

Avril 2019

Pour citer ce rapport :

Caquet T., Gascuel-Odoux C., Tixier-Boichard M., Dedieu B., Detang-Dessendre C., Dupraz P., Faverdin P., Hazard L., Hinsinger P., Litrico-Chiarelli I., Medale F., Monod H., Petit-Michaud S., Reboud X., Thomas A., Lescourret F., Roques L., de Vries H., Soussana J.-F., 2019. Réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie. Rapport de synthèse. 108 pp.

Contributeurs

Coordinateurs

Thierry Caquet, DS Environnement
Jean-Francois Soussana, VP International

Comité de pilotage

Benoît Dedieu, Chef de département SAD
Cécile Detang-Dessendre, DS Adjointe Agriculture
Pierre Dupraz, Chef de département adjoint SAE2
Chantal Gascuel-Odoux, DS Adjointe Environnement
Philippe Hinsinger, Chef de département EA
Françoise Médale, Cheffe de département PHASE
Xavier Reboud, Chargé de mission DS Agriculture
Alban Thomas, Chef de département SAE2
Michèle Tixier-Boichard, DS Adjointe Environnement

Composition des groupes de travail

Intégration de l'agroécologie dans les filières

Animateurs : Cécile Detang-Dessendre (DS Adjointe Agriculture, SAE2) – Hugo de Vries (CEPIA).

Représentants des départements : Michel Duru (EA) – Claire Lamine (SAD) – Joël Abecassis (CEPIA) – Stéphane Bellon (SAD) – Alain Boissy (PHASE) – Céline Bonnet (SAE2) – Zohra Bouamra-Mechemache (SAE2) – Douadia Bougherara (SAE2) – Michel Duclos (PHASE) – Alexandre Gohin (SAE2) – Marianne Le Bail (AgroParisTech) – Marie-Benoît Magrini (SAD) – Christine de Sainte Marie (SAD) – Jean-Marc Blazy (SAE2) – Jean-Marc Meynard (SAD) – Didier Raboisson (ENV Toulouse) – Bernard Kurek (CEPIA) – Ludovic Montastruc (INP ENSIACET).

Transition agroécologique de l'exploitation agricole

Animateurs : Laurent Hazard (SAD) – Benoît Dedieu (SAD) – Pierre Dupraz (SAE2).

Représentants des départements : Jacques-Eric Bergez (EA) – Alain Carpentier (SAE2) – Marianne Cerf (SAD) – Anne Farruggia (SAD) – Claire Lamine (SAD) – Amandine Lurette (SA) – Jérôme Enjalbert (BAP) – Guillaume Martin (EA) – Roger Martin-Clouaire (MIA) – Mireille Navarrete (SAD) – Sandra Novak (EA) – Lorene Prost (SAD) – Arnaud Reynaud (SAE2).

Valoriser les processus écologiques, hydrologiques et biogéochimiques dans des paysages multifonctionnels

Animateurs : Thierry Caquet (DS Environnement) – Sandrine Petit-Michaut (SPE).

Représentants des départements : Stéphanie Aviron (SAD) – Marc Deconchat (SAD) – Sabrina Gaba (SPE) – Chantal Gascuel-Odoux (DS Adjointe Environnement, EA) – Hervé Jactel (EFPA) – Mourad Hannachi (SAD) – Claire Lavigne (CD Adjointe EA) – Vincent Martinet (SAE2) – Julien Papaix (MIA) – Olivier Plantard (SA) – Lionel Ranjard (EA) – Marc Voltz (EA).

Valoriser la diversité génétique en sélection végétale et animale

Animatrices : Isabelle Litrico-Chiarelli (BAP) – Michèle Tixier-Boichard (DS Adjointe Environnement, GA)

Représentants des départements : Jean-Pierre Bidanel (GA) – Nathalie Couix (SAD) – Pascal Croiseau (GA) – Jérôme Enjalbert (BAP) – Pauline Ezzano (SA) – Hélène Freville (BAP) – Arnaud Gauffreteau

(EA) – Dominique Hazard (GA) – Pierre-Benoît Joly (SAE2) – Bernard Kurek (CEPIA) – François Lefèvre (EFPA) – Stéphane Lemarié (SAE2) – Valérie Mechin (CEPIA) – Laurence Moreau (BAP) – Jean-Benoît Morel (SPE) – Florence Phocas (GA) – Laurence Puillet (PHASE) – Nicolas Verzelen (MIA).

Modéliser les interactions biotiques, en lien avec des dynamiques abiotiques et socio-économiques, pour l'agroécologie

Animateurs : Hervé Monod (CD MIA) – Chantal Gascuel-Odoux (DS Adjointe Environnement, EA) – Françoise Lescourret (EA) – Lionel Roques (MIA).

Représentants des départements : David Bohan (SPE) – Evelyne Costes (BAP) – Pierre Courtois (SAE2) – Frédéric Fabre (SPE) – Philippe Faverdin (PHASE) – Alain Franc (EFPA) – Thierry Hoch (SA) – Florence Phocas (GA) – Jean-Philippe Steyer (EA) – Marc Tchamitchian (SAD).

Quelle contribution des agroéquipements à l'agroécologie ?

Animateurs : Philippe Faverdin (PHASE) – Xavier Reboud (chargé de mission, DS Agriculture).

Représentants des départements : Frédéric Baret (EA) – Patrick Bertuzzi (EA) – André Chanzy (EA) – Nathalie Gandon (MIA) – Frédérick Garcia (MIA) – Raphaël Guatteo (ONIRIS) – Alexandre Joannon (SAD) – Morgan Meyer (Mines ParisTech) – Christophe Staub (GA) – Pierre-François Vaquiée (FNCUMA).

Liste des abréviations et acronymes

AB : Agriculture Biologique	EFPA : Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques
ABC : <i>Approximate Bayesian Computation</i>	ELSA : <i>Environmental Life cycle and Sustainability Assessment</i>
ACBB : Agro-écosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité	ENI : Effets Non Intentionnels
ACCAF : Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la Forêt	ENSFEA : École Nationale Supérieure de Formation de l'Enseignement Agricole
ACV : Analyse de Cycle de Vie	ESCo : Expertise Scientifique Collective
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	ESR : Efficacité, Substitution, Reconceptualisation
AgriBio : Agriculture Biologique	EUCARPIA : <i>European Association for Research on Plant Breeding</i>
AlimH : Alimentation Humaine	FAIR : <i>Findable, Accessible, Interoperable and Re-usable</i>
AMAP : Association pour le Maintien de l'Agriculture Paysanne	FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'agriculture
ANR : Agence Nationale de la Recherche	FNE : France Nature Environnement
APABA : Association Pour la Promotion de l'Agriculture Biologique en Aveyron	FRAB : Fédération Régionale des Agriculteurs Biologiques
AVEM : Association Vétérinaire des Eleveurs du Millavois	FRB : Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité
BASC : Biodiversité, Agroécosystèmes, Société, Climat	FSD : <i>Farming Systems Design</i>
BOKU : <i>Universität für Bodenkultur</i> , Vienne	GA : Génétique Animale
CA-SYS : <i>Co-designed Agroecological System Experiment</i>	GAB : Groupement des Agriculteurs Biologiques
CASDAR : Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural	GAEC : Groupement Agricole d'Exploitation en Commun
CATI : Centre Automatisé du Traitement de l'Information	GET : Grand Enjeu Transversal
CBD : <i>Convention on Biological Diversity</i>	GIEE : Groupement d'Intérêt Economique et Environnemental
CDC : Caisse des Dépôts et Consignations	GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique
CEPIA : Caractérisation et Elaboration des Produits Issus de l'Agriculture	GISA : Gestion Intégrée de la Santé des Animaux
CESAB : Centre de Synthèse et d'Analyse sur la Biodiversité	IA : Intelligence Artificielle
CESE : Conseil Economique Social et Environnemental	IDEAS : <i>Initiative for Design of Agrifood Systems</i>
CIAG : Carrefour de l'Innovation Agronomique	IDELE : Institut de l'Elevage
CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement	IFSA : <i>International Farming System Association</i>
CIVAM : Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural	ILTER : <i>International Long Term Ecological Research Network</i>
CNAM : Conservatoire National des Arts et Métiers	ILVO : <i>Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek – Research Institute for Agriculture, Fisheries and Food</i>
CORMAS : <i>COmmon-pool Resources and Multi-Agent Simulations</i>	INLA : <i>Integrated nested Laplace approximations</i>
COST : <i>European Cooperation in Science and Technology</i>	INPI : Institut National de la Propriété Industrielle
CPI : Chargé de Partenariat et d'Innovation	IRD : Institut de Recherche pour le Développement
CSIRO : <i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation</i>	ITSAP : Institut Technique et Scientifique de l'Apiculture et de la Pollinisation
CTPS : Comité Technique Permanent de la Sélection	LEGTA : Lycée d'Enseignement Général Technologique Agricole
EA : Environnement et Agronomie	LISC : Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes
EcoServ : Services rendus par les écosystèmes	LIT : Laboratoire d'Innovation Territoriale
ECPLF : <i>European Conference on Precision Livestock Farming</i>	LTO : <i>Long-term observations</i>
EFITA : <i>European Federation for Information Technologies in Agriculture, food and the environment</i>	LTSER : <i>Long Term Socio-economic and Ecosystem Research</i>
	LUKE : <i>Natural Resources Institute Finland</i>
	MAELIA : <i>Multi-Agents for Environmental norms Impact Assessment</i>
	MCAE : Mobilisation Collective pour l'Agro-Ecologie

MEANS : *Multicriteria Assessment of Sustainability*
 MIA : Mathématiques et Informatique Appliquées
 ModStatSP : Modélisation et statistique en santé des animaux et des plantes
 MOOC : *Massive Open Online Course*
 MP : Métaprogramme
 OAD : Outil d'Aide à la Décision
 ObsTAE : Observatoire de la Transition AgroEcologique
 ODD : Objectifs du Développement Durable
 ODR : Observatoire du Développement Rural
 ORE : Observatoire de Recherche en Environnement
 PAC : Politique Agricole Commune
 PEI : Partenariat Européen d'Innovation
 PHA : polyhydroxyalcanoates
 PHASE : Physiologie Animale et Systèmes d'Elevages
 PIA : Programme d'Investissements d'Avenir
 PLS : *Partial Least Squares*
 PME : Petite et Moyenne Entreprise
 PPI : Programme Prioritaire International
 PRO : Produits Résiduaux Organiques
 PSDR : Programme de Recherche Pour et Sur le Développement Régional
 PSE : Paiements pour Services Environnementaux
 RAD : Réseau Agriculture Durable
 RECORD : REnovation et COordination de la modélisation des cultures pour la gestion des agro-écosystèmes
 RFID : *Radio Frequency Identification*
 RMT : Réseau Mixte Technologique
 RZA : Réseau des Zones Ateliers
 S-AGA : Sélection de l'Aptitude Générale à l'Association
 S-ARA : Sélection de l'Aptitude Réciproque à l'Association
 SAD : Sciences pour l'Action et le Développement

SAE2 : Sciences Sociales, Agriculture & Alimentation, Espace & Environnement
 SAVI : Site Atelier pour l'étude des pratiques agricoles et de leurs effets sur la biodiversité en territoire Viticole
 SEBIOPAG : Services Ecosystémiques assurés par la Biodiversité dans les Paysages Agricoles
 SES : *Socio-Ecologic Systems*
 SHS : Sciences Humaines et Sociales
 SISA : *System Innovation towards Sustainable Agriculture*
 SMaCH : *Sustainable Management of Crop Health*
 SOERE : Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement
 SPCE : Système de polyculture élevage
 SPE : Santé des Plantes et Environnement
 SPRU : *Science Policy Research Unit – University of Sussex*
 STRN : *Sustainability Transitions Research Network*
 TAEA : Transition Agroécologique de l'Exploitation Agricole
 TERENO : *Terrestrial Environmental Observatories*
 TIGA : Territoire d'Innovation - Grande Ambition
 TRL : *Technology Readiness Level*
 UMT : Unité Mixte Technologique
 UNCCD : *United Nations Convention to Combat Desertification*
 UNFCCC : *United Nations Framework Convention on Climate*
 USDA : *US Department of Agriculture*
 UTH : Unité de Travail Humain
 UVAE : Université Virtuelle d'AgroEcologie
 UVED : Université Virtuelle en Environnement et Développement durable
 WFSPA : *World Food Summit Plan of Action*
 WoS : *Web of Science*
 WUR : *Wageningen University & Research*

Table des matières

Introduction.....	1
Une définition de l'agroécologie toujours en évolution	1
2011, l'agroécologie à l'agenda de l'Inra	2
Un domaine scientifique dynamique	5
Un contexte sociétal national et international porteur	5
En 2017, des objectifs renouvelés et élargis	7
Intégration de l'agroécologie dans les filières.....	11
Périmètre, bilan et priorités	11
Les cadres de travail et partenariats	17
Transition agroécologique de l'exploitation agricole.....	21
Périmètre, bilan et priorités	21
Les cadres de travail et partenariats	31
Valoriser les processus écologiques, hydrologiques et biogéochimiques dans des paysages multifonctionnels	35
Périmètre, bilan et priorités	35
Les cadres de travail et partenariats	43
Valoriser la diversité génétique en sélection végétale et animale	47
Périmètre, bilan et priorités	47
Les cadres de travail et partenariats	54
Modélisation des interactions biotiques, en lien avec des dynamiques abiotiques et socio-économiques, pour une vision et une gestion agroécologique des agroécosystèmes.....	59
Périmètre, bilan et priorités	59
Les cadres de travail et partenariats	65
Quelle contribution des agroéquipements à l'agroécologie ?	69
Périmètre, bilan et priorités	69
Les cadres de travail et partenariats	79
Transversalités et recommandations	83
Transversalités.....	83
Des recommandations pour l'Inra.....	87
Bibliographie	93

Introduction

L'Inra a lancé en 2011 le chantier « Agroécologie », qui avait pour vocation à faire émerger l'agroécologie en tant que discipline scientifique, à l'interface entre les sciences de l'écologie et de l'agronomie. Dans le cadre du plan d'action associé au Document d'Orientation #Inra2025, il a été décidé d'approfondir certains des thèmes identifiés lors de ce premier chantier et d'élargir le champ des investigations dans le domaine de l'agroécologie. La forme retenue est celle d'une réflexion prospective interdisciplinaire qui a été menée de mars 2017 à décembre 2018, et dont le présent document constitue le rapport de synthèse.

Une définition de l'agroécologie toujours en évolution

Selon Wezel *et al.* (2009), l'agroécologie peut être définie à la fois comme un domaine scientifique, une pratique et un mouvement social. D'autres définitions en ont été proposées, qui intègrent avec une intensité variable l'écologie avec d'autres disciplines académiques (agronomie, sociologie, etc.), l'éducation, les connaissances locales ou traditionnelles, la durabilité des systèmes de production ou des systèmes alimentaires, la biodiversité, l'inter- ou la transdisciplinarité, etc. (Wezel *et al.*, 2018).

L'agroécologie est un nouveau paradigme qui vise à valoriser les processus biologiques pour couvrir à la fois les attentes de production et l'ensemble des autres services écosystémiques fournis par les agrosystèmes. Un corollaire à cette définition est de viser à ce qu'à travers les pratiques déployées, les agrosystèmes intègrent les fonctionnalités écologiques qui garantissent leur propre pérennité, notamment en termes de reconstitution de stocks de nutriments et de maintien du potentiel productif. Cette définition permet de clarifier les attendus posés à la recherche. En effet, sous les termes de '*smart agriculture*' ou de '*sustainable agriculture*' se retrouvent réunis des travaux plutôt d'ordre technologique exposant les avancées d'une action de précision, propre à permettre le meilleur usage possible des ressources. Ceci correspond à une définition plutôt « faible » de l'agroécologie, car s'insérant dans la continuité des systèmes actuels, sans saut qualitatif revendiqué sur l'efficacité d'utilisation des intrants, ni d'appel explicite à des processus biologiques en substitution de l'usage d'intrants (Duru *et al.*, 2014).

A cette agroécologie « faible », s'oppose une agroécologie « forte », définie par sa finalité de cohérence et de durabilité et par la mobilisation de processus biologiques (Duru *et al.*, 2014). Edicté sous forme de principe de construction des systèmes agroécologiques, vouloir « valoriser les processus biologiques » peut nécessiter des reconceptions en profondeur des systèmes de culture, en affectant par exemple le choix de l'assolement ou des génotypes, les formes, dates et modalités des interventions, l'intrication entre production végétale et élevage, l'articulation aux modes de distribution et de consommation, l'organisation des paysages, etc. Cette approche permet de ne plus restreindre le domaine de l'agroécologie à la seule production végétale mais au contraire de considérer les productions animales comme un pilier majeur des processus biologiques. Elle met aussi l'accent sur le suivi de processus et de flux entretenus dans un équilibre dynamique autorisant à la fois l'exploitation et la reconstitution des stocks. Cette distinction entre agroécologie « faible » et « forte » revient à prendre en compte dans cette prospective scientifique ce qui dépasse la simple optimisation et implique des reconceptions des systèmes agricoles. Dans une vision très intégrative, l'agroécologie ne peut se développer sans une cohérence avec les besoins de consommation et leur organisation dans les territoires ; certains lui attribuent alors la dimension de '*food system*' (Francis *et al.*, 2003 ; Gliessman, 2006).

