmes conçus pas-à-pas, ce qui n'est pas sans créer de tension avec le souhait de certains expérimentateurs d'organiser des répétitions en mettant en place chaque année toutes les cultures de la succession.

La mise en œuvre des essais-système est généralement fondée sur des règles de décision. Grâce à ce formalisme, il est possible de concilier à la fois une flexibilité d'adaptation des interventions à la diversité des conditions de milieu, et une généralité, permettant aux expérimentateurs d'un réseau de prendre des décisions similaires.

Les productions des expérimentations-système sont de différentes natures : des systèmes innovants, caractérisés par leurs performances, des règles de décision, susceptibles d'être utilisées dans d'autres systèmes, des connaissances fonctionnelles, acquises sur les systèmes évalués mais ayant un caractère plus générique, de nouvelles questions de recherche, issues des résultats ou observations, qui peuvent nécessiter des expérimentations plus analytiques, enfin des apprentissages, pour les expérimentateurs eux-mêmes, concernant la conduite des systèmes, les difficultés de mise en œuvre, les risques, les conditions de réussite. Le partage de ces apprentissages est favorisé par l'ouverture des essais-système aux acteurs du monde agricole. En retour, il peut aussi enrichir la conduite des essais par la valorisation de l'expertise des acteurs de terrain.

Les objectifs et thématiques des expérimentations sur les systèmes de culture ont évolué progressivement. Au départ, l'objectif principal affiché était de tester la capacité des chercheurs agronomes à concevoir des systèmes de culture pluriannuels, visant différents objectifs : l'enjeu était alors de prendre explicitement en compte les interactions entre cultures se succédant sur une parcelle, sans connaître *a priori* leurs performances et les états du milieu qu'elles laisseraient. Puis les objectifs ont évolué d'une part vers la capacité à concevoir des systèmes de culture très innovants, par exemple en polyculture-élevage autonome (Lusignan, Mirecourt), en grande culture avec réduction de 50 % des émissions de GES, ou en supprimant l'usage de pesticides (Res0Pest²²³) ; d'autre part vers l'évaluation à long terme, sur le milieu et l'environnement, des impacts de l'implémentation de systèmes de culture innovants (ex. : stock de carbone, infestations en adventices, dynamique d'évolution de la macrofaune et de la microfaune du sol). Cette diversité de thématiques s'est traduite

223. <https://www6.inra.fr/reseau-pic/Pojets/Res0Pest>.

par une diversité des variables et méthodes mobilisées pour évaluer les systèmes testés : du rendement à la prise en compte de la qualité des produits (ex. : les mycotoxines des céréales) et des impacts environnementaux (émissions GES, pollution nitrique, stockage de carbone). L'évaluation multicritère des systèmes conçus est aujourd'hui devenue systématique. Tous ces travaux font l'objet de collaborations étroites avec les départements SAD, Phase et SPE.

Finalement, l'articulation entre prototypage (pour concevoir les systèmes à expérimenter), expérimentation-système, diagnostic et capitalisation des expériences et connaissances acquises constitue pour la conception de systèmes de culture une alternative, puissante et d'une grande flexibilité, à l'utilisation de modèles. Mais si cette combinaison séduit progressivement le monde du développement agricole, elle pose encore des difficultés de reconnaissance dans le monde scientifique, où la publication des travaux basés sur des savoirs experts ou des démarches inductives reste parfois difficile.

► L'élargissement du fossé entre la conception et l'analyse des processus

La mobilisation de connaissances sur le fonctionnement des agroécosystèmes est une étape nécessaire à la conception de systèmes agroécologiques. Dans ce sens, les schémas stratégiques successifs du département EA ont souvent présenté le champ thématique dédié à la conception comme un lieu d'intégration des connaissances analytiques produites dans les autres champs thématiques. Pourtant, on a assisté à un éloignement progressif mais constant entre les disciplines analytiques représentées au sein du département et l'agronomie-système²²⁴, dont une partie des travaux était dédiée à la conception de nouveaux agrosystèmes. Cette séparation, préjudiciable à tous, peut être expliquée par différentes raisons.

La première est liée aux conditions dans lesquelles les connaissances analytiques sont acquises. En effet, en positionnant les travaux dans des environnements simplifiés, et en privilégiant des espèces modèles pour réduire les facteurs de variabilité non souhaités, les spécialistes des processus se sont souvent éloignés du champ cultivé. Ainsi, la gamme des conditions explorées et l'absence de prise en compte du lien à l'action ont conduit à produire des connaissances difficilement mobilisables pour la mise au point de systèmes de culture. Par exemple, les lacunes de connaissances sur l'écophysiologie de nombreuses espèces cultivées handicapent fortement la diversification des systèmes agricoles. De même, les spécificités des dynamiques de l'eau et de l'azote en agriculture de conservation restent trop peu investiguées, en regard des potentialités du développement de ces systèmes agroécologiques.

La deuxième est liée à l'abandon progressif des travaux de diagnostic agronomique, qui permettent de hiérarchiser, au bénéfice des scientifiques comme des agriculteurs et conseillers, les problèmes agronomiques qui se posent en pratique. Peu développé dans la communauté internationale, lourd à mettre en œuvre, difficile à publier, le diagnostic a quasiment disparu dans les deux dernières décennies. Au niveau international, il a été supplanté par l'explosion des travaux sur le

224. Doré T., Makowski D., Malézieux E., Munier-Jolain N., Tchamitchian M., Titttonell P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur. J. Agron.*, 34, 197-210.

concept de *yield gap analysis*, en apparence similaire, mais très différent sur le fond. Le *yield gap analysis* s'est appuyé sur les progrès des connaissances concernant l'estimation des potentiels de rendement, grâce aux modèles de culture. Ce faisant, alors que le diagnostic agronomique s'intéressait de plus en plus à une diversité de performances (notamment des combinaisons de variables de production quantitative, de qualité et de critères environnementaux), le *yield gap analysis*, en se focalisant sur le rendement, a constitué une régression. De plus, même si l'utilisation de modèles de culture constituait une solution pour contourner les problèmes méthodologiques liés à l'estimation des courbes enveloppes, elle ajoute de l'incertitude sur l'estimation des potentiels, liés aux erreurs des modèles, par rapport à une estimation des potentiels basés sur les rendements maximums de la région. Par ailleurs, le concept de *yield gap* reste axé sur une approche de type « facteur limitant », dont la réduction passe avant tout par l'utilisation accrue d'intrants externes, conduisant aux nuisances environnementales bien connues de l'agriculture moderne. Enfin, l'approche par culture, qui domine dans ces analyses, n'ouvre aucune piste au niveau du système de culture, ce qui serait pourtant indispensable à une orientation des systèmes vers plus d'agroécologie.

La troisième est relative aux orientations de la modélisation. Si ces outils d'intégration des connaissances ont constitué une avancée incontestable pour rendre compte des interactions complexes dans les agrosystèmes, la structuration des communautés de modélisation et des infrastructures permettant des progrès énormes dans ce domaine (structuration des bases de données et des outils de travail sur les modèles) a amené les modélisateurs à organiser leurs recherches autour de ces outils, plus que dans l'interaction avec leurs possibles utilisateurs. Ainsi, les travaux ont avant tout visé²²⁵ à intégrer davantage de processus pour élargir (mais seulement en théorie) leur domaine de validité et leur qualité prédictive, à améliorer les méthodes d'évaluation et d'estimation de leurs paramètres, enfin à comparer les performances d'une grande diversité de modèles dans des communautés internationales dédiées. Cette orientation, reconnue comme un progrès dans la communauté scientifique, a malheureusement conduit à délaissé la question cruciale des relations entre la structure des modèles et leur usage pour la conception de nouveaux modes de production.

Enfin, les progrès dans les sciences de la conception montrent qu'il existe des allers-retours permanents entre processus d'exploration et production de connaissances, au sein d'un processus de conception. La dynamique de conception nécessite souvent une production de connaissances spécifiques, car non disponibles. Or, les priorités en matière de besoin de connaissances, identifiées lors de la conception, sont rarement prises en charge par les spécialistes, probablement du fait de la séparation entre les communautés scientifiques, mais aussi du fait de la manière de définir les priorités dans les disciplines en amont. Les agronomes-systèmes sont ainsi contraints de produire des connaissances analytiques spécifiques, nécessaires à la conception. Comment développer, au sein du département EA ou au sein de l'Inra, un partage des questions de recherche entre les champs thématiques ?

225. Wallach D., Makowski D., Jones J.W., 2006. *Working with Dynamic Crop Models*, Elsevier eds.

► Conclusion

Les vingt dernières années ont été caractérisées par d'importants progrès méthodologiques de la recherche en agronomie systémique sur la conception de systèmes de culture. De plus, la prise de conscience, par le monde agricole, des multiples enjeux auxquels l'agriculture doit faire face a renforcé la place du système de culture pour conduire les changements nécessaires. Grâce à un travail main dans la main avec le développement agricole, la conception de systèmes de culture est ainsi devenue un savoir-faire d'un nombre croissant de conseillers agricoles et d'ingénieurs d'instituts techniques, et est enseignée dans les lycées agricoles. On peut donc se féliciter de la réussite de cette thématique, aussi bien dans la recherche académique que dans le milieu socioprofessionnel !

Ce thème, et cet objet, sont également reconnus par les pouvoirs publics : ces derniers s'appuient sur les systèmes innovants pour nourrir les politiques agricoles vers l'agroécologie ; ils reconnaissent la contribution importante des praticiens dans cette reconception, et soutiennent les initiatives dans des dispositifs collectifs innovants (réseaux mixtes technologiques, groupements d'intérêt économique et environnemental, partenariat européen pour l'innovation ; réseaux Dephy-Ferme, etc.).

Du côté de la recherche, la conception de systèmes de culture agroécologiques reste un front de recherche actif, avec deux évolutions naissantes mais majeures pour l'avenir : l'ouverture vers les systèmes alimentaires et l'ouverture vers la transition agroécologique.

Pour en savoir plus

- Bergez J.E., Colbach N., Crespo O., Garcia F., Jeuffroy M.H., Justes E., Loyce C., Munier-Jolain N., Sadok W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *Eur. J. Agron.*, 32, 3-9.
- Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.M., Faloya V., Saulas P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 73-86.
- Lançon J., Wery J., Rapidel B., Angokaye M., Gérardaux E., Gaborel C., Ballo D., Fadegnon B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agron. Sustain. Dev.*, 27, 101-110.
- Meynard J.M., Doré T., Habib R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Acad. Agric. Fr.*, 87, 223-236.
- Passioura J.B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal*, 88, 690-694.
- Prost L., Berthet E.T.A., Cerf M., Jeuffroy M.-H., Labatut J., Meynard J.-M., 2017. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Res. Eng. Des.*, DOI: 10.1007/s00163-016-0233-4.
- Reau R., Doré T., 2008. *Des systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?*, Éditions Educagri.

