

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 décarneation 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.