L'agroécologie côtoie le concept d'économie circulaire, au sens où tous deux s'inscrivent dans le cadre du développement durable et s'inspirent notamment des notions « d'économie verte », « d'économie de l'usage », voire « d'écologie industrielle », du bouclage des cycles en évitant le « stade

déchets », et en limitant d'autant la consommation de matières premières et d'énergie. Elle partage avec la bioéconomie l'ambition vertueuse de remplacer partiellement et sobrement l'usage de ressources et de productions non renouvelables d'origine fossile, par la mobilisation des ressources renouvelables (photosynthèse, microbiologie et macrofaune des sols) pour leur transformation en aliments, fertilisants organiques, matériaux, bases chimiques et bioénergies variées. C'est pour cela que l'agroécologie a d'abord été conceptualisée et réfléchi dans le domaine des productions végétales, avant que des principes fondateurs ne soient proposés pour l'élevage. Si l'agroécologie partage avec l'économie circulaire et la bioéconomie l'ambition de servir une agriculture durable économe en ressources, elle s'en distingue par la place centrale qu'elle donne à la compréhension et à la valorisation de la diversité du vivant.

2011, l'agroécologie à l'agenda de l'Inra

La Figure 1 illustre la dynamique des initiatives qui ont impliqué l'Inra de 2011 à 2014.

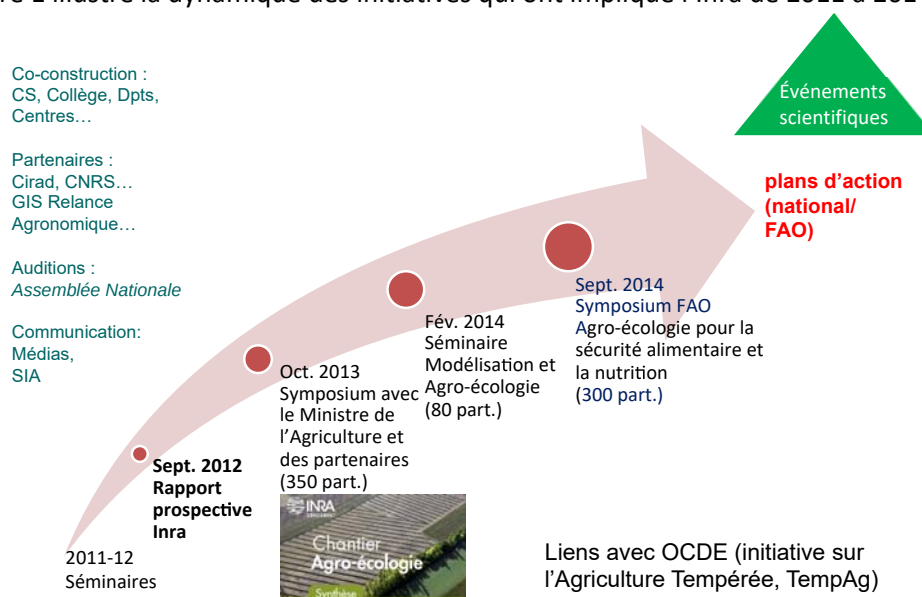


Figure 1. Dynamique des initiatives en agroécologie ayant impliqué l'Inra de 2011 à 2014.

Le chantier lancé en 2011 a permis d'amplifier une vision systémique et écologique des agroécosystèmes, en les considérant comme des écosystèmes, écosystèmes spécifiques car gérés pour être exploités à des fins de production agricole et plus largement pour la fourniture de services écosystémiques.

Ce chantier avait été organisé autour de 5 priorités :

- **Interactions biotiques dans les agroécosystèmes** : appréhender l'ensemble des interactions biotiques et de leurs régulations et savoir utiliser leurs réponses à des changements de pratiques ou d'environnement.
- **Agroécologie du paysage** : déployer un ensemble d'approches spatialisées reliant différentes échelles et différents niveaux d'organisation. Les applications concernent notamment l'organisation de compromis entre les services des agroécosystèmes à des échelles allant du paysage à la région.
- **Évaluation multicritère** : renouveler l'évaluation de la durabilité des systèmes agricoles grâce à l'intégration de la biodiversité et des services des écosystèmes.
- **Gestion durable de la multifonctionnalité des sols et des eaux** : mettre à profit les invariants dans les couplages entre compartiments de l'environnement et entre cycles biogéochimiques pour réduire les intrants et les rejets, et préserver les ressources en sol et en eau.

- **Conception et transition de nouveaux systèmes agricoles** : combiner les réflexions des axes précédents en vue de les mettre au service de deux attendus relatifs aux systèmes agricoles : (i) ce que pourraient être les systèmes agricoles de demain (conception et évaluation) ; (ii) la manière dont ils pourraient être mis en place, en impliquant la notion de transition et en mobilisant fortement les compétences en sciences de l'homme et de la société.

Ce chantier a donné lieu à la parution en 2012 d'un rapport (Inra, 2012) et d'une synthèse¹, ainsi qu'à la formulation de recommandations dans huit domaines (recherche ; expérimentation et observation ; modélisation ; animation scientifique ; dispositifs et ressources humaines ; formation ; partenariat et innovation ; international). Des conférences mobilisant des intervenants internationaux ont été organisées. Elles ont été enregistrées et mises en ligne sur internet pour permettre une large réflexion au sein de l'Inra et au-delà. Des séminaires de travail ont mobilisé les directions des départements. L'agroécologie a depuis percolé dans les schémas stratégiques de plusieurs départements et dans leurs activités de recherches, comme un nouveau paradigme pour repenser les recherches sur les agroécosystèmes.

Outre un élargissement progressif de la définition de l'agroécologie aux systèmes alimentaires, les **principaux impacts** de ce premier chantier ont été les suivants :

- Production scientifique :
 - *Position papers* impliquant souvent plusieurs départements (par exemple, Dumont *et al.*, 2013 ; Angeon *et al.*, 2014 ; Lemanceau *et al.*, 2015 ; Bell et Bellon, 2018 ; Toffolini *et al.*, 2018).
- Animation scientifique :
 - Regards croisés « agroécologie et multi-performance », animés par les Directeurs Scientifiques Environnement et Agriculture et leurs équipes.
 - Séminaire modélisation pour l'agroécologie, animé par le département MIA et le Directeur Scientifique Environnement et son équipe.
- Programmation :
 - L'agroécologie est désormais présente dans beaucoup de schémas stratégiques de département, quelques départements ayant joué un rôle moteur comme SAD et PHASE. Les échelles larges, les temps longs, les concepts de résilience et de durabilité, pour partie liés à l'agroécologie, sont aussi présents. Les unités de recherche se sont approprié les enjeux, comme en témoigne une production scientifique amplifiée sur l'agroécologie. Des profils de postes de recrutement de chercheurs, des directeurs de recherche plus nombreux sur ce thème en témoignent aussi.
 - L'agroécologie a aussi trouvé sa place dans les métaprogrammes. En particulier, le métaprogramme EcoServ a été lancé, permettant une montée en puissance des problématiques liées aux fonctions et services écosystémiques. Le concept a aussi été utilisé et décliné dans l'ESCo « Rôle, impacts et services issus des élevages en Europe »². Les travaux sur l'agriculture biologique, considérée comme une « forme labellisée » de l'agroécologie, vont être structurés en un nouveau métaprogramme « sur et pour l'agriculture biologique » (voir Encadré 1). Les métaprogrammes SMaCH et GISA ont aussi été très actifs dans le champ de l'agroécologie (santé globale, santé des plantes et des animaux, biocontrôle...)
 - Plus largement, au-delà de l'Inra, les défis 2 et 5 de l'ANR, avec une commission d'évaluation scientifique dédiée sur la « Dynamique des écosystèmes et de leurs

¹ Disponible sur internet à <http://inra.dam.front.pad.brainsonic.com/ressources/afile/228001-a8d94-resource-chantier-agro-ecologie-fevrier-2013-4-pages.html>

² Disponible sur internet à <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/373809-94077-resource-esco-elevage-eu-synthese-en-francais-30-nov.pdf>

composants en vue de leur gestion durable » (ANR, 2015), l'ont aussi largement pris en compte. Elle a aussi été présente dans les projets de certains LabEx (BASC par exemple).

Encadré 1 – Du programme AgriBio au métaprogramme « Pour et sur l'agriculture biologique »

Le programme de recherche interne à l'Inra « AgriBio » a été lancé en 2000 pour développer et promouvoir les recherches en agriculture biologique (AB) dans un double contexte de croissance de l'AB, avec un questionnement affirmé sur les potentialités de son développement en France, et de l'évaluation de ses impacts, en particulier sur la santé humaine. Cette Action Incitative Programmée (AIP) a été reconduite depuis, jusqu'à l'appel AgriBio4 pour la période 2015-2019. A partir de 2019, un nouveau métaprogramme dédié est créé pour succéder au programme AgriBio.

Les perspectives pour l'AB supposent de relever plusieurs défis techniques, économiques, organisationnels, culturels... Au plan scientifique, les questions posées par l'AB permettent d'anticiper et d'organiser la réponse aux enjeux posés par l'émergence d'une agriculture agroécologique dont elle joue le rôle de prototype. Il s'agit de limiter l'utilisation d'intrants, d'accroître les régulations écologiques et l'autonomie des systèmes, d'offrir une alimentation de qualité, de préserver l'environnement et une justice sociale. Une approche globale est donc requise pour relier les différentes dimensions en interaction au sein et autour des systèmes agri-alimentaires et permettre leur transition.

Trois enjeux prioritaires de recherche ont été identifiés :

- Relever les défis techniques et systémiques de la production et de la transformation.
- Maîtriser et améliorer les performances des systèmes agricoles et agri-alimentaires biologiques.
- Décrire et accompagner le développement de l'agriculture biologique.

Depuis son lancement, le programme AgriBio a veillé à rassembler les communautés non dédiées à l'AB dont de nombreux travaux peuvent, plus ou moins directement, s'appliquer à l'AB, en particulier sur la compréhension des processus (par exemple, régulations naturelles) ou le développement de méthodes (par exemple, modélisation).

- Dispositifs expérimentaux :
 - Divers dispositifs expérimentaux (Unités Expérimentales – UE) de l'Inra y contribuent (Epoisses–projet CA-SYS, Grignon, Mirecourt, Gotheron ...), ainsi que l'infrastructure de recherche ANAEE-France (SOERE ACBB, PRO...) et certaines Zones Ateliers (RZA).
- Formation :
 - Une section particulière de l'UVED a été dédiée à l'agroécologie (UVAE), avec la production de MOOC en agroécologie et l'organisation d'une école technique.

Le ministère de l'agriculture, souhaitant impulser l'agroécologie comme levier d'action pour faire évoluer les systèmes agricoles, et conscient des limites de connaissances pour le faire, a sollicité l'Inra pour l'y aider. Un colloque a ainsi été organisé par l'Inra en 2013, sous l'égide du ministère, comprenant des ateliers thématiques animés par des chercheurs et rassemblant de nombreux porteurs d'enjeux du monde agricole. Ce colloque a constitué le point d'orgue de la mise à l'agenda de l'agroécologie pour la recherche et le monde agricole. L'ensemble des travaux a fait l'objet en 2015 d'un numéro spécial de la revue *Innovations Agronomiques*³.

³ N°43 ; <https://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2015/Volume-43-Mars-2015>.

Un domaine scientifique dynamique

Le domaine de l'agroécologie a connu un essor important au cours des 20 dernières années, avec comme caractéristique la poursuite de la coexistence de plusieurs visions, que ce soit en terme de contenu académique, de méthodes de recherche ou d'applications.

Une analyse rapide de la production académique basée sur une analyse bibliométrique réalisée sur le *Web of Science* (WoS) à l'aide d'une requête élaborée et utilisée en routine à l'Inra pour capturer les productions relevant de l'agroécologie (Tchamitchian, 2018) montre une dynamique toujours forte, que ce soit au niveau mondial ou pour l'Inra (Figure 2).

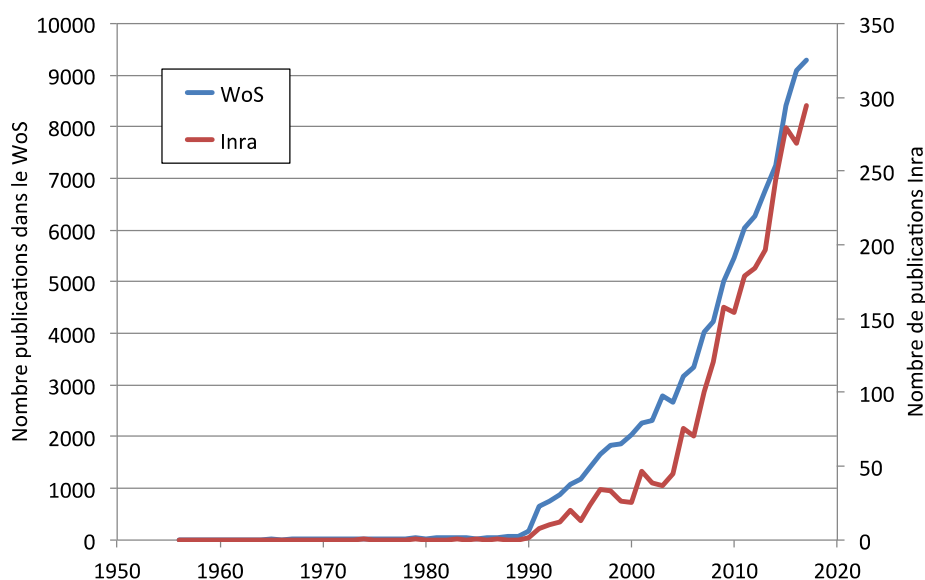


Figure 2. Evolutions au cours du temps du nombre de publications relevant de l'agroécologie pour l'ensemble du WoS et pour l'Inra.

De 1970 à 2012, l'Inra occupait le 4^{ème} rang mondial pour le nombre de publications indexées dans le WoS sur cette problématique derrière l'USDA, l'*University of California* et la *Chinese Academy of Science*. De 2012 à 2018, il occupe le 3^{ème} rang derrière la *Chinese Academy of Science* et l'USDA.

Un contexte sociétal national et international porteur

L'Inra a joué un rôle moteur dans trois des très nombreuses initiatives qui ont vu le jour depuis 2012.

- Le projet agroécologique pour la France

Le projet agroécologique du ministère français en charge de l'agriculture, mis en avant lors du 1^{er} symposium organisé par la FAO en 2014 (voir plus loin), est un projet mobilisateur pour l'agriculture française. Il a eu pour objectif d'encourager les modes de production performants à la fois sur le plan économique et environnemental. Les différentes dimensions de l'exploitation, et au-delà des filières et des territoires, doivent être abordées globalement et de manière articulée. Ce projet agroécologique vise à produire autrement, en repensant les systèmes de production. C'est un changement des pratiques agricoles, mais c'est aussi une autre façon de penser, une mutation progressive mais profonde qui remet l'accent sur la dimension de système, ainsi que sur les échelles larges et les pas de temps long. C'est aussi l'opportunité de revoir la formation ainsi que le conseil agricole.

Par ailleurs, le premier article du Code rural indique depuis le vote de la loi d'Avenir du 13 octobre 2014 : « *Les politiques publiques visent à promouvoir et à pérenniser les systèmes de production agroécologique, dont le mode de production biologique, qui combinent performance économique, sociale, notamment à travers un haut niveau de protection sociale, environnementale et sanitaire. Ces systèmes privilégient l'amélioration de la compétitivité des exploitations agricoles, en maintenant ou en augmentant la rentabilité économique* ».

- *L'avis du Conseil Economique Social et Environnemental (CESE)*

Le Conseil Economique Social et Environnemental s'est saisi de la question de l'agroécologie et a rendu l'avis suivant : « *Discipline scientifique au carrefour de l'agronomie et de l'écologie, l'agroécologie peut, à travers les pratiques qu'elle promeut, contribuer à relever des défis environnementaux et socio-économiques, en transformant l'agriculture pour aller vers des systèmes alimentaires plus durables. A partir d'une analyse des freins et des leviers à son développement, le CESE a formulé un ensemble de préconisations en matière de recherche, de formation, d'adaptation des filières agroalimentaires, de réorientation des politiques publiques pour accompagner les agriculteur.rice.s dans la transition agroécologique* » (Claveirole, 2016).