Étudier la conversion vers l'agriculture biologique : le cas des systèmes viticoles

Anne Mérot

L'agriculture dite « biologique » a des racines anciennes. Pourtant, ce n'est qu'au début des années 1980 qu'elle commence à recevoir, en France, une définition légale en tant qu'« agriculture n'utilisant pas de produits chimiques de synthèse ». Elle reçoit en 1985 un label officiel correspondant à un cahier des charges clairement spécifié. Au début de la décennie suivante, le label Agriculture biologique (AB) est encadré par une réglementation européenne. Ce mouvement s'inscrit alors dans la montée en puissance d'une politique active des « signes de qualité ». Plus largement, la poussée de l'agriculture biologique est une composante de la « diversification des modèles de développement agricole » qui se traduit, au début des années 2000, par la reconnaissance de la multifonctionnalité de l'agriculture. La direction de l'Inra contribue d'ailleurs à cette reconnaissance en soutenant les recherches en sciences sociales. Pour ce qui est de la politique agricole, c'est à l'approche du tournant des années 2000 et 2010 que les pouvoirs publics français engagent une politique volontariste de soutien à la « conversion » des exploitations agricoles de l'agriculture dite « conventionnelle » vers l'agriculture biologique. Dans ce contexte, l'Inra investit alors dans de grands programmes européens dédiés. Le renoncement à l'emploi des intrants « de synthèse » offre à la recherche un support privilégié pour l'étude du fonctionnement de systèmes agricoles « écologiquement intensifs ». Dans leur nécessaire diversité adaptative, ceux-ci ne peuvent relever de l'approche expérimentale factorielle qui a prévalu pour la mise au point des techniques de la première révolution verte. L'observation des processus en vraie grandeur dans les exploitations agricoles, les expérimentations de longue durée de systèmes de culture et la modélisation intégrative en sont des outils privilégiés. C'est un exemple d'observation qui est présenté ici, mais l'ensemble de la démarche émerge en particulier des chapitres relatifs aux systèmes de culture et à la modélisation. Plus globalement, cet ouvrage entier traduit l'engagement au service de l'agroécologie, dans toutes les modalités par lesquelles elle se développera.

Les systèmes labellisés AB se développent rapidement à partir des années 2000. La transition de systèmes conventionnels, alors dominants, vers ces systèmes AB n'avait pas, jusqu'ici, été étudiée par les agronomes. Cet objet d'étude était alors uniquement appréhendé par les sciences humaines et sociales, laissant dans l'ombre la dimension biotechnique de cette transition. Des recherches sur la transition des systèmes viticoles vers l'AB ont été lancées en 2008 dans le département EA, au début de la grosse vague de conversion française, et se poursuivent depuis. En effet, la conversion au bio est d'abord décrite par les agriculteurs comme une évolution des pratiques agricoles, objet d'étude privilégié des agronomes.

Trois périodes jalonnent ces dix dernières années de recherche : une phase de compréhension des changements techniques et économiques, principalement à l'échelle de l'exploitation agricole ; une phase de compréhension de l'impact, sur le système biophysique, des changements techniques mis en œuvre à l'échelle de la parcelle ; une phase d'analyse plus précise des performances. Ces trois étapes constituent un préalable à une quatrième étape de conception qui démarre tout juste.

La première période de travail s'est appuyée très largement sur un travail d'enquêtes auprès de vignerons. Nous avons mis en évidence quatre types de dynamiques de conversion dans les systèmes viticoles méditerranéens. Certaines conversions marquent l'officialisation d'un ensemble de pratiques répondant au cahier des charges AB, ces pratiques ayant évolué très progressivement sur une dizaine d'années. Ainsi, au moment du démarrage de la conversion, l'ensemble des éléments du cahier des charges est déjà atteint : la fertilisation est déjà organique et la gestion des adventices est déjà gérée en travail mécanique. À l'opposé, la demande toujours plus forte pour les produits labellisés AB a conduit à des conversions rapides, plus opportunistes. Il s'agit alors d'une vraie rupture dans la trajectoire de l'exploitation, puisque le changement de pratiques est mis en œuvre sur trois ans et se traduit aussi par des changements dans les facteurs de production (surface en production, main-d'œuvre, équipements) ainsi que dans le système décisionnel (davantage de règles de

décision). Ainsi, il s'agit de faire évoluer, rapidement, l'itinéraire technique en conventionnel, basé sur l'utilisation de produits de synthèse pour la gestion des bioagresseurs, la fertilisation minérale et le désherbage chimique sous le rang. L'intensité des changements et leur vitesse peuvent donc être très différentes d'une exploitation agricole à l'autre, rendant plus ou moins risquée la période de conversion et positionnant tantôt la conversion comme un important changement d'orientation de l'exploitation agricole, tantôt comme une étape dans une démarche d'innovation incrémentale.

Par ailleurs, tous les types de conversion sont marqués par des changements, même celle de type « officialisation du label ». Dans ce dernier cas, les changements de pratiques vont au-delà du strict label bio (ex. : introduction d'enherbement semé en inter-rang, mais aussi ajustements des doses apportées ou des produits utilisés). Des changements d'équipements sont aussi observés, comme l'achat d'un intercep hydraulique pour le désherbage mécanique sous le rang de vigne, les aides permettant d'acheter du matériel plus moderne et perfectionné. La conversion s'accompagne également d'une augmentation du temps de travail, de 29 % en moyenne dans les systèmes viticoles méditerranéens. Pour limiter cette augmentation du temps de travail, on observe souvent un ajustement de la surface en production — par arrachage d'une parcelle peu adaptée au mode de production AB — dans le but de rééquilibrer le rapport surface travaillée/main-d'œuvre. En production conventionnelle, ce ratio est de 15-20 ha pour 1 UTH, alors qu'en mode AB il tombe à 10-15 ha pour 1 UTH.

Selon le type de conversion, les changements n'interviennent pas la même année. En cas de conversion rapide en rupture, on assiste plutôt à une substitution de produits la première



Décorticage de grappes de raisins aux vendanges : tri des grappes saines et des grappes abîmées pour évaluation du niveau sanitaire de parcelles en cours de conversion, puis diagnostic agronomique (© A. Mérot).



Parcelles en cours de conversion vers l'AB côtes-du-ventoux, Vaucluse. Enherbement naturel contrôlé dans l'inter-rang et travail du sol mécanique sous le rang (© A. Mérot).

année, suivie d'une reconception du système viticole la deuxième année. La conversion à l'AB se traduit par une complexification de l'organisation du système viticole à l'échelle de l'exploitation agricole, notamment par une augmentation du nombre d'itinéraires techniques viticoles et du nombre d'indicateurs de prise de décision.

Nos deuxième et troisième étapes de travail se sont structurées autour d'un diagnostic agronomique sur des parcelles viticoles en conversion. Nous montrons que tous ces changements à l'échelle de l'exploitation se traduisent par des baisses progressives de rendement jusqu'en deuxième année de conversion, puis une remontée dès la troisième année de conversion, pour retrouver à peu près le niveau avant conversion. Cette dynamique dans les performances agronomiques est à mettre en relation avec les dynamiques des bioagresseurs et du statut azoté de la plante. Le rendement de la vigne s'élabore sur deux ans. Par exemple, il semblerait que des stress azotés en première année de conversion limitent l'initiation des inflorescences et entraînent une baisse de rendement l'année suivante, soit en deuxième année de conversion. Concernant les bioagresseurs, les sévérités augmentent pendant les deux premières années de conversion avant de retomber à des niveaux parfois plus faibles qu'en conventionnel. Ceci s'explique par un temps d'apprentissage nécessaire pour appréhender les nouveaux produits de traitement autorisés en bio et un temps d'ajustement de la nouvelle stratégie phytosanitaire. En effet, les produits de traitements en AB sont non systémiques et facilement lessivables, ce qui nécessite d'ajuster les stratégies de contrôle des bioagresseurs.

Dans notre travail, le choix a été fait d'étudier la conversion en contexte réel de production chez les viticulteurs (enquêtes compréhensives sur les trajectoires de conversion et diagnostic agronomique sur un réseau de parcelles ou d'exploitations agricoles). Ce positionnement nous a permis de transmettre rapidement aux viticulteurs nos résultats de recherche. Par ailleurs, les projets dans lesquels ont été réalisées ces études ont toujours comporté au moins un volet économique à l'échelle de l'exploitation agricole et un volet strictement biophysique, en particulier en pathologie de la vigne. L'analyse pluridisciplinaire des conversions a ainsi permis de créer des ponts solides entre plusieurs équipes de recherche Inra et plusieurs départements, dont les départements SAD et SPE.

Caractériser la diversité des formes d'agriculture

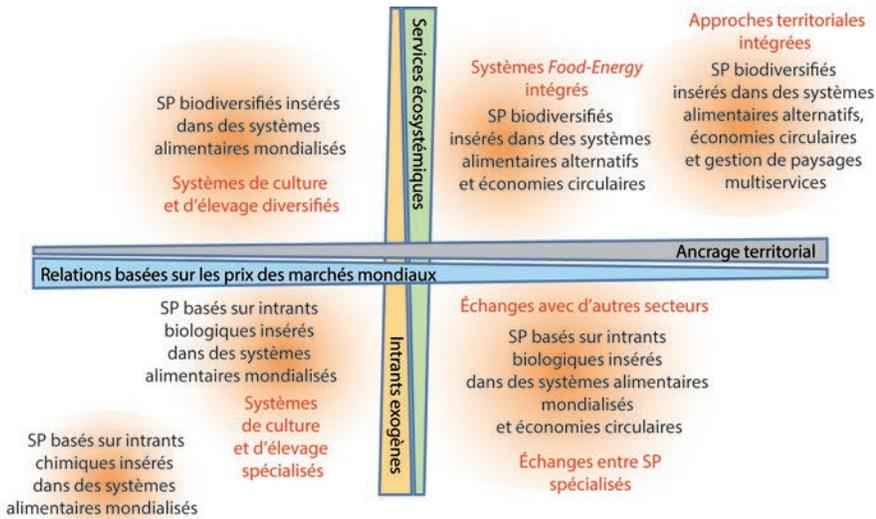
Guy Richard, Olivier Therond, Michel Duru, Jean Roger-Estrade

Agriculture biologique, agriculture de précision, écoagriculture, permaculture, agriculture naturelle, agriculture de conservation, agriculture climato-intelligente... les qualificatifs foisonnent aujourd'hui pour désigner des formes d'agriculture²²⁶, plus ou moins anciennes, qui cherchent à répondre à des enjeux de durabilité. Elles recouvrent une grande diversité de pratiques, de méthodes et de systèmes de production. Elles présentent des performances environnementales et socio-économiques variées. Caractériser scientifiquement sur les plans agronomique et économique ces formes de production est l'objectif de chercheurs du département EA en élaborant un cadre d'analyse qui les situe par rapport à deux axes.

Les formes d'agriculture se différencient d'abord par les stratégies et les pratiques développées par les agriculteurs, qui peuvent aller d'une artificialisation du milieu (ou des conditions d'élevage) par l'apport d'intrants industriels à une mise en valeur des services écosystémiques (axe vertical).

Elles se différencient également par leur degré d'insertion dans le contexte du marché et dans leur territoire ; ce degré d'intégration des systèmes de production dans les différents contextes socio-économiques détermine le poids relatif des relations basées sur le prix des intrants et produits agricoles des marchés globalisés face à celles basées sur des objectifs sociaux (équités, répartition de la valeur ajoutée...), de respect de l'environnement ou de relocalisation (axe horizontal).

Ce cadre d'analyse clarifie la structure des systèmes alimentaires du « local » au « global ». Toutes les formes d'agriculture n'ont pas les mêmes besoins de recherche, mais elles ont toutes besoin de méthodes d'évaluation de leur multiperformance.



Quelques formes d'agriculture en fonction des intrants mobilisés et de leur ancre territoriale. SP : système de production.

226. Therond O., Duru M., Roger-Estrade J., Richard G., 2017. A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. *A review. Agronomy for Sustainable Development*, 37 (3), 24 p.

CONCLUSION

Environnement et agronomie au **xxi^e** siècle, et maintenant ?