- *FAO*

L'ambition de promouvoir les systèmes agroécologiques a été portée au niveau international par la FAO qui a organisé en 2014 le 1^{er} Symposium international sur l'agroécologie pour la sécurité alimentaire et la nutrition⁴. Ce symposium a permis de partager des expériences et de construire une base des connaissances sur l'agroécologie. Il a aussi permis de parvenir à un consensus sur les priorités pour l'agroécologie. Il a surtout validé le rôle de la FAO dans la poursuite de la mise en œuvre et la promotion des approches agroécologiques. Ces dernières étaient déjà considérées de longue date par des pays du Sud comme une alternative aux systèmes de production intensifs dominants, car alliant une plus grande autonomie vis-à-vis des intrants, une plus forte productivité par des associations végétales explorant mieux les ressources du sol, et une moindre sensibilité aux bioagresseurs. Le symposium de 2014 a montré que si les pays du Sud s'étaient depuis longtemps emparés de l'agroécologie, celle-ci pouvait aussi constituer une manière de repenser les systèmes agricoles des pays industrialisés. C'est aussi sur cette base qu'une convergence de vue entre l'Inra et le CIRAD a été mise en exergue dans une note commune publiée en 2016 (Soussana et Côte, 2016). La FAO a depuis mis l'agroécologie à son agenda, en organisant des rencontres par région du monde dont les messages ont convergé vers un second colloque, organisé en avril 2018, au cours duquel le PDG de l'Inra est intervenu en tant que représentant des acteurs de la recherche académique, dans la session « Partenariat pour l'initiative de mise à l'échelle de l'agroécologie – Transformer l'alimentation et l'agriculture en appui aux ODD ». L'*Initiative de passage à l'échelle supérieure de l'agroécologie* a été lancée par la FAO à cette occasion⁵. Elle vise à encourager un processus de transition vers l'agroécologie qui soit plus inclusif et holistique, et ce par le biais d'outils et d'un partage du savoir pour une meilleure transformation de la nourriture et des systèmes agricoles. La FAO a par ailleurs mis en place une plateforme web des connaissances sur l'agroécologie⁶.

Ces différentes initiatives ont stimulé la recherche, mais aussi une meilleure articulation entre dispositifs sociétaux et de recherche. L'Inra s'est engagé dans l'étude des mécanismes permettant d'amplifier les régulations biologiques et écologiques dans les agroécosystèmes, en allant jusqu'à poser les bases d'une ingénierie mobilisant ces régulations et évaluant les performances des systèmes

⁴ <http://www.fao.org/3/a-i4327e.pdf>

⁵ <http://www.fao.org/3/I9049FR/i9049fr.pdf>

⁶ <http://www.fao.org/agroecology/fr/>

agroécologiques. Cette ingénierie s'appuie sur la biodiversité et ses fonctions, sur les cycles biogéochimiques en vue de leur bouclage, et sur la gestion des paysages au sein des territoires.

En 2017, des objectifs renouvelés et élargis

L'Inra a jugé important d'approfondir certains des thèmes abordés lors du premier chantier, et d'élargir le champ d'investigation en agroécologie, en lien avec le plan d'action associé au document d'orientation #Inra2025⁷. L'agroécologie a été choisie comme thème pour l'un des quatre chantiers de prospective scientifique interdisciplinaire lancés en 2017. La lettre de mission correspondante est annexée à ce rapport. Ces chantiers ont eu pour vocation de construire la recherche nécessaire pour répondre à de grands défis sociétaux.

Organisation

Six thèmes de travail ont été identifiés. Trois d'entre eux sont des approfondissements du précédent chantier :

- **Valoriser la diversité génétique en sélection végétale et animale.** Il s'agit d'intégrer la variabilité génétique dans la conception des systèmes agroécologiques afin d'alimenter une prospective sur l'évolution nécessaire des schémas de sélection pour les plantes et les animaux.
- **Valoriser les processus écologiques, hydrologiques et biogéochimiques dans des paysages multifonctionnels.** L'agroécologie a beaucoup été abordée à l'échelle de la plante ou d'associations déclinées dans le temps et l'espace. La dimension paysagère apparaît comme une dimension essentielle, incluant la distribution spatiale des éléments du paysage sur et dans le sol (infrastructures vertes), l'organisation spatio-temporelle des assolements et des conduites de cultures (« paysage des pratiques »).
- **Modéliser les interactions biotiques pour une vision et une gestion agro écologique des agroécosystèmes.** Ce thème vise à approfondir la problématique, mais surtout à formuler des recommandations concrètes, notamment pour mieux outiller les acteurs, en relais au séminaire « Nouveaux défis de la modélisation : l'agroécologie » (Garcia *et al.*, 2014).

Les trois autres thèmes sont des thèmes nouveaux, d'élargissement aux enjeux économiques et sociaux, soulignant ainsi que l'agroécologie n'est pas une simple et nouvelle façon de voir l'agronomie, mais qu'elle inclut une reconception des productions agricoles s'inscrivant dans un processus social, avec des dimensions économiques, sociologiques, alimentaires et environnementales.

- **La transition agroécologique de l'exploitation agricole.** Ce thème vise à poser le système en transition comme objet de recherche, et à comprendre et outiller cette transition.
- **L'intégration de l'agroécologie dans les filières.** L'agroécologie privilégie le recours à la diversité, au recyclage, à la recherche des complémentarités, bousculant l'organisation des productions par filières ou s'appuyant sur des filières alternatives portées par des producteurs comme par des consommateurs ou des collectivités territoriales (circuits courts, AMAP ...). Ce thème interroge les modalités d'intégration de l'agroécologie dans une diversité de systèmes agro-alimentaires dans la perspective de la bioéconomie. Il est en lien avec une autre prospective scientifique, le « Nexus santé-alimentation-agriculture-environnement ».
- **Quelle contribution des agroéquipements à l'agroécologie ?** Ce thème interroge la contribution potentielle de la technologie au développement de l'agroécologie.

⁷ <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/367569-9d913-resource-document-d-orientation-inra-2025.pdf>

Méthodes et attendus

Chacun des six thèmes a été traité par un groupe de travail piloté par un animateur et un membre du comité de pilotage, et constitué de représentants des départements concernés. L'objectif était de conduire une réflexion la plus interdisciplinaire possible, s'appuyant sur les travaux déjà lancés. Le calendrier des activités est présenté dans l'encadré 2.

Encadré 2 – Principales étapes de l'ARP Agroécologie

- 17/03/2017 : Lettre de mission
- 05/05/2017 : Réunion de lancement – Première définition du périmètre des GT
- Juin-Septembre 2017 : Travail des GT
- 21-22/09/2017 : Séminaire inter-GT – Transversalités
- Octobre 2017-Mai 2018 : Travail des GT (nouveaux intitulés)
- 21/12/2017 : Réunion du comité de pilotage
- Juin 2018 : Rapports des GT
- 12/07/2018 : Point d'étape CD - Dir MP
- Novembre 2018 : VO Rapport final
- 11/12/2018 : Réunion du comité de pilotage ; réorganisation des contributions des GT ; synthèse des principaux messages : propositions pour la mise en lisibilité des produits de l'ARP
- Janvier 2019 : Rapport final – Résumé exécutif

Les attendus pour chaque groupe de travail concernaient :

- Les avancées scientifiques majeures depuis le premier chantier, les principales pistes de recherche et les verrous méthodologiques et/ou technologiques identifiés.
- Le dispositif de l'Inra, en explicitant les principaux apports des départements et des métaprogrammes, ainsi que des infrastructures ou e-infrastructures.
- Des points de repère sur les principales collaborations européennes et internationales et un parangonnage permettant de repérer les meilleures équipes du domaine.

En complément des travaux menés par chaque groupe de travail, un séminaire regroupant l'ensemble des participants à la prospective a été organisé les 21 et 22 septembre 2017 afin de :

- Faire un point d'étape sur l'avancement du chantier en mobilisant tous les membres des groupes de travail.
- Identifier les ajustements réalisés, les questions en suspens, les points de blocage éventuels.
- Faire émerger/consolider les problématiques aux interfaces et identifier les attentes vis-à-vis des autres groupes.
- Préciser les questions transversales (données, échelles, ...) et commencer à les instruire.
- Recevoir des éclairages extérieurs.
- Faire une consolidation intra-groupe de travail et préciser la feuille de route et les livrables de la prospective.

A l'issue de leurs travaux, les groupes de travail ont produit les éléments permettant de :

- Définir le périmètre de la question traitée, dresser le bilan des avancées scientifiques, en l'illustrant par quelques travaux exemplaires impliquant l'Inra ('*success stories*'), puis définir des priorités scientifiques et méthodologiques.
- Identifier les instruments et outils susceptibles de contribuer à développer les thèmes concernés au sein de l'Inra, avec des partenaires scientifiques nationaux et internationaux, ou des partenaires socio-économiques.

- Elaborer des propositions en terme de compétences à développer, d'animation ou d'instruments collaboratifs et financiers pour soutenir ces recherches au sein et en dehors de l'Institut.

Les six chapitres qui suivent correspondent à la synthèse des contributions des groupes de travail. En accord avec le comité de pilotage de l'ARP, nous les avons réorganisés en commençant par les chapitres les plus intégrateurs et en finissant par ceux plus ciblés sur des « briques constitutives » de l'agroécologie.

Intégration de l'agroécologie dans les filières

Périmètre, bilan et priorités

Périmètre

Une partie des principes de l'agroécologie privilégie le recours à la diversité, qu'elle soit génétique (association de variétés, recherche de rusticité...), spécifique (association de cultures, diversité des espèces élevées ou cultivées) ou fonctionnelle (agroforesterie). La démarche s'appuie aussi sur le recyclage des ressources et sur les recherches de complémentarité entre espèces. La mise en œuvre de ces principes va entraîner une augmentation de la variété et de l'hétérogénéité des produits agricoles et de leur logistique vers un plus grand nombre de secteurs, consommateurs et utilisateurs, respectant les « critères » (déjà définis ou en discussion) liés aux approches agroécologiques dans le système global.

Le fil rouge des travaux du groupe a été le suivant : les conséquences de l'augmentation de la variété et de l'hétérogénéité de la production tout au long de la chaîne allant de la collecte et de la transformation à la mise en marché et à la consommation. Il était important de **ne pas rester dans une approche linéaire** pour bien appréhender les changements du système dans son ensemble vers un monde plus divers/hétérogène. C'est pourquoi pour le groupe il est important de parler plutôt de **système agri-alimentaire que de filière** : la filière, au sens de l'Insee par exemple, désigne couramment l'ensemble des activités complémentaires qui concourent, d'amont en aval, à la réalisation d'un produit fini. Ce qui intéresse ici la réflexion va au-delà d'une approche en silo et vise à reconnecter l'ensemble des acteurs et à envisager le produit finalement consommé dans toutes ses dimensions au travers de différentes actions :

- Reconnecter agriculture-environnement-alimentation et prendre en compte l'ensemble des acteurs du système (producteurs, fournisseurs, transformateurs, consommateurs, associations, pouvoirs publics).
- Changer de paradigme (valoriser la diversité).
- Approcher les transitions et les relations réciproques : du producteur au consommateur et vice-versa (modèle ESR – Efficacité, Substitution, Reconceptualisation ; Hill, 1985).

Sont abordées ici des questions de recherche sur lesquelles des contributions existent déjà (au sein de l'Inra ou en dehors) et d'autres qui sont posées dans le cadre de cette réflexion sur l'agroécologie mais pour lesquelles les réponses peuvent s'appuyer sur des travaux menés dans d'autres cadres, tout en nécessitant de nouvelles investigations. Les entrées privilégiées abordent le système sous différents prismes : (i) qu'est-ce qu'un produit issu de l'agroécologie ? ; (ii) les pratiques des consommateurs, ce qu'elles sont et comment les faire évoluer ; (iii) l'organisation des marchés et l'importance des normes et des standards ; (iv) l'action publique et en particulier la PAC, mais plus largement l'articulation entre politique agricole, politique environnementale et politique de santé ; (v) l'organisation spatiale des marchés, en tenant compte du commerce international ; et (vi) la cohérence du système en tenant compte de l'ensemble des acteurs.

Les avancées scientifiques majeures des 3-5 dernières années

- **Analyse des propriétés des produits**

Ce thème est très vaste. Les travaux menés jusqu'à présent concernent plutôt l'analyse des propriétés des produits issus de l'AB (Bernacchia *et al.*, 2016 ; Średnicka-Tober *et al.*, 2016 ; Cintra *et al.*, 2018) et plus largement de la diversité des formes d'agriculture et leurs conséquences sur l'environnement et la santé des consommateurs (voir par exemple Mie *et al.*, 2017 ; Jones, 2017).

- **Pratiques des consommateurs**

Un lien peut être fait entre les propriétés des produits, les pratiques des consommateurs, leur propension à payer et les instruments à mettre en place pour favoriser le développement de la consommation de ces produits (voir par exemple Hemmerlin *et al.*, 2015 ; Clark *et al.*, 2017). Ainsi, Sörqvist *et al.* (2013) ont montré que les produits « verts » étaient perçus comme ayant de meilleures qualités organoleptiques. Dans une méta-analyse récente, Dolgoplova et Teuber (2018) ont mis en évidence des consentements à payer plus élevés et moins hétérogènes sur la base des attributs « santé » des produits alimentaires.

L'aversion au risque, l'aversion à la perte et l'aversion à l'inégalité font partie des motivations des consommateurs à adhérer à un contrat d'agriculture locale (Bougherara *et al.*, 2017). A noter toutefois que dans les contrats d'agriculture locale seulement certaines formes de diversification sont valorisées (Connolly et Klaiber, 2014).

L'étiquetage constitue un signal important pour l'adoption par les consommateurs comme l'ont montré différents travaux sur l'AB (voir par exemple Asioli *et al.*, 2017 ; Drexler *et al.*, 2018). Enfin, l'analyse de la perception des consommateurs vis-à-vis des produits non-alimentaires comme des biomatériaux, des biomolécules pour la pharmacie, cosmétique, chimie verte, etc. jusqu'à la bio-énergie localement produite et utilisée (méthanisation, villes autonomes en énergie...) est essentielle (Gontard *et al.*, 2018).

- **Organisation des marchés : Importance des normes et des standards**

La mise en place de normes et standards doit favoriser et organiser la relation entre l'agriculteur (et plus largement l'opérateur qui met en marché les produits) et le consommateur. Si les normes ne s'adaptent pas, on peut craindre une augmentation des pertes et des gaspillages.

La certification, les cahiers des charges peuvent établir la confiance en fonction de caractéristiques des produits. Si les pratiques n'ont pas de conséquences sur la qualité intrinsèque des produits, pour le consommateur, le changement de pratiques est un bien de croyance (moins de résidus d'intrants, plus de fibres, plus de vitamines, meilleure texture, meilleur goût...). Une manière de réduire l'asymétrie d'information entre le producteur et le consommateur est d'utiliser la **labellisation** (voir par exemple Bonroy et Constantatos, 2015).

Une deuxième dimension à considérer est celle de l'organisation des filières et notamment leur longueur. Les contrats d'agriculture locale (type AMAP) peuvent être un moyen de valoriser certains types de production en constituant des outils de partage du risque entre producteurs et consommateurs (Sproul *et al.*, 2015).

Les questions juridiques sont aussi importantes pour comprendre les freins à la mise en marché de produits, en particulier dans le cadre '*the Novel Food Law*' de l'Union européenne et les lois concernant les négociations de prix ('*European competition Law*', etc.).

- **Politiques publiques**

Si les questions de certification relèvent de l'action publique de façon générale (et pas uniquement des politiques publiques), l'introduction de nouveaux modes de production dans les filières est aussi prise en compte dans les travaux menés sur les politiques publiques, notamment sur le verdissement de la PAC, ou sur les politiques environnementales (Directive « eau » par exemple). Des travaux conséquents sur les paiements pour services environnementaux (PSE) viennent alimenter le débat : (i) distinguer les services fournis à l'agriculteur (il n'y a pas de raison de les payer) des services fournis à la société (une rémunération peut être justifiée) ; (ii) comment rémunérer au-delà du coût d'opportunité de l'action mise en œuvre ? ; et (iii) comment développer différentes formes de rémunération, via un soutien public et/ou via le marché ? (voir par exemple Tacconi, 2012 ; Duval *et al.*, 2016 ; Etrillard, 2015, 2016).

Les relations entre sécurité/souveraineté alimentaire, notamment dans les pays du Sud méritent une attention particulière. Les travaux d'AgriMonde-Terra contribuent à cette réflexion.

- **Organisation des marchés – dimension territoriale/internationale**

L'organisation des marchés dans l'espace a pour l'instant été abordée par le prisme de 2 questions : (i) les mécanismes de localisation des différents maillons de la chaîne (production, transformation, consommation), formes de concentration/dispersion selon les contraintes d'accès aux marchés mais aussi certaines contraintes environnementales (voir par exemple Handayati *et al.*, 2015 ; Marette, 2016) ; et (ii) les conséquences des décisions européennes sur le développement des pratiques, notamment agroécologiques, sur les pays tiers (voir par exemple Boysen *et al.*, 2016).

- **Cohérence du système**

La compréhension des relations entre les acteurs qui « font système » constitue le dernier angle d'analyse important, en particulier en ce qui concerne la connaissance des sources de la valeur (économique, environnementale, sociale), son évaluation et la compréhension de sa répartition. Plus précisément, sont développés, notamment sur l'AB, des travaux sur les analyses multicritères de la durabilité des systèmes et sur les pouvoirs du marché (voir par exemple Suder et Kahraman, 2018).

Quelques 'success stories' impliquant l'Inra

- **Circuits courts et développement de marque : Ici.C.Local⁸.**

Il s'agit d'un projet de recherche qui est parti de l'analyse de l'organisation des circuits courts pour aller jusqu'à la mise en place d'une marque, déposée en 2014 à l'INPI. Ici.C.Local est une démarche innovante et simple d'utilisation, qui consiste à signaler les produits en circuits courts dans les lieux de vente au détail (Chiffolleau *et al.*, 2016). Elle peut être utilisée par tous les acteurs économiques des circuits courts : commerçants, artisans, agriculteurs, producteurs-transformateurs.



- **Projet FEDER « REBECCA » (REcherche Biomasse-Energie Canne à CApesterre).**

Afin de contribuer aux objectifs ambitieux de la Guadeloupe en matière de transition énergétique, les chercheurs de l'Inra, avec le CIRAD et le partenaire industriel Quadran, ont mené un travail prospectif autour d'un projet portant sur le dimensionnement d'une filière biomasse-énergie durable et d'une unité pilote de production électrique en Guadeloupe, et l'identification des conditions d'émergence d'une filière agro-industrielle de production d'électricité à partir de biomasse issue de variétés fibreuses de canne cultivées

⁸ [http://www.sad.inra.fr/Partenariat-innovation/Ici.C.Local-Valoriser-les-circuits-courts-dans-les-territoires/Ici.C.Local-une-demarche-innovante-protgee-par-une-marque/\(key\)/0](http://www.sad.inra.fr/Partenariat-innovation/Ici.C.Local-Valoriser-les-circuits-courts-dans-les-territoires/Ici.C.Local-une-demarche-innovante-protgee-par-une-marque/(key)/0).

localement. Afin d'éclairer les choix des décideurs de la politique régionale, l'étude a fourni des réponses précises sur plusieurs paramètres : modalités de culture, conditions de rémunération et accompagnement des agriculteurs, dimension et localisation de la centrale électrique et bilan environnemental (Sierra *et al.*, 2016). Basé sur des scénarios territorialisés de déploiement de systèmes de culture climato-intelligents intégrant une diversité de types d'exploitation et de problématiques territoriales (énergie, eau, déchets), le projet a permis de répondre aux attentes d'une diversité d'acteurs et de filières. Un projet de création d'une centrale électrique de 12 MW est actuellement porté par l'industriel partenaire du projet.

- **Projet Européen NOAW 'No Agricultural Waste' (coordination N. Gontard, Inra)⁹.**

L'objectif du projet NoAW (*Innovative approaches to turn agricultural waste into ecological and economic assets* – Approches innovantes pour convertir les déchets agricoles en atouts économiques et écologiques) est de générer des approches innovantes pour valoriser les déchets et coproduits agricoles et les convertir en produits (bioénergie, biofertilisants, biomatériaux...) efficaces et éco-performants avec des avantages directs pour l'environnement, l'économie et la consommation au sein de l'UE. Pour atteindre cet objectif, le concept de NoAW repose sur un raisonnement global autour du cycle de vie, à la lumière d'une part des spécificités territoriales et saisonnières, et d'autre part des risques émergents propres à l'économie circulaire (par exemple la diffusion et l'accumulation des contaminants au cours du recyclage ; Gontard *et al.*, 2018). Dans un objectif de « zéro déchets », le projet ambitionne le développement d'innovations en matière de conversion des agro-déchets à différents niveaux de TRL en mobilisant certains des leviers de l'agroécologie. Il a déjà généré un certain nombre de résultats intéressants, comme pour la production de PHA, de biofertilisants, de sources d'énergie renouvelables, ou bien encore des concepts de business variés (voir par exemple David *et al.*, 2019).



- **Projet Européen TRAF00N¹⁰.**

Au sein de l'Union Européenne, les PME du secteur agroalimentaire subissent la pression croissante de l'ouverture des marchés, une demande accrue des consommateurs pour des produits alimentaires standardisés à des prix compétitifs, une croissance importante des grands distributeurs et la nécessité de se conformer aux règles gouvernementales. TRAF00N (*Traditional Food Network to improve the transfer of knowledge for innovation*) a lancé un réseau de transfert de connaissances dès 2013 afin de soutenir les PME d'aliments traditionnels, et plus particulièrement les produits alimentaires – bio et locaux – faits à base de céréales, poissons, fruits, olives, légumes et champignons. Le réseau TRAF00N met en contact des chercheurs, des experts dans le transfert de connaissances et des associations de PME de 14 pays Européens afin de favoriser le transfert durable de l'innovation et de l'entrepreneuriat dans le secteur agroalimentaire au bénéfice des régions Européennes et de leurs consommateurs. Ce projet a fortement stimulé l'interaction entre les PME d'aliments traditionnels, les associations de PME et les instituts de recherche afin d'augmenter le transfert de connaissances vers les PME mais aussi d'identifier et de mener à bien les recherches utiles aux PME agroalimentaires. TRAF00N a analysé les besoins des PME dans toute l'Europe et a informé ces dernières des innovations disponibles avec des démonstrations demandées – et des journées de formation adaptées – par exemple dans le domaine du blé dur à Montpellier.



Priorités scientifiques – fronts de science – priorités méthodologiques

- **Analyse des propriétés des produits issus de l'agroécologie**

L'analyse des propriétés des produits issus de l'agroécologie cherche à répondre aux questions générales suivantes : au cœur des systèmes agri-alimentaires, des produits pourraient-ils être « agroécologiques » ? Quels sont les impacts des pratiques sur les produits ? Quelles sont les conséquences pour les phases de transformation ?

⁹ <http://noaw2020.eu>

¹⁰ <https://www.trafoon.eu>

Elles se déclinent elles-mêmes en une série de questions de recherche plus précises :

- o Produits issus de l'agroécologie : de quoi parle-t-on ? Quels impacts sur les produits (dont nutritionnel) ? Quels indicateurs ?
- o Quelles propriétés pour quels produits (innovation/production/transformation) et pour quel niveau de transformation (non-transformé/stocké/emballé jusqu'à l'ultra-transformé) ?
- o Quelles approches technologiques existantes ou nouvelles ?
- o Différentes options : mélanger pour homogénéiser OU spécialiser pour de nouvelles sources de valeurs (en termes de caractéristiques des produits eux-mêmes ou de leur contexte de production) ?
- o Bioéconomie/agroécologie : comment prendre en compte les coproduits, vers une utilisation optimale des ressources renouvelables ? Peut-on augmenter la ressource en carbone ?

Ce thème autour de la qualification des produits issus de l'agroécologie et des enjeux de transformation est très vaste et mérite d'être retravaillé. Il emmène jusqu'aux questions de coproduits et de relations entre agroécologie et bioéconomie (incluant l'économie circulaire visant une réutilisation des produits partiellement consommés ou utilisés), un sujet en soi dont le groupe ne s'est pas vraiment emparé. On peut toutefois légitimement se demander si ces questions appellent des développements particuliers sur les produits issus de l'agroécologie. En effet, certaines sont déjà abordées dans le contexte de l'AB et plus largement dans celui de la diversité des formes d'agriculture.

• **Pratiques des consommateurs**

Dans la mesure où les conséquences des pratiques agroécologiques sur les produits seraient précisées, un lien pourrait être fait avec les pratiques des consommateurs :

- o Propension à payer : certaines caractéristiques liées à l'agroécologie (environnementales, local/pas local, *packaging*) font-elles l'objet d'un consentement à payer particulier ?
- o Motivations des consommateurs à adhérer à un contrat d'agriculture locale « agroécologique ».
- o Étiquetage comme signal important pour l'adoption par les consommateurs. Les travaux sur l'étiquetage nutritionnel pourraient être mobilisés¹¹.
- o Augmentation de la diversité de l'offre et préférence hétérogène. Quel doit être le bon positionnement du produit (standard minimum/marque de distributeur...) ?
- o Le rôle des consommateurs dans les approches agroécologiques (comme producteurs, transformateurs à la maison...).
- o La perception des consommateurs vis-à-vis des produits non-alimentaires issus de l'agroécologie. Les questions soulevées concernent les labels à développer, les modalités de communication ou de formation, etc., pour avoir une participation des consommateurs/utilisateurs¹².

Contrairement à la priorité précédente, il y a déjà quelques travaux qui abordent explicitement la question de produits qui pourraient être considérés comme « agroécologiques ». Là encore, il y a un potentiel important dans des travaux menés par exemple sur les produits AB ou « bleu/blanc/cœur », dans différents contextes (produits locaux, avec un contenu « environnemental » ou « bon pour la santé ». Des liens pourraient aussi être faits avec les travaux sur l'étiquetage nutritionnel. On pourrait aussi mobiliser les réflexions engagées dans les projets de LIT/TIGA (par exemple *Ouesterel* ou *Dijon*,

¹¹ Voir <http://alimentation-sante.org/wp-content/uploads/2017/03/Rapport-CS-définitif-14-mars.pdf>

¹² Voir par exemple <https://www.hohenlohe.de/Typisch/Naturparadies-Hohenlohe/Gruener-Sueden/Bioenergiedoerfer-in-Hohenlohe.html>

territoire modèle du système alimentaire durable de 2030) sur l'étiquetage et le consentement à payer des consommateurs.

- **Organisation des marchés : Importance des normes et des standards**

Cette fois encore, les travaux menés sur l'AB peuvent être mobilisés : la certification en AB est une solution de valorisation en pratique. Cependant, l'agroécologie n'est pas une forme dérivée ou synonyme de l'AB. Il est donc important de développer des travaux propres sur la certification et les normes agroécologiques et à la coévolution des deux modèles, qui prennent en compte toutes les activités jusqu'à la consommation et à l'utilisation des produits finaux.

- **Politiques publiques**

Dans les travaux sur le verdissement de la PAC, l'agroécologie est centrale. L'Inra est bien outillé et est un acteur important de la recherche sur ce thème. Ces questions du verdissement de la PAC font d'ailleurs l'objet d'une réflexion du groupe de travail Inra sur le devenir de la PAC.

Les liens à l'alimentation et à la santé (et aux politiques consacrées) demandent à être renforcés. Il sera intéressant de prendre en compte les conséquences des approches d'économie circulaire pour réutiliser intelligemment les ressources localement et/ou plus globalement. Les dimensions spatiales et temporelles des flux de matière méritent des réflexions scientifiques pour comprendre les avantages et désavantages d'utilisation des produits issus de l'agroécologie. Le lien entre agroécologie dans les filières et politique alimentation-santé pourrait être plus développé. Il est important de connecter ces réflexions avec celles menées dans la prospective « Nexus » et dans la réflexion Inra-Irstea en cours sur la bioéconomie.

- **Organisation des marchés – dimension territoriale/internationale**

Ce point demande à être mieux documenté, en abordant notamment les questions suivantes :

- o Impacts environnementaux de la localisation des activités : quid du développement des pratiques agroécologiques ou des approches économiques circulaires localisées ?
- o Implications de décisions agroécologiques françaises sur les autres pays via les marchés, en abordant notamment la notion de « fuite » (bien connue dans la littérature consacrée au changement climatique).
- o Implications sur un multi-usage des produits et coproduits pour des marchés divers.

L'idée est d'introduire la question de l'organisation des activités à l'échelle régionale mais aussi internationale. Est-ce que le développement de pratiques agroécologiques peut conduire à une réorganisation des filières et/ou des marchés ? On retrouve ici indirectement l'importance d'une réflexion autour de la bioéconomie et d'un focus sur une approche « systémique ».

- **Cohérence du système**

Les priorités dans ce domaine concernent l'application de l'analyse multicritères pour étudier la durabilité des systèmes sous différents aspects (économique, environnementale, sociale...). Mais il est aussi nécessaire d'étudier comment vont s'articuler les systèmes agroécologiques, avec d'un côté les systèmes conventionnels et de l'autre les systèmes AB et les autres. Les questionnements s'organisent autour des points suivants :

- o Sur qui porte l'effort de la réduction des pressions sur le milieu ? L'agriculteur ne doit pas être l'unique support de l'effort et les acteurs, dans une approche « circulaire », sont tous impactés et parties prenantes pour trouver des solutions pertinentes.
- o Organisation et impact de l'amont : quel verrouillage des systèmes par l'amont ?

- Les processus écologiques pour conserver, transformer, transporter et utiliser les ressources et la biomasse.
- Comment imaginer des systèmes mixtes (produits issus de pratiques agroécologiques et issus de productions « conventionnelles ») ? De quelle manière ces systèmes peuvent-ils évoluer dans le temps ?

Les **priorités méthodologiques** nécessaires pour la mise en œuvre des priorités scientifiques concernent :

L'acquisition, la gestion et l'analyse des données (à la fois à l'échelle micro – individu, produit, entreprise – et macro – régions, pays, grandes régions du monde).

La construction de référentiels, qui nécessite (i) un travail méthodologique sur les indicateurs à suivre pour qualifier des pratiques agroécologiques et les produits issus de celles-ci ; et (ii) la construction et le suivi de bases d'informations, tant sur la qualité des produits que sur la consommation des ménages.

La modélisation, au travers de plusieurs grandes familles de modèles de systèmes agri-alimentaires pour évaluer l'intégration des pratiques agroécologiques : (i) ACV et analyses multicritères pour l'évaluation de leur durabilité ; (ii) modèles mondiaux pour comprendre les répercussions à l'échelle de grandes régions (par exemple, GlobAgri Agt) ; et (iii) approches systèmes complexes et possiblement approches de théorie des jeux ('*game theories*').

Les études de cas. Elles seront primordiales pour bien comprendre la diversité des systèmes, leurs contraintes, l'hétérogénéité des ressources, des produits, des acteurs, des marchés, etc.

La mise en place et la gestion de plateformes/centres d'expérimentation pour faire des **démonstrations** et promouvoir des activités participatives avec des acteurs divers. Les dispositifs expérimentaux de l'Inra peuvent être mis en avant pour démontrer des cas, des options, tester des idées créatives avec des acteurs divers, notamment dans des systèmes incluant les citoyens (comme consommateurs, acteurs et/ou utilisateurs).

Les cadres de travail et partenariats

Les apports des départements et des métaprogrammes

• **Départements**

Si la question de l'organisation des filières pose des questions majeures aux SHS (SAE2 et SAD), les départements qui s'intéressent à la transformation des produits (CEPIA) et à l'agronomie (EA) sont eux-aussi très largement concernés par l'angle d'attaque « pratiques et produits issus de l'agroécologie dans les filières agri-alimentaires et agri-bio-produits non-alimentaires ».

La qualification des produits et leurs transformations mobilisent des ressources de CEPIA. On peut se demander si les travaux de recherche sur les produits issus de l'agroécologie et sur les produits de l'AB diffèrent significativement. On retrouve l'ensemble des problématiques autour du *downscaling* des procédés de transformation, celles de l'hétérogénéité des produits en bout de parcelle, les écoprocédés en cascade pour valoriser la diversité des coproduits, la modélisation multicritère, la notion et l'analyse de la qualité des produits finaux...

Dans le cas des départements SAE2 et SAD, il s'agit essentiellement d'analyser les comportements des acteurs (producteurs, consommateurs, institutionnels...) dans les filières et les territoires, et

d'analyser le développement de filières de niche porté par les producteurs, les consommateurs (ou les distributeurs comme Carrefour) et les collectivités territoriales (cantines).

Ces travaux (sur la transformation comme sur les acteurs) doivent se faire en collaboration avec les chercheurs du département EA qui travaillent sur les pratiques et qui mettent en particulier l'impact environnemental en avant. La problématisation des produits animaux issus d'élevages herbagers et pastoraux et de la santé animale (avec la réduction des antibiotiques, et l'étiquetage correspondant) est un défi qui doit mieux être pris en compte.