*Philippe Hinsinger, Pierre Cellier, Thierry Doré, Marie-Hélène Jeuffroy,
Claire Lavigne, Nathalie Munier-Jolain, Guy Richard*

Cet ouvrage retrace le chemin parcouru depuis la création du département Environnement et Agronomie (EA) en 1998, et souligne les défis scientifiques et sociétaux que l'Inra a su relever au cours des deux premières décennies du **xxi^e** siècle. Il illustre les changements opérés au sein du département EA, changements allant parfois jusqu'à la rupture par rapport aux approches plus monodisciplinaires et sensiblement moins holistes qui, excepté dans le champ de l'agronomie systémique, étaient très présentes dans les trois départements de l'Inra ayant conduit à sa fondation : les départements d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol. Ce nouveau cadre a été favorable au développement d'interactions entre les disciplines que ces trois départements rassemblaient. Cependant, la distanciation entre l'agronomie systémique et les disciplines analytiques d'amont, situées au cœur du département EA, a plutôt augmenté au fil du temps, alors qu'il serait judicieux, face aux défis actuels, qu'elles se nourrissent davantage les unes des autres²²⁷. Au-delà de l'agrégation des compétences issues de ces départements fondateurs, les nouvelles problématiques abordées au cours des deux décennies passées ont conduit à élargir sensiblement la palette des disciplines représentées en son sein, dans le domaine des sciences de l'environnement et des sciences du vivant, et tout particulièrement de l'écologie (écologie des communautés, écologie fonctionnelle, voire évolutive, écologie du paysage). Au-delà de la pluridisciplinarité qui caractérise le département EA depuis sa création, c'est le développement important de l'interdisciplinarité

227. Doré T., Makowski D., Malézieux E., Munier-Jolain N., Tchamitchian M., Tittone P., 2011. Facing up the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur. J. Agron.*, 34,197-210.

EnjS1 : Production végétale pour de nouveaux usages et contextes**Trois objectifs opérationnels**

001. Évaluer et prédire les performances productives d'une large gamme d'espèces et de variétés et de leurs assemblages (intra- et interspécifiques) pour répondre aux besoins de diversification dans un contexte de changement climatique
002. Piloter l'élaboration de la qualité des produits et coproduits (au-delà des critères technologiques : valeur santé, aspects organoleptiques et esthétiques) par la variété, la conduite et le système de culture tout au long de l'agro-chaine (de la semence à la 2^{de} transformation)
003. Identifier des traits d'intérêt et concevoir des idéotypes variétaux afin de contribuer à la construction et à la valorisation de l'innovation variétale pour une agriculture multi-performante

Cinq fronts de science

- FS1. Comprendre le fonctionnement d'une diversité d'espèces et de variétés, et de leurs associations, dans une large gamme de contextes liés au changement climatique et renouveler la construction des modèles pour mieux prévoir les interactions G-E-C
- FS2. Développer les méthodes avancées de gestion et d'interprétation fonctionnelle du signal et des données issues de dispositifs de phénotypage à haut-débit
- FS3. Prendre en compte les traits racinaires et rhizosphériques dans les modèles de culture
- FS4. Caractériser et modéliser l'élaboration de la qualité des produits (déterminée à la récolte ou en post-récolte) de manière multicritère et pour différentes combinaisons G-E-C
- FS5. Modéliser le lien génotype-phénotype et sa relation avec l'environnement pour aller jusqu'à l'intégration de caractères quantitatifs et complexes comme la production et la qualité

EnjS2 : Valorisation et gestion de la biodiversité dans les agroécosystèmes**Trois objectifs opérationnels**

001. Évaluer les services des agroécosystèmes relatifs à la fourniture d'éléments minéraux et au contrôle des bio-agresseurs
002. Concevoir des associations végétales au sens large et les moyens de les piloter pour optimiser la fourniture de nutriments aux plantes cultivées tout en limitant la compétition pour la lumière et l'eau
003. Concevoir des modes et des systèmes de contrôle des bioagresseurs basés sur la biodiversité fonctionnelle et le biocontrôle, à plusieurs échelles, de la plante au paysage

Six fronts de science

- FS1. Élaborer des indicateurs et méthodes pour l'évaluation des services écosystémiques
- FS2. Analyser les liens pratiques culturales-biodiversité-fonctions-services écosystémiques
- FS3. Comprendre, modéliser et valoriser les mécanismes d'interactions biotiques multiples et leur pilotage par les pratiques culturales et le génotype des plantes
- FS4. Prévoir le fonctionnement d'associations végétales en fonction de leur composition, de leur configuration spatiale et temporelle et de leur conduite, en termes de fourniture et d'utilisation des ressources
- FS5. Comprendre pour la planifier les effets de l'organisation spatiale de la diversité végétale (parcelles, paysages) sur le contrôle des bioagresseurs
- FS6. Mener des démarches intégratives pour promouvoir les synergies et complémentarités entre méthodes de contrôle des bioagresseurs basées sur la biodiversité fonctionnelle et le biocontrôle

EnjS3 : Gestion, protection et restauration des ressources air, eau et sol**Trois objectifs opérationnels**

001. Contribuer aux diagnostics environnementaux de l'état des ressources en air, eau et sol et de leurs évolutions afin d'évaluer leurs disponibilités et potentialités pour la production agricole et autres usages, d'identifier les risques de dégradation et d'aider à l'orientation des politiques publiques
002. Développer les approches de gestion intégrée des milieux et de leurs ressources naturelles (air, eau, sols) afin d'optimiser leur usage agricole tout en préservant, voire restaurant, leur qualité et les services écosystémiques qu'ils procurent
003. Concevoir des méthodologies d'épuration et de remédiation des ressources en air, eau et sol

EnjS5 : Evaluation, conception et pilotage de systèmes agricoles multi-performants**Quatre objectifs opérationnels**

001. Élaborer des méthodes et des outils multi-échelles d'évaluation de systèmes agricoles multi-performants et robustes à destination des acteurs des territoires et des filières
002. Élaborer des démarches de conception et de pilotage de systèmes agricoles multi-performants et robustes intégrant les nouvelles technologies
003. Consolider les dispositifs multi-acteurs pour la construction de systèmes agricoles multi-performants moins vulnérables/plus robustes au sein de territoires et en faire évoluer en living lab
004. Mettre en œuvre une démarche d'évaluation et de conception multi-échelles de systèmes agricoles basés sur la diversification des cultures

Cinq fronts de science

- FS1. Analyser les synergies et les tensions, quantifier les interactions entre (i) les services, nuisances et autres critères de performance des systèmes agricoles, (ii) l'efficacité, l'efficience et la résilience des systèmes agricoles dans un contexte de changement global
- FS2. Caractériser et modéliser le fonctionnement intégré des agroécosystèmes en prenant en compte les interactions spatiales de nature écologique, sociale ou économique
- FS3. Développer ou consolider les méthodes d'évaluation multicritère de systèmes agricoles, dans leur capacité à intégrer les performances productives, environnementales, sanitaires, sociales et économiques, les services et nuisances, à différentes échelles, combinant des données qualitatives et quantitatives
- FS4. Développer les méthodes d'invention et de conception de systèmes agricoles, qu'elles soient expérimentales, mathématiques, participatives, combinant des connaissances de nature diverse
- FS5. Développer des systèmes de pilotage multicritère de systèmes agricoles dans l'incertain

Quatre fronts de science

- FS1. Évaluer l'état et l'évolution des ressources
- FS2. Comprendre et prédire l'évolution des ressources en fonction des changements climatiques et anthropiques
- FS3. Étudier et modéliser les interactions et rétroactions biophysiques à l'échelle des paysages cultivés
- FS4. Étudier et concevoir des processus biologiques et physico-chimiques pour la protection et la remédiation des sols et des eaux

EnjS4 : Bouclage des cycles N-P et stockage du carbone dans les sols**Cinq objectifs opérationnels**

001. Quantifier et cartographier les stocks et les flux CNPS dans les agroécosystèmes et produire des modèles simulant leurs évolutions à différentes échelles spatio-temporelles, de la parcelle à la planète
002. Proposer des techniques et scénarios de réduction des intrants, favorisant le recyclage et réduisant les impacts, adaptés à différents objectifs de production
003. Identifier des leviers d'atténuation du changement climatique et quantifier le potentiel d'atténuation associé
004. Co-construire et évaluer des scénarios de gestion des cycles CNPS à l'échelle de systèmes alimentaires et de territoires
005. Contribuer à la production de références et d'outils d'aide à la décision pour la gestion des nutriments et des matières organiques, à différentes échelles

Six fronts de science

- FS1. Tester les modèles CNPS actuels dans le contexte de nouvelles pratiques agricoles; en construire de nouveaux si nécessaire
- FS2. Décrire, analyser et modéliser les interactions entre cycles aux échelles spatio-temporelles pertinentes
- FS3. Connaître les processus relatifs à des étapes clés des cycles : Biodégradation et stabilisation des composés organiques, Acquisition des nutriments, Fixation symbiotique, Emissions
- FS4. Connaître le rôle des communautés telluriques et

- des interactions plante-sol sur les cycles CNPS et leurs couplages
- FS5. Développer des méthodes spatialisées pour la conception et l'évaluation multicritère de scénarios territorialisés de gestion des cycles CNPS
- FS6. Intégrer les connaissances sur les cycles CNPS pour la production d'OAD et l'appui à la décision publique

Les cinq enjeux structurants (EnjS) du schéma stratégique 2016-2020 du département EA, les objectifs opérationnels et fronts de science identifiés.

qui a marqué ces dernières années, à la fois en son sein et au travers de collaborations avec la quasi-totalité des départements de l'Inra, et avec une diversité de partenaires académiques. Témoin visible de cette évolution, l'animation scientifique, qui se structurait initialement en champs thématiques plutôt monodisciplinaires, s'organise désormais autour d'enjeux structurants qui, par construction, incitent à l'interdisciplinarité pour aborder les différents fronts de science identifiés. Un autre témoin du développement de l'interdisciplinarité est illustré par la structuration interne des unités du département EA. Sur les 42 unités expérimentales, de recherche ou de service qui forment le département en 2018, 55 % ont la tutelle d'au moins deux départements. Il faut souligner que l'organisation globale de la recherche en France a connu une évolution majeure au moment de la création du département EA : la création du statut des UMR dans le paysage français de la recherche et de l'enseignement supérieur est en effet contemporaine de celle du département, et ce dernier en aura fait progressivement un moyen très efficace pour élargir le champ de ses compétences et de ses domaines d'intervention, avec 77 % d'UMR parmi ses 30 unités de recherche.

► Environnement, changements globaux et changements d'échelles : les défis du climat et de la gestion sobre des ressources

L'ère de l'Anthropocène

Comme le souligne cet ouvrage, la prise en compte de problématiques environnementales majeures a motivé la création du département EA. Mais force est de constater que les deux décennies qui nous en séparent ont aussi été marquées par une prise de conscience par la communauté scientifique mondiale de l'impact des activités humaines à des échelles supérieures (nationales, continentales, voire mondiales) à celles qui étaient précédemment abordées : les échelles plutôt locales ou régionales, de la parcelle au bassin versant, sur lesquelles se focalisent encore aujourd'hui une grande part des recherches au sein du département EA. Le concept d'Anthropocène dont s'est emparée partiellement la communauté scientifique du département EA illustre cette prise de conscience des impacts des activités humaines à l'échelle planétaire, en particulier face au constat de la grande accélération qui s'est opérée, en lien avec la croissance démographique de la population mondiale depuis le milieu du xx^e siècle.

Dans le domaine agricole, la seconde moitié du xx^e siècle a coïncidé avec la révolution verte et l'intensification des systèmes agricoles au travers d'une augmentation très soutenue du recours aux intrants, tant engrais et pesticides de synthèse qu'eau d'irrigation et énergie fossile²²⁸. Ces impacts globaux sont particulièrement pris en considération par la communauté scientifique mondiale en ce qui concerne le changement climatique, par les voies de l'adaptation et de l'atténuation. Comme le révèlent plusieurs chapitres de cet ouvrage, le département EA s'est positionné très tôt sur cette problématique, où est reconnue actuellement toute la place qu'occupent les agroécosystèmes et leur gestion durable. Cependant, ainsi que le

228. Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-677.

souligne le concept de *safe operating space* de Rockström *et al.* (2009)²²⁹, nous avons dépassé les limites de l'acceptable (les *planetary boundaries*) pour deux autres phénomènes planétaires majeurs : l'érosion de la biodiversité et la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore²³⁰. Pour ces deux nutriments essentiels pour la production agricole, il est désormais reconnu que l'agriculture intensive, au travers de l'intensification des agroécosystèmes et de la spécialisation des systèmes agricoles, avec une déconnexion grandissante entre agriculture et élevage, est la première responsable de la modification profonde de leurs cycles depuis le milieu du xx^e siècle, avec de multiples impacts environnementaux, tant locaux que globaux. Le département EA rassemble de nombreuses compétences concernant le cycle de l'azote et, dans une moindre mesure, le cycle du phosphore ; cependant, elles ont été peu mobilisées sur ces enjeux planétaires à ce jour, et plus généralement à des échelles qui dépassent celles des petits bassins versants agricoles, comme l'indiquent les fronts de science identifiés dans le schéma stratégique 2016-2020. Le département EA dispose des ressources qui lui permettraient de mieux faire le lien entre les impacts de l'agriculture au niveau global et les pratiques mises en œuvre au niveau local, ainsi que leurs possibles évolutions. Cela nécessite en effet des approches pluridisciplinaires qu'il est parfaitement en capacité de conduire, en interaction avec les départements Phase et SAD de l'Inra, pour ce qui concerne le lien agriculture-élevage et la nécessité de repenser la spécialisation des espaces agricoles.

Les limites planétaires et l'agriculture intensive

L'étude des impacts environnementaux des activités agricoles a motivé de nombreuses équipes de recherche du département EA, en particulier en ce qui concerne l'azote. En revanche, la question de la gestion sobre des ressources a également des fondements économiques et sociétaux qui ont été très peu pris en compte à ce jour, malgré leur importance indéniable : il en va ainsi de la grandissante volatilité des prix des engrais azotés et phosphatés et du caractère fini à moyen terme des ressources en phosphates naturels²³¹. En outre, Steffen *et al.* (2015), dans leur révision des *planetary boundaries*, ont souligné les incertitudes qui pesaient sur leur détermination à l'échelle globale, mais aussi l'intérêt de prendre en compte la variabilité spatiale des phénomènes considérés. Ainsi, l'augmentation des flux d'azote et de phosphore vers les écosystèmes aquatiques et ses conséquences sur l'eutrophisation de ces derniers est particulièrement marquée dans les pays ou régions du monde dominés par des pratiques d'agriculture intensive, comme une partie de l'Amérique du Nord, l'Europe occidentale et la Chine²³². Les travaux d'agronomie globale qui se sont développés dans le département EA au cours de la dernière décennie ont bien montré un monde à deux vitesses, avec une surconsommation d'intrants fertilisants dans les régions d'agriculture intensive

229. Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin E.S., Lambin E.F. *et al.*, 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475.

230. Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M. *et al.*, 2015. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 347, 6223.

231. Cordell D., Drangert J.-O., White S., 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environ. Change*, 19, 292-305.

232. Lun F., Liu J., Ciais P., Nesme T., Chang J., Wang R. *et al.*, 2018. Global and regional phosphorus budgets in agricultural systems and their implications for phosphorus-use efficiency. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1-18.

et une sous-consommation dans une large part des pays en développement, notamment en Afrique subsaharienne, où les agriculteurs n'ont pas ou peu accès aux engrais minéraux²³³. De telles approches et problématiques constituent une interface à enrichir avec le département SAE2 de l'Inra, et avec des partenaires académiques d'autres institutions, en France et dans le monde. Outre les intrants azotés et phosphatés, l'utilisation des pesticides questionne encore plus la durabilité des pratiques qui dominent en agriculture intensive, compte tenu de ses impacts sur l'environnement, notamment de son rôle dans l'érosion accélérée de la biodiversité, mais aussi de ses effets sur la santé des écosystèmes et des hommes, les agriculteurs étant les premiers exposés.

Les Objectifs de développement durable et la gestion sobre des ressources

Dans les évolutions futures du département EA, un positionnement plus affirmé sur les grands enjeux globaux actuels est donc attendu, d'autant que la question de la gestion sobre des ressources est clairement positionnée dans les priorités de la recherche nationale et européenne, aux côtés des questions de sécurité alimentaire. Certes, ces problématiques ne sont pas nouvelles. Au moment de la création du département EA, le premier des huit Objectifs de développement du millénaire de l'ONU soulignait l'enjeu d'éradiquer l'extrême pauvreté et la faim dans le monde, mais cette problématique était alors considérée comme étant en dehors du champ d'intervention de l'Inra, centré sur l'agriculture française et européenne. Le département était en revanche bien positionné par rapport au septième de ces objectifs, celui d'assurer la durabilité environnementale. Aujourd'hui, l'Inra revendique explicitement son positionnement sur un grand nombre des dix-sept Objectifs de développement durable de l'ONU, et tout particulièrement celui visant la sécurité alimentaire pour tous. Le département EA a donc légitimement suivi cette évolution et développé des recherches qui s'inscrivent désormais dans cet enjeu global, l'amenant encore une fois à sortir des échelles, mais aussi des territoires auxquels il se cantonnait antérieurement, ainsi que, par voie de conséquence, des approches et des méthodes mobilisées auparavant. Poursuivre cette évolution fait sens aujourd'hui et va conduire à explorer de nouveaux fronts de sciences et partenariats.

► Agriculture et biodiversité, changement de paradigme : le temps de l'agroécologie

L'appropriation des enjeux autour des services écosystémiques

Les deux dernières décennies ont été marquées par la nécessité de changer de paradigme en agriculture²³⁴ pour parvenir à la sécurité alimentaire mondiale tout en réduisant les impacts négatifs environnementaux liés à l'intensification agricole. Cette alternative que constitue l'intensification écologique des systèmes agricoles, un concept contemporain de la création du département EA, est devenue

233. MacDonald G.K., Bennett E.M., Potter P.A., Ramankutty N., 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 3086-3091.

234. Griffon M., 2006. *Nourrir la planète*, Paris, Éditions Odile Jacob.

progressivement un enjeu majeur de recherche pour le département, de façon explicite à la fin des années 2000. Compte tenu de ses diverses acceptions, ce terme a fait l'objet de débats dans la communauté scientifique. Le département EA l'a utilisé ainsi : la volonté de placer les régulations biologiques au cœur du fonctionnement des agroécosystèmes, et d'intensifier le recours à ces processus écologiques. C'est au cours de cette première décennie du XXI^e siècle que le MEA²³⁵ a développé le concept de services écosystémiques et proposé des scénarios de développement pour préserver, voire développer, ces derniers dans leur diversité, en tenant compte de leurs interdépendances. Ainsi que le retracent plusieurs chapitres de cet ouvrage, le département EA s'est approprié progressivement ce concept de services écosystémiques qu'il a contribué à faire évoluer en l'appliquant aux agroécosystèmes dans leur diversité, et plus particulièrement dans le cadre de la transition agroécologique des systèmes agricoles. Ainsi, nombre de recherches conduites aujourd'hui au sein du département s'appuient sur la mobilisation de connaissances issues de l'écologie et du fonctionnement d'écosystèmes peu anthropisés²³⁶ pour promouvoir des formes d'agriculture qui s'appuient davantage sur la biodiversité, les fonctions écologiques et les services écosystémiques associés²³⁷.

L'émergence de l'agroécologie

Le développement de l'écologie et plus récemment de l'agroécologie au sein du département EA a pu être accéléré par des stratégies d'alliance avec d'autres institutions telles que le CNRS, les universités, l'IRD et le Cirad. Rassembler agronomes et écologues a été, et reste encore, un défi de tous les jours, un enjeu pour progresser dans le développement de l'agroécologie, au sein de l'Inra comme du département EA. La fertilisation croisée entre les approches et concepts de l'agronomie systémique et de l'écologie est en effet la garante du progrès à accomplir. Le département EA est, à ce titre, très bien placé pour y parvenir, mais aura sans doute à renforcer ses approches systémiques et ses compétences disciplinaires en agronomie pour mieux appréhender la diversité et la complexité des pratiques et des acteurs du monde agricole de demain. Malgré de nombreuses divergences de posture entre agronomie et écologie, notamment en matière de théorisation et de prise en compte de l'homme dans le fonctionnement des (agro)écosystèmes qu'elles étudient, ces deux sciences partagent l'ambition d'identifier des lois générales de fonctionnement des écosystèmes auxquels elles s'intéressent. Cette ambition louable a pourtant des limites qui tendent malheureusement parfois à être oubliées. Ainsi, la recherche de la généricité, qui a été largement soutenue par le département EA au cours des deux décennies passées, ne doit pas faire l'économie de l'étude de la diversité et de la spécificité des processus selon les contextes où ils sont étudiés.

Ainsi, il est indéniable que des avancées majeures ont été réalisées dans le champ des connaissances de l'écophysiologie végétale en faisant le choix de concentrer

235. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*, Island Press, London.

236. Malézieux E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.*, 32, 15-29.

237. Duru M., Therond O., Martin G., Martin-Clouaire, R., Magne M.A., Justes E. *et al.*, 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Development*, 35, 1259-1281.

l'effort de recherche sur un nombre limité d'espèces dites « modèles », choix justifié pour partie par le lien renforcé à la génétique. Cependant, il est désormais nécessaire de compléter ces connaissances par des travaux d'écophysiologie comparée, en évaluant de plus larges gammes d'espèces, notamment des espèces considérées comme mineures. C'est un défi important pour le futur au sein du département EA, compte tenu des enjeux de la diversification en agriculture²³⁸. L'agronomie et l'écologie ont également longtemps partagé une vision plutôt négative des interactions entre espèces au sein des écosystèmes qu'elles étudiaient, les considérant principalement sous l'angle des relations de compétition pour les ressources. Ce n'est qu'assez récemment, dans ces deux disciplines, que la prise en compte d'interactions positives de type facilitation a commencé à prendre de l'ampleur et, en ce qui concerne les agroécosystèmes, particulièrement dans le champ de l'agroécologie autour des peuplements complexes plurispécifiques ou pluri-variétaux²³⁹. Ces derniers constituent un des leviers majeurs pour mobiliser la biodiversité dans le cadre de la transition agroécologique des systèmes agricoles.

La nécessité d'une ouverture à de nouvelles démarches

La diversité des pratiques mises en jeu dans le cadre de la transition agroécologique ainsi que la complexité des processus écologiques qu'elle mobilise imposent au département EA l'élargissement à de nouvelles démarches par rapport à celles qu'il a développées avec succès depuis sa création, et qui méritent bien entendu d'être poursuivies. Il apparaît ainsi désormais nécessaire d'appréhender le fonctionnement des agroécosystèmes jusqu'à des échelles supraparcellaires (paysage) en y intégrant l'ensemble des composantes du socio-écosystème (acteurs, dans leur diversité), en interaction avec le département SAD. Cela impose au département EA, comme il a commencé à s'y engager, de repenser profondément ses dispositifs d'expérimentation et d'observation et, avec les autres départements de l'Inra, l'organisation et les modalités de fonctionnement de ses unités expérimentales, d'une part en étudiant des systèmes en rupture fondés sur une organisation paysagère avec des infrastructures agroécologiques ou des systèmes agroforestiers ou agrosylvopastoraux, et d'autre part en raisonnant ces choix avec des acteurs du monde agricole. En effet, le renouvellement des modalités pour conduire la recherche dépasse le seul cadre des institutions de recherche. Il est désormais reconnu que les connaissances ne sont pas le seul apanage des scientifiques, et que pour progresser en agroécologie, il est absolument nécessaire de mobiliser l'ensemble des connaissances disponibles, y compris les connaissances expertes qui abondent chez les divers acteurs du monde agricole. Il y a ainsi, sans aucun doute, beaucoup à apprendre des connaissances développées par les agriculteurs les plus innovants dans nos territoires, ainsi que des agriculteurs des pays du Sud, restés à l'écart de l'intensification pour des raisons économiques (trésorerie insuffisante pour l'achat d'engrais notamment), et mobilisant de fait de nombreux processus écologiques complexes au sein de leurs agroécosystèmes à très faibles niveaux

238. Guillou M., 2013. *Vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement*, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (Ed.), 163 p.