- **Métaprogrammes**

Les métaprogrammes concernés sont EcoServ, notamment sur les questions de paiements pour services environnementaux, et GloFoods sur les questions d'organisation des filières et de sécurité alimentaire et nutritionnelle, à différentes échelles, notamment internationale mais aussi locale dans des pays en développement.

Bien sûr, le futur métaprogramme sur l'AB portera une grande partie des questions, au moins sous l'angle des produits certifiés AB. La différence fondamentale actuelle entre les produits agroécologiques et AB réside dans l'existence d'un cahier des charges (et d'une certification) dans un cas, alors que tout est à construire dans l'autre. Au-delà de cette différence, qui amène des questions spécifiques pour les produits agroécologiques, il sera important de traiter les questions des relations (coévolution) des deux modèles. Le développement de travaux de recherche dans la perspective de systèmes en AB représentant 25-30% des systèmes agricoles va devoir se poser la question de l'articulation entre les deux modèles, des impacts du développement des uns sur les autres...

Outils et infrastructures mobilisés ou à développer

Les différents outils déjà présentés pour suivre et évaluer les pratiques agroécologiques et qui pourront être mobilisés pour la construction de référentiels ne sont pas rappelés ici. Pour réfléchir à l'intégration des produits dans les filières, différents verrous sont à lever :

- Etablir la connexion entre les informations sur les pratiques agricoles, les produits – et leur transformation dans un contexte local – et celles sur les pratiques de consommation.
- Comment repérer dans les outils disponibles sur le suivi des pratiques de consommation (type Kantar) des produits issus de pratiques agroécologiques (type 'cuisines expérimentales territorialisées' comme *living labs*) ?
- Une meilleure connexion entre les données agronomiques (agricoles) et industrielles (transformation, logistique), concernant en particulier les dimensions environnementales, santé et sécurité sanitaire, et les conditions socio-économiques locales.
- Un meilleur suivi de l'impact d'une approche Agroécologie – Bioéconomie via un cadre et des indicateurs existants et nouveaux.

Les réflexions menées pour le développement de la bioéconomie sont aussi mobilisables, par exemple en ce qui concerne l'analyse des systèmes complexes, avec un besoin de découplage des filières et d'analyse à l'échelle de territoires pertinents (et qui peuvent être différents selon les questions posées)¹³. La modélisation (type AgriMonde Terra) pourra aussi être mise à contribution pour discuter des impacts, notamment sur la sécurité alimentaire, du développement des pratiques agroécologiques à l'échelle de grandes régions. Enfin, il conviendra aussi de mobiliser la plateforme

¹³ Voir notamment les réflexions menées lors du séminaire de 2017 sur le développement de la bioéconomie : https://colloque.inra.fr/bioeconomy2017/content/download/3808/41065/version/2/file/extended-EPP-European_bioeconomy.pdf

MEANS pour l'analyse multicritère de la durabilité des systèmes agroalimentaires, avec un couplage avec des plateformes de vérification et de développement des systèmes innovants.

Partenariats académiques nationaux et internationaux

Ce sujet est clairement un enjeu dans le rapprochement Inra-Irstea autour du pôle ELSA et des réflexions conjointes sur la bioéconomie (voir séminaire et note co-signée en 2017 ; réflexion Bioéconomie en cours).

Des collaborations avec le CIRAD existent, notamment dans le cadre d'AgriMonde Terra, et avec l'IRD en particulier dans la région Méditerranée.

Le groupe de travail n'en a pas eu l'opportunité, mais il serait important de faire un travail de repérage des équipes (notamment du CNRS) qui travaillent sur l'écologie industrielle. Il pourrait être aussi utile de partir des réflexions menées dans le cadre des projets ANR ARPEGE et CONFLUENT et du projet européen NOAW¹⁴.

Au niveau européen, le LUKE (Finlande), qui embarque des questions de systèmes alimentaires innovants et de bioéconomie, et le WUR sont déjà des partenaires de l'Inra (notamment avec les économistes). D'autres partenaires, avérés ou potentiels, existent en Allemagne (Universités de Hohenheim, de Munich et VTi), et en Italie (Universités de Bologne, Vérone et Rome – plutôt pour les questions sur la transformation et la bioéconomie). D'autres partenaires peuvent être identifiés selon les questions en Hongrie, Grèce, en Suède ... Enfin au niveau international, l'équipe de Stephen Gliessman à l'*University of California Santa Cruz* est sûrement un partenaire à considérer pour ses travaux sur les relations entre pratiques agroécologiques et systèmes alimentaires durables.

Partenariats socio-économiques et de transfert pour l'innovation

La construction de référentiels et de normes devra se faire en partenariat avec les acteurs des filières. Les TIGA seront des outils qui pourront être utilement mobilisés pour ce faire. Deux projets ont retenu l'attention du groupe de travail à ce stade : (i) Ouesterel qui travaille sur la construction d'un label « bien-être animal » pour valoriser les pratiques d'élevages respectueuses de celui-ci ; et (ii) Dijon, territoire modèle du « Système alimentaire durable 2030 ».

Dans le domaine de l'écologie industrielle, des partenariats avec APESA (Pau), LBE-Transfert, Sofies (Lausanne), Innoven (Verone), GrapSud, Improve (pôle IAR, mais actuellement toujours centré sur les grands filières) ou BioVallée (proche de Toulouse) sont à explorer¹⁵.

¹⁴ Voir aussi : <https://www.theses.fr/2016INPT0066>

¹⁵ L. Montastruc a souligné l'existence d'environ 40 initiatives en France.

Transition agroécologique de l'exploitation agricole

Périmètre, bilan et priorités

Périmètre

- **Une transition à l'échelle de la société**

La transition agroécologique est une transformation systémique de notre agriculture et de notre alimentation (Duru *et al.*, 2015). Elle appelle à des changements de pratiques ainsi que des valeurs qui les régissent pour une diversité d'acteurs. Elle nécessite donc des « structures sociétales et interactions nouvelles qui supposent des changements de valeurs et de comportements » (OECD, 2010), d'autant plus que nos '*agricultural practices are not primarily determined by agronomic or ecological science, but by markets, regulations and agricultural support programs*' (Weiner, 2017). Précisons qu'il s'agit d'une transition en train de se faire ('*transition in the making*') au sein de notre régime capitaliste et non d'une révolution puisque les principes capitalistes sous-jacents ne sont pas systématiquement remis en cause (Brown *et al.*, 2012 ; Hinrichs, 2014).

- **Une pluralité de modèles pour une transition qui se construit chemin faisant**

Cette transition agroécologique se caractérise par une incertitude sur l'issue finale (Lubello *et al.*, 2017). Cette incertitude est renforcée par la diversité de modèles qui se mettent en place : modèles de production, d'exploitation agricole (incluant les '*farming styles*' et les profils de collectifs de travail), ou bien encore modèles prenant en considération le lien à l'aval et au consommateur (Dedieu *et al.*, 2006 ; Van der Ploeg *et al.* 2009 ; Therond *et al.*, 2017 ; Plumecocq *et al.*, 2018).

- **Peu de travaux de recherche sur la transition de l'exploitation agricole**

Les analyses sous l'angle de la transition des problématiques agricoles portent sur les échelles du territoire (Bui *et al.*, 2016) ou du secteur d'activité (Elzen *et al.*, 2011 ; Magrini *et al.*, 2016). L'exploitation agricole, pourtant centrale, est négligée (Chantre *et al.*, 2014). La transition agroécologique de l'exploitation agricole (TAEA) met en jeu un processus, incrémental ou de rupture, par lequel les principes qui régissent la conduite d'une exploitation agricole sont modifiés de façon radicale (Magrini *et al.*, sous presse). La dimension agroécologique de cette transition repose sur l'adaptation au contexte local des principes de l'agroécologie¹⁶ et la mise en œuvre d'une gestion adaptative d'un agroécosystème complexe associé à des niveaux d'incertitudes élevés.

- **Poser la question du changement pour comprendre et outiller cette transition**

La TAEA pose la question du « changement » et notamment de :

- L'engagement et la persévérance (motivation, apprentissage, gestion du risque...).
- La confrontation à des verrous techniques, cognitifs, organisationnels, idéologiques et liés au travail, en relation avec l'environnement sociotechnique et socio-écologique de la ferme.
- La redéfinition de ce qui a de la valeur (types de performances ; propriétés attendues) et de ce qui aide au pilotage (informations, seuils d'intervention).

¹⁶ <http://ag-transition.org/2223/agroecology-principles-and-practices/>

- La co-conception avec les agriculteurs pour accompagner les changements de leurs modes de raisonnement.
- L'évaluation *ex ante*, *ex post*, ou chemin faisant (*in itinere*).

La mise en œuvre de l'agroécologie nécessite un changement de modes de raisonnement pour piloter l'agrosystème sur la base des processus écosystémiques. Ces modes de raisonnement sont très différents de ceux basés sur la transformation d'intrants en produits agricoles. De plus, les solutions deviennent singulières via une adaptation du système de production à son contexte de production et en intégrant l'incertitude (connaissances incomplètes, effet des actions). Il en résulte que la visée et la trajectoire de la transition agroécologique d'une exploitation agricole se raisonnent localement et chemin faisant. **Cette configuration modifie la situation de conseil et par suite l'organisation même du conseil agricole.**

L'enjeu pour la recherche est alors de comprendre et d'outiller cette transition. Si aujourd'hui le changement est surtout pensé par les chercheurs en termes de modélisation de la décision et d'adoption d'innovations technologiques, la TAEA nous invite à produire les connaissances nécessaires pour analyser et accompagner (*'in the making'*) les changements techniques, organisationnels et les modes de raisonnement des acteurs qu'elle implique (agriculteurs, conseillers, formateurs...) lors de la reconception des systèmes et dans le processus de changement.

Les avancées scientifiques majeures des 3-5 dernières années

- ***L'importance du contexte sociotechnique et de son déverrouillage***

Dans les travaux conduits sur la transition, l'exploitation agricole est considérée comme enchâssée dans un système sociotechnique et un système de développement agricole. Sa transition agroécologique passe donc par une reconfiguration de ce système sociotechnique (Ricci *et al.*, 2011) ou agri-alimentaire (territorial ; Bui *et al.*, 2016). Cependant, ces systèmes ancrés dans le « régime dominant » résistent (Geels, 2004). Leur « verrouillage », fait de traditions et de multiples interdépendances entre les composantes techniques et sociales du système qui se sont renforcées au fil du temps, limite la créativité des acteurs (Vanloqueren et Baret, 2009). Lever un tel verrouillage nécessite une approche systémique pour raisonner l'innovation aux différents niveaux qu'elle engage (Ricci *et al.*, 2011 ; Meynard *et al.*, 2015, 2017). Par exemple, adopter une nouvelle culture vertueuse dans une rotation nécessite de penser sa valorisation ainsi que l'accompagnement à sa maîtrise technique. L'approche multi-niveaux développée par Geels (2004) et déclinée au secteur agricole ces dernières années (Magrini *et al.*, 2016) offre un cadre d'analyse pour penser le déverrouillage et favoriser l'innovation.

- ***De nouveaux objets de gestion au cœur de la TAEA***

L'étude des trajectoires de transition agroécologique met en exergue de nouveaux objets de gestion (Coquil *et al.*, 2014a), dont l'identification et l'explicitation sont nécessaires, de façon à produire de nouvelles ressources pour outiller la transition. Ces objets sont la santé (des plantes, des animaux et des écosystèmes) – par différence avec les maladies ; l'intégration des activités dans des systèmes diversifiés (cultures et élevage, maraîchage et arboriculture, ovins – bovins, agroforesterie etc.) ; l'agrobiodiversité (Martin et Magne, 2015) ; le rôle des infrastructures écologiques et les interfaces agriculture – bois. Ces changements façonnent également des propriétés attendues des systèmes agricoles complexes comme la résilience, l'efficacité, l'autonomie et des conditions de vie au travail favorables au développement des personnes. Ces objets renvoient dans certains cas à des propositions de chercheurs de disciplines biotechniques quant aux piliers des systèmes agroécologiques (voir par exemple Dumont *et al.*, 2014), sauf qu'il s'agit ici de les aborder comme des objets de gestion et de travail.

- **L'innovation technologique utile à la TAEA**

L'innovation technologique, si elle n'est pas moteur de la transition, n'en est pas moins un élément majeur, notamment :

- o **La sélection végétale ou animale**, permettant de fournir des services écosystémiques (par exemple, structuration ou couverture du sol, utilisation des races locales – projet EcoServ SECOYA, ...) et valorisant la diversité génétique de façon à favoriser la robustesse des systèmes (cf. les autres thèmes de la prospective).
- o **La robotique**, qui peut favoriser la culture de certaines plantes de diversification (par exemple, désherbage de cultures peu couvrantes), ou libérer du temps de travail des agriculteurs sur des activités laborieuses, et ainsi accroître leur investissement sur d'autres tâches. L'agriculture est d'ailleurs devenue le second marché de la robotique de service professionnelle (Bellon-Maurel et Huyghe, 2016).
- o **Les technologies de la communication et de l'information**, qui peuvent elles-aussi favoriser la TAEA en offrant de nouvelles façon de gérer les connaissances comme par exemple l'application GECO (Trouche *et al.*, 2017) qui permet à des agriculteurs de formaliser des connaissances et de les rendre disponibles ou de les discuter au sein d'une communauté plus large.

- **Le partage d'expériences, moteur de la TAEA**

La TAEA implique que l'agriculteur mobilise et développe ses **capacités d'apprentissage** pour des pratiques mal connues et en rupture avec le système dominant (Darnhofer *et al.*, 2010 ; Marshall *et al.*, 2014). Il conçoit et teste des pratiques alternatives en situation pour en tirer des enseignements (Chantre *et al.*, 2014). L'agriculteur crée alors de nouvelles normes et références professionnelles (Meynard, 2017). Cela se fait souvent au sein de collectifs de pairs, accompagnés ou non de conseillers/animateurs (Coquil *et al.*, 2014b ; Chantre *et al.*, 2014). Ces groupes d'échanges facilitent la créativité, l'apprentissage, la réassurance face aux incertitudes, la construction d'un nouveau référentiel d'action mais aussi la réflexivité et l'appropriation de nouvelles valeurs (Lamine, 2011 ; Plumecocq *et al.*, 2018). Ils créent un régime de connaissance basé sur les échanges entre '*all relevant knowledge producers and stakeholders, including the farmers*'.

- **De l'action collective à la capacité d'action individuelle**

Les travaux conduits sur le déverrouillage sociotechnique et l'apprentissage social se sont focalisés sur la dimension collective de la TAEA. Certains auteurs pointent désormais la nécessité de travailler sur le passage à l'acte de l'individu : la transformation de l'exploitation. L'aide à la décision par des processus d'optimisation, qui demeure une approche dominante en sciences agronomiques, s'accorde mal avec l'accompagnement d'un changement radical et singulier entrepris par les agriculteurs engagés dans une TAEA. Les concepts de '*holon*' (un tout et une partie ; Bland et Bell, 2007) ou '*d'agency*' (Wibler, 2001) ou les approches relationnelles (Darnhofer *et al.*, 2016) ouvrent de nouvelles approches sur la **capacité d'action** vue comme une interaction entre la rationalité de l'acteur, ses valeurs et les opportunités et résistances offertes par l'environnement. Cette capacité d'action s'accompagne d'une capacité adaptative définie comme l'aptitude à concevoir et mettre en œuvre des adaptations ou des changements et à gérer de nouvelles situations sans compromettre d'options pour le futur (Nelson *et al.*, 2007 ; Marshall *et al.*, 2014).

Outre les travaux conduits en économie sur la conversion à l'AB (Dupraz *et al.*, 2003 ; Knowler et Bradshaw, 2007 ; Latruffe et Nauges, 2014), des travaux récents s'intéressent aux motivations des agriculteurs à s'engager dans la TAEA (Lusson *et al.*, 2014 ; Cayre *et al.*, 2018 ; Plumecocq *et al.*, 2018). Celles-ci apparaissent autant extrinsèques (opportunités liées à une demande du marché...)

qu'intrinsèques (volonté de respecter la Nature ; Plumecocq *et al.*, 2018). La perception du risque vient moduler ces motivations (Bouttes *et al.*, 2018a). Or, la TAEA apparaît risquée car incertaine et complexe (Duru *et al.*, 2015). Pour se lancer, les agriculteurs évaluent les compromis entre les facteurs externes tels que les exigences de qualité des produits, les réglementations et les prix, et les exigences internes, tels que les risques liés aux nouvelles techniques de production (Lamine, 2011 ; Chantre et Cardona, 2014 ; Bouttes *et al.*, 2018b).