239. Gaba S., Lescourret F., Boudsocq S., Enjalbert J., Hinsinger P., Journet E.-P. *et al.*, 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, 607-623.

d'intrants chimiques. Exit le *Mémento de l'agronome* et l'idée que la diffusion des connaissances se fait en sens unique !

Par ailleurs, de nombreux travaux visant la promotion d'innovations agronomiques ou agroécologiques ont révélé des freins à leur adoption, qui peuvent être en partie levés dès lors que les acteurs du monde agricole, et en premier lieu les agriculteurs eux-mêmes, sont associés dès les premières étapes de la conception de ces innovations, c'est-à-dire dans le processus de la recherche. Ce constat motive le développement de démarches de coconception, et plus généralement de recherches participatives, en rupture avec les pratiques dominantes dans le département EA depuis sa création. Au-delà des agriculteurs, il est important d'impliquer dans cette démarche participative l'ensemble des acteurs potentiellement concernés puisque, généralement, les freins à l'adoption d'innovations se situent à d'autres niveaux des filières ou territoires concernés, résultant en des situations de verrouillage (*lock-in*) rendant extrêmement difficile le changement dans les pratiques²⁴⁰. Dans le futur, il apparaît donc essentiel pour le département EA de développer de telles approches multi-acteurs qu'il a déjà initiées avec succès, à la fois au niveau du territoire régional ou national et au niveau européen. Une évolution majeure récente de la politique européenne de soutien à la recherche, depuis 2016 avec le programme-cadre Horizon 2020, et qui va se poursuivre, voire s'amplifier dans un futur proche avec Horizon Europe (2021-2027), est la promotion d'approches multi-acteurs. Le développement récent en France des Laboratoires d'innovation territoriaux (LIT) ou la mise en place prochaine des Territoires d'innovation de grande ambition (TIGA) prônent cette même démarche, en y associant bien souvent l'ensemble des acteurs des territoires, y compris les consommateurs. Ces nouveaux partenariats, qu'il appartient désormais au département EA de développer, vont l'amener à enrichir ses manières de conduire la recherche et de produire de l'innovation. Il s'agit ainsi, en outre, de renforcer les approches fondées sur les sciences participatives.

► Alimentation et santé, le concept One Health : un monde en transition(s)

De la sécurité alimentaire à la sécurité nutritionnelle et à la santé humaine

S'il est un domaine dans lequel les consommateurs se sentent concernés au premier chef, c'est, outre l'environnement, celui de l'alimentation et de leur santé, tandis que le grand public ne se sent pas aussi directement concerné par l'agriculture, sans doute par méconnaissance du monde agricole et des multiples services rendus par les agroécosystèmes. C'est un domaine jusqu'à présent assez peu couvert par le département EA, excepté dans quelques équipes d'écophysiologistes et de biogéochimistes/écotoxicologues qui ont conduit de longue date des recherches sur les liens entre techniques culturales, variétés cultivées et qualité sanitaire et nutritionnelle des produits récoltés. À l'avenir, les travaux sur ces questions à l'interface

240. Magrini M.-B., Anton M., Cholez C., Corre-Hellou G., Duc G., Jeuffroy M.-H. *et al.*, 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecological Economics*, 126, 152-162.

avec d'autres départements de l'Inra, tels qu'AlimH et Cepia, mériteraient d'être amplifiés, compte tenu de l'enjeu global que constitue la sécurité alimentaire, et plus encore la sécurité nutritionnelle. Face à la démographie mondiale grandissante de ce début de XXI^e siècle, il ne s'agit pas uniquement de produire plus pour nourrir la planète, il s'agit clairement de produire mieux, et de produire une alimentation plus saine tenant compte des évolutions des régimes alimentaires. Encore un changement de paradigme pour la recherche agronomique, dont le département EA s'est assez peu saisi à ce jour, et l'Inra dans sa globalité, jusqu'à récemment. Il en va ainsi par exemple de la teneur en micronutriments des céréales, une problématique majeure sur le plan nutritionnel pour l'humanité, puisque près de la moitié de la population mondiale est carencée en zinc ou en fer, et pas uniquement dans les pays du Sud. Depuis la création du département EA, aucune équipe ne s'est positionnée sur cette problématique, alors qu'il existe des voies qui mériteraient d'être explorées, depuis la sélection variétale²⁴¹ jusqu'aux diverses pratiques concourant à la biofortification des produits agricoles, en mobilisant des compétences qui existent en son sein.

Un autre enjeu majeur est en lien avec l'évolution des régimes alimentaires, avec une tendance à la décarnation dans de nombreux pays industrialisés, alors que c'est plutôt l'inverse dans les pays émergents. Le département EA s'est saisi de ces questions, en mobilisant en son sein les compétences agronomiques et écophysiologiques sur les légumineuses, qui constituent une véritable alternative à l'alimentation carnée qui domine dans les pays comme le nôtre. Accorder à ces dernières une plus grande place dans l'agriculture française et européenne est donc nécessaire, d'autant qu'elles présentent des avantages associés en ce qui concerne la substitution d'azote issu de fertilisants de synthèse par l'azote issu de la fixation symbiotique. Cet enjeu d'une utilisation accrue des légumineuses dans le cadre de la transition agroécologique pose de multiples questions d'organisation dans les territoires et les filières. Elle va de pair avec la transition alimentaire et l'implication de nombreux acteurs, dont les consommateurs. Pour progresser sur ces enjeux majeurs, il paraît judicieux d'encourager des démarches nouvelles, s'appuyant sur des innovations couplées entre agriculture et alimentation²⁴² en interaction avec de multiples départements de l'Inra (AlimH, BAP, Cepia, Phase, SAD et SAE2).

De la santé des écosystèmes à la santé humaine : One Health

Un enjeu majeur au carrefour des trois domaines de recherche de l'Inra, agriculture, environnement et alimentation, concerne la réduction des pesticides de synthèse, en vue de préserver ou de restaurer la biodiversité et de réduire les impacts sur l'environnement et la santé humaine. C'est l'ambition pour une agriculture sans pesticide (*Towards chemical pesticide-free agriculture*) défendue par l'Inra et ses partenaires allemands comme une des priorités majeures pour le programme Horizon Europe (2021-2027). La prise de conscience de cet enjeu n'est pas nouvelle en France, puisqu'elle avait déjà été à l'origine de la mise en place du plan national Écophyto voici une dizaine d'années, qui s'était fixé comme objectif de diviser par deux l'usage des pesticides à l'horizon 2018. L'échec relatif de ce plan,

241. Morris C.E., Sands D.C., 2006. The breeder's dilemma: yield or nutrition? *Nature Biotech.*, 24, 1078-1080.

242. Meynard J.M., Jeuffroy M.H., Le Bail M., Lefèvre A., Magrini M.B., Michon C., 2017. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems? *Agricultural Systems*, 157, 330-339.

puisque la consommation de pesticides a même plutôt augmenté au cours des dernières années, a conduit à repousser cette échéance à 2025. Pour autant, les analyses de données réalisées par des scientifiques du département EA sur un réseau d'environ 1 000 exploitations agricoles, rassemblées dans le système d'information Agrosyst élaboré dans le cadre du plan Écophyto 2018, ont montré qu'il était possible de réduire significativement l'usage de pesticides sans impacter la productivité agricole ou la rentabilité économique²⁴³.

Pour atteindre cet objectif encore plus ambitieux d'une agriculture sans pesticides de synthèse, il existe de nombreux leviers qui s'inscrivent pleinement dans le champ de l'agroécologie, en s'appuyant sur une meilleure utilisation des interactions plantes-bioagresseurs et des régulations biologiques, et en mobilisant davantage la biodiversité gérée, à des échelles qui vont de la parcelle au paysage. Cependant, concevoir des systèmes qui s'appuient de manière efficace sur les régulations biologiques pour le contrôle des bioagresseurs reste encore une gageure. En effet, s'il y a un certain consensus de la littérature scientifique qu'en moyenne une plus grande diversité des couverts végétaux au sein de la parcelle ou dans les paysages augmente la diversité des auxiliaires des cultures (ex. : arthropodes, oiseaux, chauve-souris), de nombreux travaux montrent également que cela ne se traduit pas toujours immédiatement par un meilleur contrôle des ravageurs²⁴⁴. Une explication est que bioagresseurs, auxiliaires et régulations biologiques répondent non pas au seul ajout de biodiversité, mais à différentes pratiques culturales et à leur distribution spatiale et temporelle dans le paysage. Une meilleure caractérisation de « l'hétérogénéité cachée » des paysages *via* des enquêtes, mais également des méthodes de proxy ou télédétection peut être une solution. Cependant, cette réponse comprend aussi une dynamique temporelle due à la nécessité de rétablir la biodiversité des auxiliaires ; pour cela, l'approche synchronique (remplacer le temps par l'espace) dans les systèmes actuels, très marqués par l'usage des pesticides, n'est pas entièrement satisfaisante. Il s'agit donc d'envisager une conception dynamique et spatialisée des systèmes de culture et des paysages qui appelle à renforcer les collaborations avec les départements SPE, SAD et MIA ainsi qu'avec des agriculteurs, dispositifs d'observation de longue durée ou sites expérimentaux engagés dans des démarches de transition agroécologique ou en agriculture biologique.

Les enjeux de santé des écosystèmes et de santé humaine ne s'arrêtent pas à la problématique des pesticides, et le département EA doit poursuivre son investissement sur les éléments traces, parmi lesquels le cadmium est particulièrement préoccupant du fait de la révision à la baisse des normes fixées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dans les aliments et de l'origine largement agricole de leur contamination. La question des nombreux contaminants émergents que sont les produits pharmaceutiques et vétérinaires, d'une part, et les nanoparticules, d'autre part, est une autre source de préoccupation majeure à venir. Sur l'ensemble de ces questions, il y a beaucoup à gagner à décloisonner les disciplines en rapprochant les domaines de la santé des sols, des plantes, des animaux, des hommes

243. Lechener M., Dessaint F., Py G., Makowski D., Munier-Jolain N., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants*, 3, 17008.

244. Karp D.S. *et al.*, 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 115, E7863-E7870.

et des écosystèmes, voire de la santé de la planète²⁴⁵, et en s'appropriant le concept de One Health, voire en le revisitant, ainsi que le propose Michel Duru²⁴⁶. Pour ce faire, le département EA dispose de compétences mobilisables en interne, mais il doit aussi développer de nouvelles interfaces avec d'autres départements de l'Inra et d'autres partenaires.

Un monde en transitions multiples

Les défis relevés depuis deux décennies d'existence du département EA sont remarquables, mais ceux qui nous attendent ne sont pas moindres. Il en va ainsi des enjeux de recherche associés, outre à la transition agroécologique, à la transition énergétique et à la transition numérique, dans le cadre des changements globaux. En ce qui concerne le changement climatique, le département EA s'est lourdement investi, notamment dans l'évaluation des impacts et de l'atténuation, les équipes du département restant aujourd'hui très mobilisées autour de la question du stockage du carbone dans les sols (initiative 4 pour 1 000). Sur ce point, les travaux en cours sur le lien entre les pratiques dans les agroécosystèmes et l'usage des terres sont à souligner, et le développement de fronts de science, comme la prise en compte des contraintes stœchiométriques et du fonctionnement biologique du sol dans les horizons profonds, est identifié.