- **Un cadre conceptuel pour articuler différentes approches de la TAEA**

La TAEA pose des problèmes méthodologiques car il s'agit de rendre compte pour la gérer de la dynamique d'un système complexe dans un environnement changeant, avec une forte incertitude. Cette incertitude est constitutive d'une activité stratégique se projetant dans le futur. Elle est inhérente au fonctionnement des systèmes complexes et à leurs propriétés émergentes. Elle est également pour partie liée à l'incomplétude des connaissances. Si elle peut apparaître comme irréductible, elle n'entrave pourtant pas l'action. La gestion de cette incertitude invite à adopter des approches interdisciplinaires, engageant chercheurs et acteurs de terrain dans une co-production de connaissances sur ces situations problématiques. Différentes postures de recherche coexistent :

- Recherche-action : participer à la transformation pour comprendre.
- Analyse des transitions sociotechniques : observer et analyser les transitions ayant eu lieu ou en cours.
- Modélisation et jeux sérieux : représentation des exploitations agricoles et exploration de leurs évolutions, explicitations des rationalités et tests de nouveaux agencements pratiques.

Martin *et al.* (2018) proposent un cadre conceptuel que nous reprenons dans nos propositions pour articuler ces trois types d'approches scientifiques de la TAEA et produire une compréhension des transitions plus complète et utile pour concevoir leurs modes d'accompagnement par les politiques publiques ou les praticiens (Figure 1).

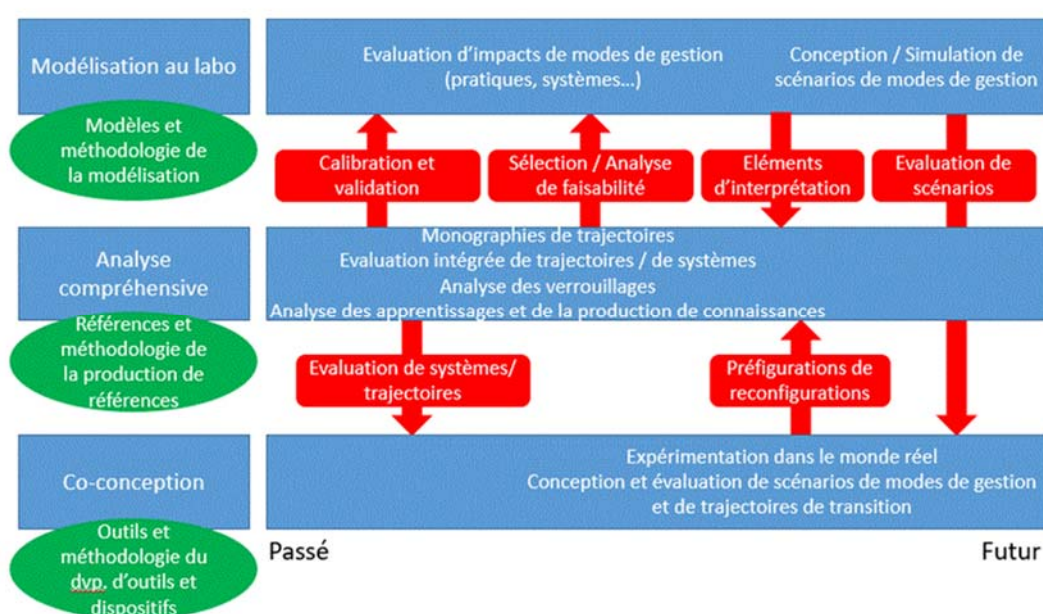


Figure 1. Complémentarité entre trois stratégies de recherche sur l'étude de la transition agroécologique des fermes (Martin *et al.*, 2018).

Quelques 'success stories' impliquant l'Inra

- *De l'évaluation ex-post à l'évaluation ex-ante des choix de successions culturales et de niveaux d'intrants polluants (SAE2)*

La compréhension et la modélisation du choix des niveaux d'intrants polluants est une question récurrente en économie agricole. L'objectif est de mesurer l'effet des déterminants de ces choix, en particulier des prix des politiques et des réglementations, avant d'évaluer l'intérêt de différents instruments de politiques pour réduire ces pollutions au moindre coût pour l'ensemble de la société et de calculer, le cas échéant, les compensations nécessaires pour indemniser les perdants.

Contrairement aux préconisations de l'ESCo Inra-Cemagref sur les pesticides de 2005, la France ne s'est pas dotée d'une taxe significative sur les pesticides. Depuis plus de 10 ans de plan Ecophyto, visant une division par 2 de l'usage des pesticides, l'usage des pesticides en France s'est accru, malgré un recul de la surface agricole utilisée et l'accroissement significatif des surfaces en agriculture biologique. Les connaissances établies depuis longtemps en économie agricole expliquent simplement cette évolution par celle du rapport des prix des intrants à celui des productions. Ce résultat théorique est vérifiable économétriquement à partir d'une modélisation « boîte noire », l'exploitation agricole ne permettant pas de mettre en évidence les interactions entre l'usage d'intrants et les services écosystémiques entretenus par les successions culturales, ni de représenter dans un cadre unifié le choix des assolements et celui des niveaux d'intensification.

Carpentier et Letort (2011) ont produit un cadre d'analyse intégrant de manière cohérente, estimable et simulable les choix de successions culturales et les choix d'utilisation d'intrants. Il s'agit d'une fonction de profit combinant la modélisation explicite pour chaque culture du rendement potentiel et du rendement objectif en fonction des rapports de prix anticipés et du précédent cultural et d'une fonction de coût de gestion de l'assolement. Ainsi, la surface allouée à une culture est modélisée comme le résultat d'un équilibre entre la rentabilité immédiate de cette culture et sa valeur comme précédent pour la culture suivante. Cette spécification permet également de prendre en compte la grande hétérogénéité des exploitations de grandes cultures par les méthodes d'économétrie de panel de paramètres aléatoires. Cette approche permet notamment d'expliquer les successions « blé » dans certaines conditions de prix. Elle a permis à Féménia et Letort (2016) de comparer les systèmes de cultures conventionnels, observés aux travers de comptabilités analytiques, aux systèmes de cultures à bas niveaux d'intrants développés et décrits par des essais agronomiques. Elles ont ainsi déterminé les prix seuils des cultures et des intrants, en particulier des pesticides, pour lesquels les systèmes bas intrants remplaceraient les systèmes conventionnels pour une proportion donnée d'agriculteurs : par exemple dans les conditions de prix de l'article (171€/tonne pour le blé, 357€/tonne pour le colza, 148€/tonne pour l'orge), une taxe de 35% sur les pesticides amènerait 90% des céréaliculteurs de la Meuse à des systèmes bas intrants réduisant la consommation totale de pesticides de 25%. En revanche, une baisse de 50% nécessiterait une taxe de 200%. La même approche a permis à Bareille et Letort (2018) de montrer que la productivité des successions de cultures, donc des services écosystémiques intrants entretenus par les rotations, était héritée à 50% et donc reconstruite à 50% d'une année sur l'autre par le choix des agriculteurs.

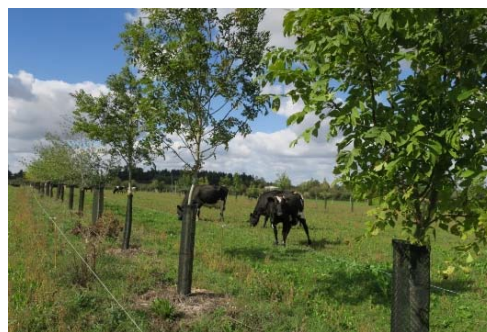
- *L'expérimentation système OasYs pour accompagner la transition agroécologique des systèmes agricoles (S. Novak, J.-C. Emile ; EA, PHASE, BAP, avec le soutien des départements SAD, EFPA et SAE2), 2013-2034*

L'expérimentation grandeur nature permet d'explorer de nouvelles voies pour produire mieux et plus durablement, pour comprendre les processus de changement de pratiques et pour accompagner la transition des systèmes agricoles vers plus d'agroécologie. Une trentaine d'expérimentations système sont implantées dans les unités expérimentales de l'Inra. Elles couvrent une large diversité de productions agricoles : grandes cultures, polyculture-élevage, élevage, viticulture, maraîchage, arboriculture et sylviculture. L'expérimentation système en polyculture-élevage « Oasys », mise en place sur l'UE Ferlus à Lusignan, est présentée ici à titre d'illustration.

Le système OasYs résulte d'une démarche de co-conception mise en place en 2012 avec une vingtaine de chercheurs de différents départements de l'Inra et des partenaires du monde professionnel et associatif

(agriculteurs, ADEME, C.A. 86, FNE, GIS Elevages Demain, IDELE, LEGTA Mirecourt, RAD, RMT Systèmes de culture innovants, Solagro ; Novak et Emile, 2014). L'objectif partagé s'est focalisé autour de la conception et de l'évaluation d'un système bovin laitier adapté au changement climatique grâce à la mise en œuvre d'une démarche agroécologique fondée sur la diversification (Novak *et al.*, 2018a, 2018b). L'hypothèse en test à l'échelle du système est qu'une plus grande diversité des composantes d'un système agricole et de leurs fonctions permet de concilier un niveau de production et des performances environnementales élevés, et d'améliorer la résilience du système face aux aléas climatiques (García de Jalón *et al.*, 2018).

Ce système est mis en place depuis juin 2013. Il comporte 90 ha de cultures et prairies multi-espèces et multi-étagées (dont 12 ha en agroforesterie), et un troupeau de 72 vaches laitières engagé dans un croisement rotationnel à trois races (Holstein, Rouge Scandinave, Jersiaise). Il est basé sur une diversification des ressources fourragères, le développement du pâturage et des légumineuses, le recyclage de l'eau et des éléments nutritifs, et une stratégie d'élevage adaptée (2 périodes de vêlage, lactations allongées, croisement 3 voies). Une rotation entièrement pâturable a été imaginée, comportant des prairies multi-espèces, des cultures annuelles et des arbres à vocation fourragère, afin d'allonger la saison de pâturage (Emile *et al.*, 2017, 2018 ; Mahieu *et al.*, 2018). De nouvelles associations sont testées (sorgho-légumineuse) pour constituer des stocks fourragers équilibrés en énergie et en azote, limitant l'apport d'engrais minéraux azotés et améliorant la fertilité du sol. La mise en place du système et son évaluation multicritère permettront de caractériser l'efficacité d'utilisation des ressources et la résilience du système face aux aléas climatiques.



- *Evolution de la vulnérabilité des élevages laitiers permise par leur conversion à l'agriculture biologique (AB) – M. Bouttes, M. Duru, G. Martin (EA), 2015-2018*

La phase de transition agroécologique est une période de changements de pratiques, d'interlocuteurs de conseil, etc., souvent sans valorisation immédiate avant 1 an ½ à 2 ans. Le choix d'entrer en transition pose la question de la vulnérabilité des fermes aux aléas. Dans ces conditions, les conseillers agricoles ont besoin d'informations actualisées et contextualisées sur les stratégies de conversion limitant la vulnérabilité des élevages laitiers. Le travail engagé autour de la thèse de M. Bouttes avait pour but, en prenant comme cas d'étude la conversion à l'AB des élevages bovin lait, d'identifier quelles stratégies de conversion limitaient la vulnérabilité des élevages avant, pendant et à l'issue de la conversion à l'AB.

L'objectif de ce travail et les dispositifs d'étude ont été construits en partenariat avec des acteurs du conseil agricole en Bretagne (FRAB, GAB22) et en Aveyron (Chambre d'Agriculture, APABA). La bourse de thèse de M. Bouttes a été co-financée par la région Midi-Pyrénées et l'Inra (EA), les études par les projets PSDR-ATARI, TATABOX (ANR-13-AGRO-0006) et OPTIALIBIO.

Les éleveurs perçoivent la conversion comme un moyen d'améliorer voire de retrouver de la capacité d'adaptation, notamment en sortant de la logique de l'agrandissement et des économies d'échelle (Bouttes *et al.*, 2018a). Pendant la conversion, la vulnérabilité perçue par ces éleveurs a diminué aux plans économique, agronomique, zootechnique et social, quelles que soient les pratiques mises en œuvre. Leur vulnérabilité technico-économique diminue effectivement lors de la conversion, bien que des compromis différents entre élevages existent entre leurs situations initiales et à l'issue de la conversion, et entre variables de vulnérabilité (Bouttes *et al.*, 2018b, in review) : productivité, efficacité économique, rentabilité et indépendance vis-à-vis des aides publiques. Les différences de vulnérabilité entre élevages sont principalement dues aux différences de pratiques des éleveurs selon le compromis visé entre productivité et efficacité économique. Ce travail a permis d'établir une méthodologie d'évaluation dynamique de la vulnérabilité des exploitations agricoles opérant une transition agroécologique et de produire des résultats originaux sur l'évolution de cette vulnérabilité durant une transition. Au plan finalisé, il révèle que les marges de réduction de la vulnérabilité des élevages laitiers permises par la conversion à l'AB sont importantes.

- *La créativité paysanne au service de l'agroécologie : transition professionnelle vers la polyculture élevage économe et autonome – X. Coquil, P. Béguin, B. Dedieu (SAD) 2009-2014*

L'enjeu est, par l'étude des transitions, d'accéder à des ressources (cognitives, matérielles, didactiques) intéressantes pour des agriculteurs souhaitant développer une agriculture plus économe et autonome, mettant à l'épreuve des régulations biologiques et des pratiques qualifiées d'agroécologiques. La question ici posée est celle de la façon dont la transition agroécologique a été initiée chez les agriculteurs du Réseau Agriculture Durable et comment elle s'est déroulée.

Ce travail a mobilisé les sciences agronomiques et l'ergonomie. Il est basé sur l'analyse des transitions professionnelles de 20 agricultrices et agriculteurs travaillant dans 9 fermes de polyculture-élevage économe et autonome adhérant au Réseau Agriculture Durable et de 17 expérimentateurs travaillant sur l'installation expérimentale de l'Inra ASTER-Mirecourt (ils pratiquent aussi la polyculture-élevage économe et autonome). Ces agriculteurs, agricultrices et expérimentateurs ont tous connu par le passé la polyculture-élevage mobilisant des intrants.

L'accès à l'impensable, la prise de conscience du décalage entre valeurs et pratiques, les difficultés pratiques ou financières ou encore l'obligation externe sont autant de facteurs d'initiation, souvent interagissant, de la transition professionnelle vers la polyculture-élevage économe et autonome (Coquil, 2014). Les souhaits relatifs au futur des agriculteurs évoluent chemin faisant durant la transition. Les connaissances et les savoir-faire qu'ils mobilisent alors qu'ils travaillent avec des intrants sont, en partie, inutilisables en situation économe. Leur travail et l'objet sur lequel ils travaillent ne sont plus les mêmes. Le processus de transition s'apparente à un dialogue avec la situation : un processus expérientiel (i) de confrontation des souhaits à ce que la réalité permet, et (ii) de résolution des difficultés émergentes. Ce processus est outillé et stimulé par le recours à des ressources (par exemple, méthode de pâturage tournant, diagnostics, herbomètre...) qui permettent à l'agriculteur de résoudre des difficultés, mais qui lui permettent aussi de découvrir de nouveaux champs de possibles (Coquil *et al.*, 2014a, 2014b, 2017).

La valorisation auprès des acteurs de terrain a fait l'objet de 2 projets CASDAR (Praifac puis TRANSÆ). TRANSÆ est centré sur l'accompagnement de la transition professionnelle des agriculteurs, animateurs, enseignants et chercheurs allant vers l'agroécologie. L'expérience des systèmes agroécologiques des expérimentateurs de l'UE ASTER-Mirecourt est débattue avec des utilisateurs potentiels au sein d'un dispositif d'expérimentation sociale (Anglade *et al.*, 2018).

- *Articuler projet collectif et individuel pour accompagner la transition agroécologique des fermes – N. Couix, L. Hazard, C. Lacombe (SAD) 2015-2018*

La transition agroécologique d'une ferme nécessite une adaptation des principes de l'agroécologie à son contexte écologique, économique et social. Au cours de ces dernières années, les travaux conduits sur l'accompagnement des transformations sociotechniques de l'agriculture ont montré l'importance : (i) de l'apprentissage social entre pairs pour élaborer et/ou contextualiser les connaissances nécessaires à cette transition (Prost *et al.*, 2017 ; Cristofari *et al.*, 2018) ; et (ii) de construire les outils de conduite du changement avec les agriculteurs (Andrieu *et al.*, 2012 ; Cerf *et al.*, 2012 ; Ditzler *et al.*, 2018). La question posée ici est : comment le projet individuel de l'agriculteur dans sa volonté de changement est-il pris en compte dans cette dynamique collective ?