Un domaine qui mérite d'être encore développé est l'adaptation des cultures au changement climatique. Un gros effort a déjà été accompli pour ce qui concerne le stress hydrique et la valorisation de la diversité génétique au sein de quelques espèces cultivées majeures, en lien avec les généticiens du département BAP notamment. Le département EA a soutenu des plateformes de phénotypage adaptées pour caractériser les candidats au champ et en conditions contrôlées. Il s'est doté d'outils uniques pour appréhender les traits racinaires et symbiotiques, pour lesquels les défis méthodologiques sont des freins à leur prise en compte, malgré leur pertinence reconnue. Il s'agit d'une part de renforcer les travaux intégrant la combinaison de stress (ex. : hydrique et thermique) et l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique, d'autre part de ne pas s'arrêter à la dimension génétique de l'adaptation au changement climatique. La prise en compte des choix techniques des agriculteurs (ex. : dates de semis) et des opportunités offertes par les innovations technologiques et agroécologiques sont des voies à ne pas négliger : les effets microclimatiques des arbres dans les systèmes agroforestiers pourraient ainsi augmenter la résilience de la culture face au changement climatique, en limitant les risques d'échaudage pour les céréales, par exemple. De telles recherches s'inscrivent parfaitement dans une ambition défendue par l'Inra comme une des trois priorités dans le champ de la bioéconomie circulaire au niveau européen (Horizon Europe 2021-2027), ambition pour des systèmes agroalimentaires neutres sur le plan du carbone et résilients face au changement climatique (*Towards carbon-neutral and climate-resilient agri-food systems*). Malgré l'accent mis en apparence sur le carbone, cette ambition pose la question de la gestion sobre de l'ensemble des ressources, particulièrement de l'eau, aux différentes échelles, et de

245. Vieweger A., Döring T.F., 2014. Assessing health in agriculture. Towards a common research framework for soils, plants, animals, humans and ecosystems. *J. Sci. Food Agric.*, 95, 438-446.

246. Duru M., 2018. Agriculture, environnement et alimentation, la santé comme dénominateur commun. Société française d'écologie et d'évolution, <https://www.sfecologie.org/regard/ro6-sept-2018-m-duru-agriculture-et-sante/>.

nombreuses questions liées au devenir du carbone au-delà de l'échelle de la parcelle cultivée (économie circulaire), dans les systèmes agroalimentaires.

À côté du changement climatique, les enjeux liés au changement d'usage des terres sont tout autant importants et largement interconnectés, et les conflits entre ces usages (productions alimentaires, végétales ou animales *vs* productions énergétiques) méritent d'être davantage étudiés. Cela va nécessiter des interactions renforcées avec d'autres départements comme EFPA, SAD, SAE2 et Phase notamment, ainsi que de nouveaux interlocuteurs tels que les grands opérateurs de la transition énergétique. Pour relever ces nouveaux défis à l'interface « agriculture, alimentation et environnement », il convient d'adopter des postures plus intégratives, plaçant la « santé » comme dénominateur commun, et appelant à une interdisciplinarité renforcée. Il s'agira par ailleurs de renforcer les dispositifs de recherche « chez les acteurs », et avec ces acteurs, dans leur multiplicité. En outre, la perspective proche de la création du futur établissement rassemblant Inra et Irstea offre de nouvelles opportunités au département EA pour appréhender ces questions complexes, et de nouvelles interfaces, telles que les futurs départements et métaprogrammes.

► Et maintenant ?

Pour faire face aux multiples enjeux mentionnés plus haut, le département EA doit poursuivre l'évolution qu'il a connue depuis sa création il y a vingt ans, mais aussi le renouvellement de ses concepts, de ses démarches et de ses réseaux de collaboration. Il s'appuiera pour cela sur des collectifs solides et engagés qui rassemblent des compétences scientifiques et techniques très variées, que beaucoup de partenaires académiques nationaux ou internationaux lui envient. Il dispose également de ressources uniques, notamment de dispositifs expérimentaux et d'observatoires à long terme, de plateformes d'analyse et de modélisation et, plus généralement, d'infrastructures de recherche pérennes qui sont autant d'atouts pour l'avenir. La valorisation accrue de l'ensemble des données produites, dans le cadre d'une politique de science ouverte (*open science*) légitimement prônée par l'Inra, constitue un défi. Il en va ainsi, plus généralement, de la poursuite du développement d'une culture de l'ouverture du département EA : ouverture à d'autres territoires, à d'autres approches, à d'autres disciplines, à d'autres acteurs de ce monde.

Postface

L'histoire du département Environnement et Agronomie (EA) de l'Inra ne peut se lire et se comprendre sans avoir en arrière-pensée le concept de santé planétaire, qui intègre à la fois la santé de la civilisation humaine et l'état de l'environnement duquel elle dépend. Nombreux sont ceux, individus ou courants de pensée, chercheurs ou instituts de recherche, qui depuis longtemps ont posé les jalons de cette vision intégrative. Si aujourd'hui la reconnaissance de la notion de santé planétaire semble aller de soi, son émergence fut longue et tout n'est pas encore gagné. Pourquoi ? Essentiellement parce qu'elle est globalisante, qu'elle met face à face perception objective et subjective, qu'elle oppose acte individuel et mouvement collectif, bien commun et développement économique. Elle demande une vision, une vision qui intègre la planète comme un tout. Elle doit concilier l'inconciliable : l'égoïsme géopolitique, économique et social du court terme avec l'envie et les sacrifices d'un long terme harmonieux. L'heure est donc au compromis et à la sagesse, du moins les appelle-t-on tous de nos vœux. Plus qu'un compromis, ce sont des compromis qu'il faut trouver : compromis entre les acteurs, du citoyen au gouvernement, sur les échelles de temps des mesures à prendre, sur le développement des hommes et des femmes les plus démunis par rapport à ceux et celles qui profitent amplement d'une économie florissante. Les sciences et les technologies ont toute leur place dans la recherche de ces compromis.

L'équation des compromis de la santé planétaire n'a toujours pas de solution évidente. Comment faire vivre dignement 9 milliards d'humains avec un capital de ressources souvent épuisables ? Comment procurer nourriture, santé, énergie et bien-être en respectant les différences de perceptions sociales de chacun et de tous et en préservant des futurs possibles ? S'il y a un vrai problème interdisciplinaire, multidisciplinaire, intégrateur et transverse, c'est bien celui-là.

La gouvernance du monde sous-estime de manière permanente que c'est une gestion irresponsable des ressources planétaires qui a permis notre développement économique et social. Beaucoup le savent, et les dix-sept Objectifs de développement durable établis en 2015 par les Nations unies dans l'Agenda 2030 en sont aujourd'hui devenus la bouée de sauvetage. Treize d'entre eux utilisent les ressources comme une mesure du développement social, économique, politique, culturel et environnemental.

La science et la technologie doivent forger les outils multiples de cette santé planétaire. Il ne faut pas hésiter à les mettre au centre du débat et à défendre une science centrée sur les ressources. Nous devons tisser une alliance entre les sciences naturelles, les sciences politiques et le droit pour éviter une surexploitation des ressources et imposer une comptabilité de celles-ci. Cela passe bien sûr par l'éducation et la recherche, mais aussi par le développement d'outils prévisionnels avec des échelles spatiales et temporelles variables, à l'image de la météorologie ou des modèles climatiques.

L'Inra et son département EA ont vécu une partie de cette histoire. Ils ont, comme beaucoup, cherché leurs marques entre recherche agronomique et recherche sur l'environnement, entre tout biologique et multidisciplinarité. Ils sont aujourd'hui un acteur essentiel de cette science centrée sur les ressources.

Je me souviens des années 1990-2000, l'époque de la création du département EA. Les premiers à se structurer pour aborder les grandes questions environnementales furent les météorologues et les climatologues, suivis par les océanologues. Ils avaient compris le bien-fondé d'une science globalisante, capable d'aborder les échelles de temps et d'espace multiples, caractéristiques de la complexité du système Terre. Ils avaient aussi intégré la notion d'observations au long terme et compris avant l'heure comment sensibiliser les politiciens non écologistes. Tous les ingrédients qui manquaient aux scientifiques des surfaces continentales. Conscients de ces lacunes, ils ont commencé à se mobiliser. Au début ils se cherchaient tous, chacun y allait de son initiative, c'était un peu désordonné mais l'envie était là, car le changement climatique nous empêchait de prendre conscience d'une mauvaise utilisation généralisée de nos ressources. À l'époque, au CNRS, nous cherchions aussi à fédérer les enthousiasmes. La recherche dans ces domaines méritait bien plus que des programmes comme le Programme interdisciplinaire de recherche en environnement (Piren). Nous voulions emmener tous les chercheurs en environnement sous une seule et même bannière, celle de l'Institut des sciences de l'univers, l'INSU, que nous voulions rebaptiser INSU-E pour y ajouter la dimension environnement. Cela ne s'est pas fait... et ce n'est pas grave. Les sciences de l'environnement appartiennent à toutes les disciplines et ne sont pas la propriété d'un organisme ou d'un autre. Mais nous avons néanmoins fait un pas significatif : nous avons créé, avec l'aide d'André Mariotti, la division SIC (Surfaces et interfaces continentales) au sein de l'INSU. Nous l'avons voulue très proche des autres organismes de recherche comme l'Inra et son jeune département EA. Cette proximité était nécessaire pour mettre en place les fameux Observatoires de recherche en environnement (ORE). Je me souviens de toutes ces discussions, souvent animées, toujours enthousiasmantes et finalement constructives. Aujourd'hui, ils sont bel et bien là et très utiles pour répondre aux questions qui nous sont posées et que je mentionnais dans les lignes précédentes.

Le département EA a depuis évolué. Il fait de la science de qualité dans le champ de l'environnement au sein de l'Inra, qui a une énorme responsabilité dans le futur des politiques publiques en matière d'environnement en France, en Europe et au-delà. On peut toujours faire mieux et être toujours plus ambitieux. La santé, pour ne prendre qu'elle en exemple, fait une révolution en ce moment en se lançant dans la médecine personnalisée. Elle vise la santé globale en focalisant sur la santé individuelle. Une piste à suivre ?

Agriculture et environnement ne font pas toujours bon ménage car la première, si elle est mal gérée, modifie durablement le second. C'est justement pour cela que l'Inra est important. Il a la légitimité scientifique, au même titre que l'Inserm pour la santé, pour donner son point de vue et être l'interlocuteur direct de l'État pour les politiques publiques. Je ne citerai ici que le développement des légumineuses dans les rotations et dans les cultures associées pour réduire l'utilisation d'engrais azotés de synthèse et les émissions de protoxyde d'azote qui leur sont associées, ou encore l'impact catastrophique du chlordécone sur les sols, et finalement le rapport Agrimonde-Terra, qui pose les jalons d'une vision mondiale et légitime de l'agriculture et de la nutrition.

Le département EA est particulier au sein de l'Inra, et c'est sa force. Il intègre en son sein une variété de talents d'horizons différents, de la physique à la biologie, de la géochimie à la modélisation. Une richesse essentielle et nécessaire pour

aborder les questions globales de l'agronomie et de l'environnement. L'interdisciplinarité n'est pas un simple mot, elle est ici réalité.

Dans les mois qui viennent, l'Inra et Irstea vont fusionner. C'est une vraie opportunité, une évidence face aux enjeux de la gestion des ressources de la planète, un doublement de la capacité à agir et à trouver les solutions que tout le monde attend.

L'Inra trace sa route dans un monde complexe. Aujourd'hui, il doit faire entendre sa voix, car il en a la légitimité et le socle scientifique. Il doit affirmer un *leadership* international, à l'image de nombreuses institutions anglo-saxonnes et européennes, pour participer à la mise en place d'une science centrée sur les ressources, notamment pour l'usage et la gestion durables des sols et de la biodiversité. À lui de porter une initiative sur le suivi instantané et au long terme de l'utilisation des ressources agricoles et de la chaîne alimentaire en particulier. Pourquoi ne pas lancer un programme ambitieux sur l'utilisation des données mesurées au sol, incluant celles produites par les professionnels agricoles et les citoyens, avec celles issues de l'observation par les satellites et les drones ? L'Inra a aussi les capacités à intégrer les leviers de l'agronomie, de la génétique, du biocontrôle. À lui de ne pas rater le bouleversement des sciences numériques, comme l'analyse massive des données ou leur sécurisation par des technologies de type *blockchain* qui garantissent leur immutabilité. Armé de tous ces savoir-faire, il aidera, à n'en point douter, la transition agroécologique de l'agriculture. D'autres y pensent déjà ailleurs en Europe et dans le monde. Il faut donc agir, et vite. Un anniversaire est l'occasion de pousser à le faire.

*Philippe Gillet,
École polytechnique fédérale de Lausanne,
président du conseil scientifique de l'Inra*

Annexe 1

Unités du département Environnement et Agronomie en 1998 et en 2018

Unités du département Environnement et Agronomie en 1998.

Type*	Sigle	Intitulé	Localisation
UR	Agronomie	Agronomie	Bordeaux
UR	Agronomie	Agronomie	Clermont-Ferrand
UR	Agronomie	Agronomie	Auzeville
UR	Agronomie Laon-Péronne	Agronomie Laon-Péronne	Laon et Estrées Mons
UR	Agronomie Reims	Agronomie	Reims
UMR	Agronomie	Agronomie	Nancy
UMR	Agronomie	Agronomie	Rennes
UMR	Agronomie	Agronomie	Grignon
UR	APC	Agropédoclimatique de la zone Caraïbe	Guadeloupe, Petit-Bourg
UE	Auzeville	Auzeville	Auzeville
UR	Bioclimatologie	Bioclimatologie	Avignon
UR	Bioclimatologie	Bioclimatologie	Bordeaux
UMR	Bioclimatologie	Bioclimatologie	Grignon
UE	DIJ	Domaine expérimental d'Époisses	Époisses
UE	Duclos	Duclos	Guadeloupe, Petit-Bourg
UR	Écophysiologie et horticulture	Écophysiologie et horticulture	Avignon
UMR	LAPBV Caen	Laboratoire associé de physiologie et biochimie végétales	Caen
US	LAS Arras	Laboratoire d'analyses des sols	Arras
UMR	LBI	Laboratoire de biogéochimie isotopique	Paris
UMR	Lepse	Laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux	Montpellier
UR	Malherbo agronomie	Malherbologie agronomie	Dijon
UMR	Microbio des sols	Microbiologie des sols	Dijon
UMR	PIAF	Physiologie intégrée de l'arbre	Clermont-Ferrand
UR	Science du sol	Science du sol	Avignon
UR	Science du sol	Science du sol	Versailles
UMR	Science du sol	Science du sol	Grignon
UR	SESCPF	Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France	Orléans
UMR	SOL	Sol	Montpellier
UMR	SOL	Sol	Nancy
UMR	Sol et bioclimatologie	Sol et bioclimatologie	Rennes
UMR	SRA	Station de recherche agronomique	San Giuliano
UE	STEFCE	Service technique des études des facteurs climatiques de l'environnement	Avignon
UR	Thonon	Thonon	Thonon
UR	UEPF	Unité d'écophysiologie des plantes fourragères	Lusignan
UR	URIH	Unité de recherches intégrées en horticulture	Antibes
UR	UVV	Unité Vigne et vin	Angers
UMR	UVV	Unité Vigne et vin	Colmar

Unités du département Environnement et Agronomie en 2018.

Type*	Sigle	Intitulé	Localisation
UMR	AGIR	Agroécologie, innovations, territoires	Auzeville
US	Agroclim	Agroclim	Avignon
UMR	Agroécologie	Agroécologie	Dijon
UR	AgroImpact	Agroressources et impacts environnementaux	Laon et Estrées-Mons
UMR	Agronomie	Agronomie	Grignon
UR	Astro	Agrosystèmes tropicaux	Guadeloupe, Petit Bourg
UE	Auzeville	Domaine expérimental d'Auzeville	Auzeville
USC	CEFE	Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive	Montpellier
UMR	Cerege	Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement	Aix-en-Provence
USC	Cesbio	Centre d'études spatiales de la biosphère	Toulouse
UE	Citrus	Citrus	San Giuliano
UE	DIJ	Domaine expérimental d'Époisses	Époisses
UMR	Eco&Sols	Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et agrosystèmes	Montpellier
UAR	Ecolnnov	Impacts écologiques des innovations en production végétale	Grignon
UMR	EcoSys	Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agrosystèmes	Grignon-Versailles
UMR	EGFV	Écophysiologie et génomique fonctionnelle de la vigne	Bordeaux
UMR	Emmah	Environnement méditerranéen et modélisation des agro-hydrosystèmes	Avignon
UMR	EVA	Écophysiologie végétale, agronomie et nutriments	Caen
UMR	FARE	Fractionnement des agro-ressources et environnement	Reims
UE	Ferlus	Fourrages, environnement, ruminants Lusignan	Lusignan
UE	GCIE-Picardie	Unité expérimentale grandes cultures innovation environnement-Picardie	Estrées-Mons
UE	GCVG	Grandes cultures du Centre de Versailles-Grignon	Versailles-Grignon
UMR	GDEC	Génétique diversité et écophysiologie des céréales	Clermont-Ferrand
US	Infosol	Unité Infosol	Orléans
UMR	IRHS	Institut de recherche en horticulture et semences	Angers
UMR	ISA	Institut Sophia Agrobiotech	Sophia Antipolis
UMR	ISPA	Interaction sol plante atmosphère	Bordeaux
UMR	LAE	Agronomie et environnement	Nancy-Colmar
US	LAS	Laboratoire d'analyses des sols	Arras
UR	LBE	Laboratoire de biotechnologie de l'environnement	Narbonne
UMR	Lepse	Écophysiologie des plantes sous stress environnementaux	Montpellier
USC	LEVA	Légumineuses, écophysiologie végétale, agroécologie	Angers
UMR	Lisah	Laboratoire d'étude des interactions sol-agrosystème-hydrosystème	Montpellier
UMR	LSE	Sols et environnement	Nancy
UR	P3F	Unité de recherche pluridisciplinaire Prairies et plantes fourragères	Lusignan
UE	PEYI	Plateforme expérimentale sur le végétal et les agrosystèmes innovants en milieu tropical	Guadeloupe, Petit Bourg

Type*	Sigle	Intitulé	Localisation
UMR	PIAF	Physique et physiologie intégratives de l'arbre en environnement fluctuant	Clermont-Ferrand
UR	PSH	Unité de recherche plantes et systèmes de culture horticoles	Avignon
UMR	SAS	Sol agro et hydrosystème spatialisé	Rennes-Quimper
UMR	System	Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens	Montpellier
UR	Ursols	Unité Science du sol	Orléans
US	Ustrave	Unité de service et de recherche en analyses végétales et environnementales	Bordeaux
UE	Vigne et vin	Vigne et vin Bordeaux Grande Ferrade	Bordeaux

* Signification des sigles par « type » d'unité : UMR : unité mixte de recherche ; UR : unité de recherche propre ; UAR : unité d'appui à la recherche ; UE : unité expérimentale ; US : unité de service ; USC : unité sous contrat.

Annexe 2

Départements de l'Inra en 2018

Départements	Sigle
Alimentation humaine	AlimH
Biologie et améliorations des plantes	BAP
Caractéristiques et élaboration des produits issus de l'agriculture	Cepia
Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques	EFPA
Environnement et agronomie	EA
Génétique animale	GA
Mathématiques et informatique appliquées	MIA
Microbiologie et chaîne alimentaire	MICA
Physiologie animale et systèmes d'élevage	Phase
Santé animale	SA
Santé des plantes et environnement	SPE
Sciences pour l'action et le développement	SAD
Sciences sociales, agriculture et alimentation, espace et environnement	SAE2

Liste des sigles

AAC	Aires d'alimentation de captage	Cemagref	Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts
Aasqa	Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air	Cepia	Caractérisation et élaboration des produits issus de l'agriculture
AB	Agriculture biologique	Ceres	Crop Environment Resource Synthesis
ACBB	Agroécosystèmes, cycles biogéochimiques et biodiversité	Cetiom	Centre technique interprofessionnel des oléagineux métropolitains
Accaf	Adaptation de l'agriculture de la forêt au changement climatique	CIMS	Cultures intermédiaires multiservices
ACV	Analyse du cycle de vie	Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
Adage	Adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés	Citepa	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
ADD	Agriculture et développement durable	Civam	Centres d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural
Ademc	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie	CLIF	Climate Change and Fungal Diseases
ADN	Acide désoxyribonucléique	CNES	Centre national d'études spatiales
AFA	Association française d'agronomie	CNRS	Centre national de la recherche scientifique
AgMIP	Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project	Comifer	Comité français d'étude et développement de la fertilisation raisonnée
AMG	Modèle d'évolution du stock de carbone organique des sols cultivés	COP21	Conférence des Parties n° 21
AnaEE	Analyse et expérimentation sur les écosystèmes	COST	Coopération européenne en science et technologie
ANR	Agence nationale de la recherche	COV	Composés organiques volatils
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail	CPCS	Commission de pédologie et de cartographie
APCA	Assemblée permanente des chambres d'agriculture	CRAD	Centre de recherche en aménagement et développement
APES	Agricultural Production and Externalities Simulator	Crispr	Clustered Regular Interspaced Short Palindromic Repeats
Apsim	Agricultural Production Systems Simulator	Cropsys	Cropping Systems Simulation Model
Aropa	Agriculture, recomposition de l'offre et politique agricole	CSE	Comité social et économique
ARP	Atelier de réflexion prospective	CSMS	Cartographie des sols par modélisation statistique
Arvalis	Institut du végétal	CT	Champ thématique
Asirpa	Analyse des impacts de la recherche publique agronomique	CTPS	Comité technique permanent de la sélection des plantes cultivées
ATS	Action transversale structurante	DEPE	Délégation à l'expertise scientifique collective, à la prospective et aux études
BDAT	Base de données des analyses de terre	Dephy	Démonstration, expérimentation et production de références sur les systèmes économes en produits phytosanitaires
BdD	Base de données	DERF	Direction de l'espace rural et de la forêt
BDETM	Base de données des éléments traces métalliques	DGER	Direction générale de l'enseignement et de la recherche
BGA	Biologie et gestion des adventices	DGRST	Délégation générale à la recherche scientifique et technique
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières	DOI	Digital Object Identifier
BTEP	Bâtiments, stockages, épandages et pâturages des systèmes bovins laitiers	DPE	Délégation permanente à l'environnement
CACG	Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne	DSM	Digital Soil Mapping
Carex	Caractérisation des unités expérimentales	DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
CAS	Changement d'affectation des sols	Ecoger	Écologie pour la gestion des écosystèmes et de leurs ressources
CA-SYS	Co-Designed Agroecological System Experiment	Écophyto	Politique publique de réduction des usages de pesticides
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives		
CEES	Conservatoire européen des échantillons de sols		