En 2016, le projet de recherche DATA a été élaboré avec des partenaires du rayon de Roquefort dont l'AVEM, une association d'éleveurs qui souhaitaient développer des systèmes de production plus agroécologiques et enrayer ainsi l'intensification des systèmes ovin-lait de la zone et la tendance à l'agrandissement des élevages. Ce projet a fait l'objet d'un financement par la Fondation de France et a servi de support à la thèse de C. Lacombe financée par le métaprogramme EcoServ. L'hypothèse des éleveurs était que la quête d'autonomie fourragère et énergétique des élevages permettait de réduire les charges de l'exploitation ainsi que leur impact environnemental. Le travail a montré que co-construire avec les acteurs de terrain les outils de diagnostic de ces autonomies ouvrait une discussion sur le sens donné à l'action collective et permettait ainsi de favoriser l'adhésion des éleveurs au projet de transition agroécologique. Les outils initialement pensés pour prescrire des

« bonnes pratiques » se sont transformés au cours de l'action en heuristiques pour penser le changement. N'étant plus producteurs d'une norme sur laquelle s'aligner, ils deviennent des représentations intermédiaires entre le collectif et l'élèveur. Ils sont alors devenus un moyen permettant aux éleveurs de penser la reconception de leur système. Cette reconception est conduite par l'élèveur lui-même avec l'aide d'une '*extended-peer community*' (Lamine, 2018) constituée de quelques membres du collectif ayant co-conçu l'outil. La soutenance de la thèse de C. Lacombe est prévue fin 2018. Trois articles sont en préparation, un est accepté (Lacombe *et al.*, 2018).

Priorités scientifiques – fronts de science – priorités méthodologiques

Les **priorités scientifiques** identifiées pour ce thème sont les suivantes :

- **Modélisation quantitative de la TAEA**

La modélisation quantitative de l'exploitation agricole permet une simplification partisane pour analyser et comprendre son fonctionnement (situation de référence), évaluer des scénarios et mettre en débat les mesures d'accompagnement de la TAEA (innovation technique, changements structurels, politiques publiques...), mais également transférer un ensemble de connaissances sur ce système complexe piloté. Bien qu'un positionnement sur la thématique existe déjà avec les travaux menés en modélisation (plateforme RECORD, implication dans la communauté FSD ...), plusieurs défis demeurent :

- De façon assez générale, développer une **modélisation fonctionnelle** de l'exploitation agricole à la croisée des systèmes socio-écologiques et sociotechniques. L'exploitation agricole vue comme un système complexe piloté nécessite de s'intéresser aux structures cognitives (buts, plans, préférences) et aux mécanismes par lesquels ces structures interviennent dans les processus de décision des agriculteurs et évoluent dans le temps (adaptation par retour d'expérimentation). Cette modélisation doit pouvoir représenter la complexité des structures physiques (par exemple, parcellaire), sociales (par exemple, GAEC) et des options d'organisation du travail, ainsi que la diversité des exploitations agricoles. La première question posée est relative à la possibilité de rendre compte de multiples ateliers (par exemple, l'intégration culture-élevage, c'est à dire de ne pas considérer que des grandes cultures, qu'un atelier de production unique, qu'une UTH à temps plein, qu'un seul revenu...). Plus généralement, ce qui est en débat c'est la capacité des modèles à intégrer les nouveaux objets de gestion qui émergent des processus de transition agroécologique, et les propriétés attendues des systèmes (résilience notamment).
- Plus en lien avec la TAEA, développer des cadres de modélisation pour la prise en compte de **l'incertitude** et de **l'apprentissage** sur le temps long est prioritaire. Comment intégrer par exemple l'essai-erreur pratiqué par les agriculteurs sur leur parcellaire pour tester des innovations agroécologiques ? Comment faire le lien avec le cadre conceptuel de la viabilité qui s'intéresse à la dynamique viable de systèmes dans un espace de contraintes données ? Quelles évolutions envisager pour les démarches d'optimisation, dans un cadre désormais multicritères ? Comment intégrer les changements d'échelle d'espace et de temps ? Comment prendre en compte les propriétés émergentes des modèles quand on couple les échelles, ainsi que les compromis existant sur certains aspects tels que résilience, efficience ou viabilité des systèmes ?
- Le réseau étant un élément important de la TAEA, développer un cadre permettant d'étudier des situations de gestion incorporant une **dimension collaborative** semble fondamental. En effet, certains objectifs (par exemple, maintenir une structure du paysage favorable à la biodiversité locale et aux services de régulation biologique associés) ne peuvent pas être atteints par des stratégies individuelles car plusieurs

agriculteurs doivent collaborer et coordonner leurs actions. La collaboration peut également porter sur des échanges entre les agriculteurs de produits de leurs exploitations (par exemple, fourrage, fumier) ou sur le partage de leurs ressources (par exemple, machines, travail). Ce type de problème de coordination mêlant initiatives individuelles et nécessité d'une approche collective a été peu abordé encore mais semble fondamental en agroécologie et pour la transition agroécologique.

- o Enfin, il est très important de développer des méthodologies de **scénarisation** et de **simulations opérationnelles** (grille de production, couplages de modèles, temps de calcul, mobilisation d'autres informations expertes...) pour tester, par exemple avec des jeux sérieux, des trajectoires de transition agroécologique d'exploitations agricoles.

- **Analyse des TAEAs réalisées ou en train de se faire**

Afin d'évaluer les performances des systèmes agricoles, les sciences agronomiques privilégient majoritairement l'étude de systèmes dans lesquels les pratiques mises en œuvre ne sont peu ou pas modifiées au fil des ans. Dans cette tradition, la problématique de la transition est réduite à la conception de l'exploitation agricole souhaitée. Le chemin pour l'atteindre est considéré comme l'affaire du développement. Cependant, comme le montrent les premiers travaux sur le sujet¹⁷, parcourir ce chemin ne va pas de soi et l'adéquation fins/moyens est régulièrement reconsidérée lors d'une transition. La transition est donc une problématique de recherche pertinente pour laquelle il convient de produire des cadres interprétatifs de ces TAEAs.

Dans la tradition des '*Farming Systems*' (Darnhofer *et al.*, 2012), l'Inra doit pouvoir occuper une place de choix en proposant de structurer le travail de recherche autour des sous-tâches suivantes :

- o **Identifier des systèmes en transition** (« traque aux innovations »). Il s'agit de développements méthodologiques pour identifier les innovations mais aussi pour saisir s'il est possible de les remobiliser dans la conception de trajectoires de transition ('*outscaling*') et à quelles conditions. L'Inra est porteur de cette question sur la scène internationale (notamment via des travaux conduits dans le cadre d'IDEAS, la thèse de C. Salembier ou le projet MEET'IC du département PHASE qui questionne le cadre conceptuel de Geels, 2004).
- o Analyser l'évolution conjointe du contexte, des pratiques, des propriétés et des performances des systèmes en transition afin de caractériser les **conditions requises** et les **facteurs favorables** à la TAEA, ou au contraire les effets de verrouillage dans les activités de l'exploitation et de l'exploitant (changements techniques, insertion dans des réseaux, processus d'apprentissage, changements dans les modes de commercialisation et l'organisation du travail). Cela passe par des analyses interdisciplinaires des transitions en train de se faire, telles que celles conduites dans des thèses interdisciplinaires¹⁷. Le développement de tels travaux peut nécessiter deux types d'approfondissement :
 - Pour analyser et évaluer l'évolution des performances des systèmes en transition, il faut développer en sciences biotechniques les concepts et les méthodes couplant le cadre de la durabilité avec les cadres d'analyse de la dynamique des systèmes (résilience, vulnérabilité, efficacité, viabilité notamment). A ce titre, l'Inra est actif dans le réseau '*Resilience Alliance*' et plusieurs chercheurs (D. Magda, M. Tichit, G. Martin, etc.) travaillent à la déclinaison des concepts de résilience et vulnérabilité aux systèmes agricoles, avec une entrée interdisciplinaire (voir par exemple Ollivier *et al.*, 2018).

¹⁷ Outre les travaux évoqués plus haut sur l'AB et la PI, voir par exemple les thèses de Cardona, Chantre, Coquil et Catalogna.

- Développer les concepts et méthodes pour analyser les **transformations du travail** (organisation des activités, évolution de la charge mentale liée au pilotage de la complexité et de l'incertain, transformation des mondes professionnels de référence). Il s'agit également d'analyser comment la charge de travail oriente les trajectoires de transition agroécologique. Il est clair que les agriculteurs pressurés en travail chercheront la mise au point de systèmes agroécologiques robustes et simples, pas trop demandeurs en travail. Cette quête n'est pas suffisamment prise en compte dans la conception de systèmes innovants, dans lesquels souvent la complexité nécessiterait pour sa mise en œuvre une charge de travail et mentale très importante. Là encore, l'Inra est leader sur ces questions sur la scène internationale (voir par exemple Coquil *et al.*, 2018), la question du travail ayant été assez délaissée dans le champ des sciences agronomiques.
- Caractériser les objets en débat avec la TAEA et la façon dont ils se reconfigurent : la gestion de la santé des plantes et des animaux (travaux de M. Hanachi ou F. Charrier), l'agrobiodiversité (BAP : I. Goldringer; SAD : M.-A. Magne, L. Hazard, V. Chable), l'intégration des activités dans les systèmes diversifiés (EA : M. Moraine, G. Martin), etc.
- **Co-conception et expérience de la TAEA**

L'ambition est ici d'**analyser le processus de changement en y participant** : cette participation procède d'itérations entre engagement dans l'action et la transformation des systèmes et processus réflexif avec les acteurs pour apprendre de l'action engagée. Cela permet une production de connaissances scientifiques tant dans le champ des sciences humaines et sociales que dans celui des sciences biotechniques. Les questions de recherche portent sur les processus de co-conception et l'apprentissage au cours de la TAEA. Au-delà des méthodes de créativité, cela renvoie à des questions sur la nature des connaissances à produire pour co-concevoir, sur la façon de les structurer, et sur l'articulation entre conception et différentes formes d'expériences : de celle vécue par l'agriculteur aux essais analytiques qu'il visite. Ce travail engage des approches participatives basées sur la résolution de problèmes impliquant les acteurs de ces problèmes pour mobiliser leurs savoirs et choisir démocratiquement les orientations de la transition.

L'Inra devrait, au sein de la communauté IFSA (*International Farming System Association* ; R. Milestad), développer des travaux avec le CIRAD (cf. l'ouvrage à paraître : *Accompagner les SPCE dans la transition agroécologique : bilan et leçons de 15 ans de travaux en Afrique de l'Ouest*) et le WUR (B. Elzen) en structurant le travail de recherche autour des sous-tâches suivantes :

- Créer des méthodes de conception en lien avec la situation d'usage pour proposer des solutions localement adaptées. Cela implique de réduire le fossé qui s'est creusé entre concepteurs et utilisateurs, entre créativité et mise à l'épreuve, entre '*solution finding*' et '*sense making*' ('*participatory design*', '*co-design*'...). Les recherches se sont structurées en Ile-de-France avec la création d'IDEAS¹⁸. Cette structure est en mesure de se développer en France et à l'international pour structurer les travaux de cette sous-tâche.
- Développer des modes d'accompagnement de la transition agroécologique et de conduite de projet/gouvernance (recherche, conseil, formation) en favorisant la participation, les apprentissages croisés, le partage d'expériences et l'investigation scientifique dans l'action. Il s'agit également, après avoir beaucoup mis l'accent sur l'action collective pour développer l'agroécologie, de questionner la relation collectif/individuel.
- Travailler sur les liens entre recherche, conseil et formation en partageant les modes d'investigation développés dans l'action qui favorisent l'apprentissage : les méthodes

¹⁸ <http://www.versailles-grignon.inra.fr/Toutes-les-actualites/2017-IDEAS>

d'enquêtes et d'apprentissage dans l'action (Francis *et al.*, 2011) renouvellent l'intérêt d'une proximité entre Recherche et Enseignement qui jusqu'à présent visait surtout à favoriser le transfert des connaissances.

- Analyser et proposer les indicateurs de gestion, les raisonnements tactiques et stratégiques et leurs interactions permettant à l'agriculteur de réduire la complexité et ainsi de piloter son agroécosystème.

Les **priorités méthodologiques** identifiées pour ce thème sont les suivantes :

- Articuler les différents travaux réalisés avec des stratégies et des postures de recherche différentes. C'est tout l'enjeu de ce thème et de la proposition articulée autour de la Figure 1.
- Poursuivre le développement méthodologique des approches transdisciplinaires qui sont importantes pour la production scientifique et l'accompagnement de la TAEA. Les écoles chercheurs « *Produire et mobiliser différentes formes de connaissances pour et sur la transformation des systèmes agricoles : regards interdisciplinaires* » (2015) et « *Sciences participatives* » (2018), ainsi que la mission conduite par le délégué aux Sciences en Société de l'INRA, C. Roturier, ont lancé la dynamique. Celle-ci doit être étendue à un travail conjoint avec nos partenaires de terrain car le développement de ces approches se heurte à la double culture dominante de l'inférence logique hypothético-déductive et d'une conception instrumentale de la démarche de projet. Les chercheurs comme les non-chercheurs peinent à se détacher de cette pratique très normée de la science pour mettre en œuvre des approches participatives comme le montrent des expériences comme Co-create à Bruxelles ou les projets des CIVAMs. L'idée est (i) de consolider une méthodologie d'investigation et une pratique réflexive mobilisable par une communauté mixte de chercheurs et d'acteurs de terrain ; et (ii) de combiner des approches situées et la production de connaissances scientifiques répondant aux normes de la profession.
- Une dernière priorité méthodologique serait de travailler sur les liens entre agriculture numérique (*Big Data*), modélisation et apprentissage social afin d'accompagner la TAEA.

Les cadres de travail et partenariats

Les apports des départements et des métaprogrammes

• **Départements**

Pour l'instant, ce sont plutôt des individus au sein des départements SAD, EA, MIA et PHASE qui sont porteurs de cette problématique nouvelle. L'enjeu, si la priorité est donnée au développement de la thématique TAEA, sera de structurer les actions entre départements, par exemple grâce aux métaprogrammes.

Le SAD est le département de l'Inra le plus engagé sur la thématique de la TAEA, avec 15 thèses soutenues ou en cours depuis 2010, 8 projets de recherche pouvant s'y inscrire et 3 unités expérimentales ayant mis en place des expérimentations « système ». Les priorités AgroEcologie pour l'Action, Partage d'Expériences et Production de Savoirs, et Coexistence sont des lieux d'animation pour la thématique TAEA.

Le département EA travaille sur le suivi et l'analyse d'exploitations en transition, la modélisation de l'exploitation agricole, les analyses multicritères et les jeux sérieux ; PHASE et EA sur les expérimentations « système » en lien avec une activité de conception (Oasys, Patuchev, etc.) et la modélisation, en lien avec MIA (Projet Archimod et plateforme RECORD). Cette modélisation

quantitative de la TAEA bénéficiera d'une articulation avec (i) les travaux menés par le département MIA (Martin-Clouaire, 2017) sur la modélisation de la décision ; (ii) ceux anciennement menés par le département SAE2 sur la représentation de l'exploitation agricole (LORA, IRMA, OTELO... équipe Attonaty) ; et (iii) ceux du département PHASE sur l'intégration de l'élevage dans le méta-modèle Archimod.

- **Métaprogrammes**

Les travaux de recherche sur le thème couvert par ce groupe de travail doivent pouvoir prendre appui sur EcoServ. En effet, entrant dans sa deuxième phase, le métaprogramme se pose désormais la question de comment soutenir et opérer la transition agroécologique. La première question posée est celle de la relation entre services écosystémiques (SES) et agroécologie, relation qui ne va pas de soi et qui doit être instruite. La transition est plutôt envisagée dans EcoServ à l'échelle du territoire, à l'interface entre échelle individuelle et politique publique. Il est clair néanmoins que les travaux centrés sur l'exploitation agricole permettront d'instruire l'échelle individuelle dans cette interaction. EcoServ pourrait d'ailleurs organiser une journée de travail sur l'échelle exploitation pour instruire les questions de l'articulation entre SES et agroécologie et celle du changement.

Le nouveau métaprogramme sur l'AB devrait également être un lieu privilégié d'animation scientifique pour ce thème, prenant la conversion à l'AB comme un cas de TAEA.

Outils et infrastructures mobilisés ou à développer

Pour la modélisation quantitative de la TAEA, RECORD est actuellement la plateforme de modélisation quantitative et de simulation des agroécosystèmes la plus pertinente pour la modélisation des exploitations agricoles. Des travaux d'interfaçage ont été ou sont développés en lien avec d'autres dispositifs et bases de données d'intérêt (ODR, bases de données climats, sol et pratiques...) mais aussi d'autres plateformes d'évaluation (MEANS pour l'évaluation multicritères) ou des modèles d'économie plus globaux (AROPAJ). En fonction de l'échelle d'intérêt (l'exploitation agricole ou l'exploitation agricole dans un territoire) et des interactions voulues entre exploitations agricoles, la plateforme MAELIA peut également être mobilisée.