Efese-EA	Évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques-Environnement et Agronomie	IPM	Integrated Pest Management
EGC	Environnement et grandes cultures	Ipsim	Injury Profile Simulator
Elter	Long-Term Ecosystem in Europe	IPSL	Institut Pierre-Simon-Laplace
EMAA	Énergie, méthanisation, autonomie azote	IRD	Institut de recherche pour le développement
ENTPE	École nationale des travaux publics de l'État	Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
EPA	Environnement physique et agronomie	ISMO	Indice de stabilité de la matière organique
EPIC	Environmental Policy Integrated Climate	ISOP	Information et suivi objectif des prairies
EPST	Établissement public à caractère scientifique et technologique	ITB	Institut technique de la betterave
ESA	European Society for Agronomy	ITPS	Intergovernmental Technical Panel on Soils
ESCo	Expertise scientifique collective	JPI-Facce	Joint Programming Initiative on Agriculture, Food security and Climate Change
Esfri	European Strategy Forum on Research Infrastructures	Labex	Laboratoire d'excellence Biodiversité, agroécosystèmes, société, climat
ETM	Éléments traces métalliques	BASC	
Evaspa	Evapotranspiration Assessment from Space	LDAR	Laboratoire départemental d'analyse et de recherche
Fair	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable	LIT	Laboratoire d'innovation territoriale
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture	Lixim	Minéralisation et lixiviation du nitrate
Farre	Forum des agriculteurs responsables respectueux de l'environnement	LULUCF	Land use, land use change and forestry
FE	Facteurs d'émissions	MAAF	Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
G × E × C	Génotype × environnement × conduite de cultures	Macsur	Modeling European Agriculture with Climate Change for Food Security
GAB	Groupement des agriculteurs biologiques	Maelia	Multi-Agents for Environmental Norms Impact Assessment
GES	Gaz à effet de serre	Means	Multicriteria Assessment of Sustainability
GET	Géosciences environnement Toulouse	Micces	Mission Inra sur le changement climatique et l'effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	Microger	Microbiologie du sol en milieu agricole et forestier
GIP	Groupement d'intérêt public	MNHN	Muséum national d'histoire naturelle
GIRE	Gestion intégrée de la ressource en eau	MOS	Matières organiques des sols
GIS	Groupement d'intérêt scientifique	NASA	National Aeronautics and Space Administration
GCHP2E	Grande culture à hautes performances économiques et environnementales	NOE	Nitrous Oxide Emission
GISfi	Groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles	OAD	Outil d'aide à la décision
GRA	Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases	OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ICOS	Integrated Carbon Observation System	OGM	Organisme génétiquement modifié
IDEA	Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles	Omere	Observatoire méditerranéen de l'environnement rural de l'eau
IFEN	Institut français de l'environnement	OMR	Ordures ménagère résiduelles
Ifremer	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	ONU	Organisation des Nations unies
Ifsttar	Institut français des sciences et technologie des transports, de l'aménagement et des réseaux	ORE	Observatoire de recherche en environnement
IGCS	Inventaire, gestion et conservation des sols	Orstom	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière	Ozcar	Observatoires de la zone critique applications et recherches
INA-PG	Institut national agronomique Paris-Grignon	PAC	Politique agricole commune
Ineris	Institut national de l'environnement industriel des risques	PAEC	Protection agroécologique des cultures
INH	Institut national d'horticulture	Pastis	Predicting Agricultural Solute Transport in Soils
Inra	Institut national de la recherche agronomique	PCR	Polymerase Chain Reaction
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale	Pessac	Physicochimie et écotoxicologie des sols d'agrosystèmes contaminés
Inspire	Infrastructure for Spatial Information in Europe	PGPR	Plant Growth Promoting Rhizobacteria
INSU	Institut national des sciences de l'univers	PIA	Programmes d'investissements d'avenir
IPBES	Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques	PIC	Protection intégrée des cultures
		Piren	Programme interdisciplinaire de recherche en environnement
		Plage	Plateforme d'évaluation agri-environnementale

PNCA/ LEFE-CHAT	Programme national de chimie atmosphérique/Les enveloppes fluides et l'environnement-Chimie atmosphérique	SIC	Surfaces et interfaces continentales
PNSE2	Plan national Santé Environnement 2	Sigmae	Sustainable Introduction of GM Crops in European Agriculture
PPP	Présence de produits phytopharmaceutiques	Smach	Sustainable Management of Crop Health
Price	Practical Implementation of Coexistence in Europe	SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
PRO	Produits résiduels organiques	Soere	Système d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement
PROBA-V	Project for On-Board Autonomy-Vegetation	SRI	Soil Root Interactions
PURE	Innovative Crop Protection for Sustainable Agriculture	SSD	Schéma stratégique de département
RARE	Ressources agronomiques pour la recherche	Stics	Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard
RCB	Rationalisation des choix budgétaires	Sucros	Simple and Universal Crop Growth Simulator
RMQS	Réseau de mesure de la qualité des sols	Suitma	Soils or Urban, Industrial, Traffic, Military and Mining Areas
RMT	Réseaux mixtes technologiques	TFRN	Task Force on Reactive Nitrogen
Erytage	Évaluation de la durabilité des systèmes et des territoires agricoles	TIGA	Territoires d'innovation de grande ambition
ROSAA	Robust and Sensitive Ammonia Analyser	UISS	Union internationale des sciences du sol
Scees	Service central des enquêtes et études statistiques	Umpire	Understanding and Modeling Plant-soil Interactions in the Rhizosphere Environment
SdC	Systèmes de culture	UMR	Unité mixte de recherche
SdCi	Systèmes de culture innovants	UMT	Unité mixte technologique
Seamless	System for Environmental Agricultural Modelling-Linking European Science and Society	Unifa	Union des industries de la fertilisation
Sebiopag	Services écosystémiques assurés par la biodiversité dans les paysages agricoles	UPMC	Unité de phytopharmacie et médiateurs chimiques
SEI	Software Engineering Institute	USC	Unité sous contrat
SESCPF	Service d'étude des sols et de la carte pédologie en France	VAC	Veille agroclimatique
		VSoil	Plateforme Sol Virtuel
		VTH	Variétés tolérantes aux herbicides

Liste des auteurs

Frédérique Angevin	Philippe Debaeke	Marie-Hélène Jeuffroy	Sylvain Pellerin
Jean-Noël Aubertot	Nathalie de Noblet-Ducoudré*	Éric Justes	Laurent Philippot
Dominique Arrouays	Thierry Doré	Laurent Lapchin	Laurent Prévot
Jérôme Balesdent	Claude Doussan	Marie Launay	Hélène Raynal
Frédéric Baret	Pascal Dubrulle	Claire Lavigne	Sylvie Recous
Nicolas Beaudoin	Patrick Durand	Marianne Le Dref	Pierre Ricci*
Carole Bedos	Michel Duru	Delphine Leenhardt	Guy Richard
Pierre Benoît	Christophe Fléchar	Gilles Lemaire	Dominique Ripoche
Annette Bérard	Ophélie Fovet	Philippe Lemanceau	Corinne Robert
Jacques-Éric Bergez	Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri	Joël Léonard	Paul Robin
Nadia Bertin	Philippe Gate*	Françoise Lescourret	Françoise Ruget
Antonio Bispo	Ariane Gaunand*	Bruno Mary	Jean Roger-Estrade
Christian Bockstaller	Hélène Gautier	Philippe Mauguin*	Laurent Ruiz
Vincent Bretagnolle*	Michel Génard	Anne Mérot	Stéphane Ruy
Laurent Bruckler	Sophie Générumont	Antoine Messéan	Bertrand Schmitt*
Sophie Brunel-Muguet	Philippe Gillet*	Jean-Marc Meynard*	Christophe Schwartz
Samuel Buis	Florence Habets*	Jérôme Molénat	Bernard Seguin
Pierre Cellier	Melynda Hassouna	Jean-Louis Morel	Pierre Stengel
Abad Chabbi	Philippe Hinsinger	Christian Mougin	François Tardieu
André Chanzy	Sabine Houot	Nathalie Munier-Jolain	Olivier Therond
Pierre Cornu*	Bernard Itier	Nicolas Munier-Jolain	Egizio Valceschini*
Isabelle Cousin	Pierre-Alain Jayet*	Loïc Pagès	Hayo M.G. van der Werf
Cécile Dagès	Guillaume Jégo*	Virginie Parnaudeau	Françoise Vertès
Zangwu Dai		Dominique Patureau	Marc Voltz

* auteur ne travaillant pas dans une unité rattachée au département EA.

Crédits iconographiques des illustrations de début de partie

Partie I

Dispositif expérimental de longue durée, dit « les 42 parcelles », mis en place en 1928 sur le site de Versailles (78). Ce dispositif a pour objectif de déterminer les effets de l'application prolongée des principaux engrais à base d'azote, de phosphore et de potassium, ainsi que d'amendements organiques et calcaires sur la composition et les propriétés physiques des sols de limons éoliens, caractéristiques du Bassin parisien et du nord de la France. Il joue également un rôle dans l'enregistrement de la qualité environnementale (accumulation et devenir de retombées atmosphériques de micropolluants métalliques et de radioéléments).

Il est accompagné d'une collection d'échantillons de terre prélevés régulièrement.

© BREUIL Sébastien/Inra.

Partie II

Jachère de coquelicots en fleurs.

© CARRERAS Florence/Inra.

Partie III

Lignes de convoyage permettant de faire circuler les plantes sur la plateforme PhénoArch.

© SLAGMULDER Christian/Inra.

Partie IV

Rampe d'irrigation sur parcelle de tournesol.

© CATTIAU Gilles/Inra.

Partie V

Le vendredi 1^{er} août 2014 à Marciac (32), s'est tenue la Journée Agroforesterie en présence de François Houllier, PDG de l'Inra, et de Michèle Marin, présidente du Centre Inra Toulouse.

© CATTIAU Gilles/Inra.

Édition : Juliette Blanchet

Maquette, mise en page et couverture : Gwendolin Butter

Imprimé par Jouve

Dépôt légal : janvier 2019

Partout où l'agriculture a été modernisée au cours du xx^e siècle, des hausses de productivité de la terre et du travail extrêmement fortes ont permis, avec la « révolution verte », d'en finir avec les famines massives. Pourtant, ce siècle s'est terminé sur un constat critique et un diagnostic alarmant : dégradation des sols, pollutions diffuses, érosion de la biodiversité... La modernisation agricole a eu de lourds impacts négatifs sur l'environnement, dont l'agriculture subit en retour les conséquences.

Dans un contexte de bouleversement climatique, et face à l'augmentation démographique et au changement des régimes alimentaires, il est crucial de nourrir l'humanité sans continuer à dégrader la planète. L'enjeu des agricultures est de produire en réduisant drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, sur des espaces agricoles limités où doivent être préservés la biodiversité, la qualité des ressources, les sols, les eaux, l'air...

Cet ouvrage collectif, publié à l'occasion des vingt années d'existence du département Environnement et Agronomie de l'Inra, fait le point sur les avancées réalisées dans ce sens. Il montre qu'une communauté de chercheurs, pluridisciplinaire et diversifiée, s'est organisée pour s'engager résolument dans des recherches sur les grands cycles biogéochimiques, la valorisation de la biodiversité, l'impact, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique, la conception de systèmes de culture agro-écologiques...

Le département Environnement et Agronomie a contribué au renouvellement des méthodes d'observation et d'expérimentation, de modélisation des écosystèmes et d'évaluation des agrosystèmes. Il porte aujourd'hui une agronomie des systèmes, de la pluralité des échelles de temps et d'espace, de l'intégration et de la complexité, des compromis entre objectifs assignés aux territoires, car il a développé non seulement les compétences scientifiques nécessaires à la production d'une recherche de haut niveau, mais aussi une forte capacité d'expertise au service des politiques publiques et, plus généralement, de tous les acteurs qui souhaitent faire progresser de concert agriculture et environnement.

Guy Richard, directeur de recherche à l'Inra, chef du département Environnement et Agronomie de 2010 à 2018, actuellement délégué à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Études auprès du président-directeur général.

Pierre Stengel, directeur de recherche à l'Inra aujourd'hui retraité, chef du département de Science du sol de 1992 à 1997, directeur scientifique adjoint Environnement, Forêt et Agriculture de 1998 à 2001, directeur scientifique Écosystèmes naturels et cultivés de 2002 à 2009.

Gilles Lemaire, directeur de recherche à l'Inra aujourd'hui retraité, chef de département adjoint Agronomie de 1993 à 1997, chef de département adjoint Environnement et Agronomie de 1998 à 2001.

Pierre Cellier, directeur de recherche à l'Inra, chef de département adjoint Environnement et Agronomie depuis 2014.

Egizio Valceschini, directeur de recherche à l'Inra, président du Comité d'histoire Inra-Cirad depuis 2011.

En couverture : © Frédéric Bornet / Inra

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, Inra, Irstea
www.quae.com



39,50 €

ISBN : 978-2-7592-2937-6



Réf. : 02667