Pour l'analyse des TAEAs réalisées ou en train de se faire, il est nécessaire d'identifier et de développer des bases de données adaptées pour analyser des transitions. Celles qui existent n'ont pas été développées pour traiter cette question et des données particulièrement intéressantes pour traiter des transitions ne sont pas disponibles (par exemple, variabilité individuelle dans le troupeau).

L'idée est également de pérenniser des dispositifs d'enquête sur des exploitations ou des collectifs d'exploitation à l'image de celui mis en place pour la thèse de M. Bouttes ou des observatoires comme l'Observatoire de la Transition AgroEcologique (ObsTAE¹⁹) lancé en 2015 dans le cadre d'un projet de recherche sur les groupes lauréats du Casdar MCAE. Cet observatoire permet une analyse sociologique de l'évolution de collectifs d'exploitations dans leurs dynamiques collectives d'apprentissage et leurs conceptions de l'agroécologie. Il pourrait dans l'avenir être couplé avec un travail d'analyse ciblé sur le suivi sociotechnique des exploitations.

Pour la co-conception et expérience de la TAEA, les expérimentations « système » permettent de développer des recherches sur la conception et l'évaluation de systèmes agricoles innovants et de mettre à l'épreuve certains des principes de l'agroécologie visant la diminution du recours aux intrants et la valorisation des services écosystémiques. Les questions qui y sont abordées se situent bien

¹⁹ Coordonné par M. Barbier et C. Lamine (SAD).

souvent à l'interface de plusieurs disciplines, entre sciences biotechniques et écologie et entre sciences biotechniques et sciences humaines et sociales. Dans plusieurs unités Inra, le développement de dispositifs d'innovation ouverte, permettant un partage d'expérience avec des visiteurs se développe. La mise en réseau de ces dispositifs pour leur analyse est en cours²⁰. En partenariat avec les acteurs de terrain, **les arènes de co-conception** se développent également pour expérimenter la transition :

- Ateliers participatifs. Par exemple, l'idéotypage participatif (projet Ardu/métaprogramme SMaCH), le développement informatique participatif (Capflor), ou bien encore les ateliers de co-conception développés par le RMT « Systèmes de culture innovants » et IDEAS.
- Jeux sérieux : Rami fourrager, Mymyx ...
- Modélisation d'accompagnement ComMod.
- 'Labs' (fab-labs, living labs, landlabs...) allant du déploiement de recherches pilotées par la demande à des formes d'expérimentation sociale : Living Lab « Système cunicole » (L. Lamothe, PHASE), TEASER-Lab à Aster-Mirecourt, projet de TIGA Ouesterel (H. Guyomard, SAE2), projet ANR TATABox (J.-E. Bergez, EA), PEI DIAL « Dispositif d'Innovation Agroécologique Locale » (L. Hazard, SAD), etc.

Partenariats académiques nationaux et internationaux

Dans le cadre de la fusion Inra-Irstea, des collaborations devraient s'établir ou se renforcer avec des unités comme le LISC. Proposition est aussi faite d'entrer en discussion avec des collègues d'autres instituts, notamment du CIRAD, mais peut-être aussi plus globalement avec tous ceux qui analysent les transitions dans d'autres secteurs (énergie, transport, ville, etc.).

IDEAS est structurant pour les chercheurs franciliens travaillant sur la conception dans d'autres domaines que le domaine agricole : UMR i³ qui regroupe le département SES de Télécom ParisTech, CGS et chaire de conception innovante des Mines ParisTech, laboratoire CRG Polytechnique, CNAM (laboratoire CRTD) (cf. co-encadrements de thèses, organisation croisée de séminaires...). Les thèmes correspondants sont la compréhension des raisonnements, des organisations, et celle des impacts sur l'activité de travail de processus de changement vers des innovations de rupture.

Il y a aussi un partenariat à renforcer avec l'ENSFEA qui forme les professeurs de l'enseignement agricole dans le cadre de « enseigner à produire autrement ».

Parmi les collectifs et les chercheurs étrangers travaillant sur l'agroécologie, très peu s'intéressent à la transition. Nous avons identifié nos collègues belges du groupe GIRAF, I. Darnhofer (BOKU), L.A. Sutherland (J. Hutton), K. Descheemaeker et M. Meuwissen (WUR), F. Marchand (ILVO), A. Stirling (SPRU)...

Diverses communautés scientifiques sont susceptibles d'accueillir les travaux sur la TAEA : *Resilience Alliance*, *International Farming System Association* (IFSA), *Farming Systems Design* (FSD), *System Innovation towards Sustainable Agriculture* (SISA), *Sustainability Transitions Research Network* (STRN²¹).

Partenariats socio-économiques et de transfert pour l'innovation

Le domaine d'innovation « Transition agroécologique des systèmes alimentaires » est lancé, avec M. Duru comme CPI et le SAD comme département référent. Les objectifs de ce domaine d'innovation sont (i) d'identifier et de structurer d'une part l'offre de recherche nationale et d'autre part les initiatives dans les territoires ; (ii) de faire connaître les résultats et savoir-faire de l'Inra, et de les

²⁰ Proposition de C. Mignolet et B. Dedieu.

²¹ <https://transitionsnetwork.org/>

rendre lisibles ; et (iii) de construire et développer de nouveaux projets plus intégrés, en partenariat avec les acteurs de la société civile et les acteurs économiques.

Ce domaine d'innovation ne sera pas limité à la TAE de l'exploitation, mais il l'inclut. La note de positionnement du domaine sera le média principal du lien entre les recherches sur la TAE et la démarche de transfert – innovation.

Valoriser les processus écologiques, hydrologiques et biogéochimiques dans des paysages multifonctionnels

Le paysage agricole est considéré ici comme une mosaïque de parcelles et d'espaces interstitiels, de tailles, formes et arrangements variables dans l'espace, mais aussi dans le temps, au rythme des successions culturales et activités agricoles et de l'aménagement du territoire. Ces arrangements sont liés aux contraintes des exploitations agricoles, en relation avec leur mode de production, et aux caractéristiques du milieu, en relation avec la distribution des sols, des nappes, et aux activités non agricoles aux interfaces. Ces mosaïques s'inscrivent dans une histoire. Elles sont liées aux dimensions socio-économiques du territoire, et portent des enjeux pour la société, en termes de production et d'environnement (Gascuel *et al.*, 2015).

Périmètre, bilan et priorités

Périmètre

Le périmètre identifié est celui de la **valorisation de la biodiversité et/ou des processus écologiques** (biotiques, abiotiques) dans des paysages multifonctionnels pour une production agricole durable et multi-performante, plus efficiente, plus résiliente et moins polluante (faibles intrants, faibles fuites dans l'environnement) bénéficiant à l'ensemble des acteurs d'un territoire agricole. Derrière le terme « multifonctionnel », nous considérons dans notre analyse quelques fonctions clés qui ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Il s'agit de la régulation des bioagresseurs (ravageurs, adventices, maladies), de la pollinisation, du maintien de la biodiversité tellurique et aérienne, de la régulation et de l'approvisionnement en termes de qualité eau-sol-air, du maintien de la production végétale et animale (fertilité des sols, nutrition animale). Les fonctions non strictement agricoles (résistance aux espèces envahissantes, conservation de la biodiversité patrimoniale) sont en limite de périmètre.

Ce périmètre inclut l'identification des déterminants de la **variabilité spatiale et temporelle** des milieux et des processus écologiques et de leur gestion, et les éléments du paysage qui sont support d'actions agroécologiques (leviers). Ces éléments du paysage ne sont pas forcément des espaces dédiés à l'agriculture et peuvent aussi être des espaces naturels. Le périmètre considère à la fois des échelles de gestion (parcelle et sa bordure, exploitation, territoire, bassin versant) et des échelles écologiques (du cm² au paysage agricole), car si l'échelle du paysage est l'échelle visée, les échelles inférieures sont souvent à prendre en compte pour identifier et comprendre les processus en jeu. De même, la question de la complémentarité de leviers à l'échelle de territoires rassemblant différents milieux et systèmes de production est primordiale.

La **dimension temporelle** des processus est importante pour nourrir la réflexion autour de paysages multifonctionnels résilients. Elle est prise en compte de façon croissante dans l'analyse, les paysages agricoles étant très dynamiques et l'aspect temporel étant souvent indissociable de la dimension spatiale (stratégie spatio-temporelle de déploiement des cultures, variétés et habitats semi-naturels). A plus long terme, un enjeu fort est d'anticiper les effets des changements globaux (changement climatique avec ses conséquences sur l'utilisation des terres mais aussi urbanisation), et leurs impacts potentiels sur les processus biophysiques. Ici, on notera des points de vigilance particuliers comme la propagation d'espèces envahissantes et l'apparition de maladies émergentes.

La question des **synergies et antagonismes** entre fonctions écosystémiques est prégnante, et ceci à différentes échelles. A l'échelle du paysage, il s'agit notamment d'examiner en quoi la coexistence

de systèmes agricoles différents au sein d'un même territoire permet la synergie de certaines fonctions (recyclage, complémentarités...). La question des arbitrages sociaux entre fonctions/services, de leurs déterminants et de leurs conséquences sur la gestion des ressources naturelles est un pan de recherche en expansion.

Les enjeux cognitifs sont :

- D'accroître les connaissances sur les interactions entre les processus biotiques qui sous-tendent les différentes fonctions écosystémiques des paysages agricoles en tenant compte de façon simultanée de différents compartiments dans ces paysages ; il s'agit aussi d'analyser et d'intégrer les interactions entre processus abiotiques et biotiques au sein des paysages.
- D'accroître notre compréhension des effets de la composition, configuration et gestion des paysages agricoles sur les liens entre processus, fonctions et services.
- De mieux comprendre pour modéliser la dynamique temporelle de ces processus et fonctions, notamment pour évaluer la résilience des paysages agricoles.
- D'avancer dans la compréhension des déterminants économiques et sociaux de la gestion des ressources abiotiques et biotiques dans les paysages et d'analyser les déterminants des préférences relatives des acteurs vis-à-vis de différents aspects de la multifonctionnalité pour comprendre les arbitrages associés.

Les enjeux finalisés sont :

- D'évaluer dans quelle mesure l'organisation spatiale et temporelle des paysages représente un levier pour agir sur leur multifonctionnalité et leur résilience aux changements globaux. Il s'agit par exemple de répondre aux questions suivantes : *Quelle composition et quel agencement spatial des éléments du paysage et des types de gestion à l'échelle du paysage ? Quelle complémentarité entre systèmes de production au sein d'un territoire ?*
- De progresser dans la conception de paysages multifonctionnels et résilients. Il s'agit par exemple de répondre aux questions suivantes : *Quels instruments de politiques publiques pour promouvoir des paysages multifonctionnels et résilients ? Quel est le potentiel d'une gestion concertée (et entre qui) pour obtenir ces paysages ? Quel mode de gouvernance faut-il mettre en place ?*

Les avancées scientifiques majeures des 3-5 dernières années

On peut faire le constat que la capacité à rendre compte de la complexité de processus biophysiques à différentes échelles spatiales et dans des environnements hétérogènes s'est accrue ces dernières années du fait de différentes avancées.

On note d'abord des progrès dans la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des pratiques agricoles dans l'étude des processus biophysiques. Les modèles de flux abiotiques dans les paysages se complexifient avec la prise en compte des systèmes de production et des contraintes d'exploitation (modèle Casimod'N des projets Acassya et Escapade sur la cascade de l'azote, Moreau *et al.*, 2013 ; simulation et extraction de connaissance, Trépos *et al.*, 2013). La représentation des activités agricoles dans l'étude des processus écologiques à l'échelle des paysages devient plus élaborée, avec notamment la notion d'hétérogénéité cachée (Vasseur *et al.*, 2013) ou la prise en compte des pratiques plus explicite que la simple dichotomie classique AB/Conventionnel (Puech *et al.*, 2014). La mise en place de stratégies semi-expérimentales à l'échelle des paysages permet l'analyse fine des interactions entre variables paysagères, processus écologiques, fonctions et production agricole (Bretagnolle *et al.*, 2018). On note également un intérêt renouvelé pour l'écologie du mouvement avec des avancées sur la façon dont la structure du paysage impacte les mouvements des organismes d'intérêt (Baguette *et al.*, 2014). De même, on trouve de beaux exemples de la description

du rôle fonctionnel d'organismes d'intérêt et de leurs réponses à la configuration du paysage, par exemple sur les oiseaux insectivores et le biocontrôle en vignes (Barbaro *et al.*, 2016). L'exposition d'organismes vivants à des contaminants à l'échelle du paysage est une dimension qui commence à être intégrée dans l'étude de la résilience des paysages agricoles.

Ces évolutions se sont accompagnées du développement d'outils qui ont augmenté notre capacité à appréhender le fonctionnement biophysique des paysages. On citera par exemple la routinisation de méthodes de métagénomique du sol qui permet aujourd'hui l'analyse des effets de l'usage des sols sur les patrons de distribution spatiale des communautés telluriques (Ranjard *et al.*, 2013). De nouveaux outils moléculaires permettent aussi de reconstituer les réseaux trophiques des agroécosystèmes et offrent la perspective d'étudier la réponse structurelle et fonctionnelle de réseaux d'interaction à des gradients paysagers (Bohan *et al.*, 2013). On peut enfin citer les évolutions récentes en simulation de paysages virtuels avec des outils qui permettent en partie de s'affranchir de l'expérimentation à l'échelle de paysages et d'identifier de nouvelles stratégies de gestion des assolements, prenant en compte à la fois les processus biophysiques et les contraintes socio-économiques des acteurs (voir la revue de Poggi *et al.*, 2018).

Les années récentes ont aussi été marquées par l'acquisition de connaissances « génériques » sur le fonctionnement écologique des paysages. On citera notamment la publication de plusieurs méta-analyses sur les effets de l'organisation des paysages sur la régulation des bioagresseurs (Veres *et al.*, 2013 ; Tuck *et al.*, 2014 ; Rusch *et al.*, 2016) qui mettent en évidence le rôle majeur des habitats semi-naturels et de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des mosaïques de cultures dans le paysage. Des travaux ont identifié les déterminants paysagers des communautés de pollinisateurs (Le Féon *et al.*, 2013 ; Werling *et al.*, 2014 ; Rollin *et al.*, 2015), et notamment le rôle clé de la distribution spatiale et temporelle de ressources florales (Nicholls et Altieri, 2013 ; Requier *et al.*, 2017).

Globalement, on peut faire le constat que les processus abiotiques sont de mieux en mieux intégrés dans le paysage, en considérant les agroécosystèmes et les milieux dans lesquels ils s'inscrivent, mais que les études se limitent souvent à un seul élément chimique. De la même façon, si certaines approches permettent de considérer plusieurs processus biotiques dans un même paysage, la plupart des études empiriques considèrent un processus écologique unique. Les analyses multifonctionnelles d'un paysage sont souvent basées sur l'utilisation de « proxy » (dérivés de liens supposés par exemple entre type d'habitat et fonctions) plutôt que sur la quantification de processus (et des interactions entre différents processus). On note quelques exceptions, par exemple des études scientifiques basées sur les dispositifs *Biodiversity exploratories* développés en Allemagne. Dans ces études, on peut dénombrer par exemple 14 types de mesure de diversité et de processus dans les compartiments telluriques et aériens en prairies (Allan *et al.*, 2015).

Dans le même temps, les recherches interdisciplinaires reliant sciences sociales et biophysiques à l'échelle des paysages se sont renforcées. Le cadre des systèmes socio-écologiques ou SES (Ostrom, 2009) a été largement mobilisé pour documenter les mécanismes et les conditions sociales et écologiques, leurs interrelations et leurs conséquences (Binder *et al.*, 2013 ; McGinnis et Ostrom, 2014 ; Rissman et Gillon 2017). On note le développement de projets de recherche-action visant à favoriser des actions collectives et des innovations agroécologiques à l'échelle des territoires (Berthet *et al.*, 2016). Du point de vue économique, l'évaluation des services écosystémiques à large échelle s'est fortement développée, en Europe comme ailleurs. On citera ici la contribution séminale de Ian Bateman et de son équipe à ces approches (Bateman *et al.*, 2013 ; Garnett *et al.*, 2013), avec des déclinaisons particulièrement pertinentes, par exemple l'évaluation du service de pollinisation à l'échelle de paysages (Bateman *et al.*, 2014). Les progrès dans la spatialisation des activités permettent des analyses coût-efficacité de différents scénarios d'organisation spatiale pour la provision de services

écosystémiques (Albers *et al.*, 2016). La question de la gouvernance est aussi traitée, par exemple par des analyses du gain à la coopération entre acteurs pour favoriser la fourniture de services écosystémiques (White *et al.*, 2012). Ces travaux apportent les bases de connaissance pour aborder la question des arbitrages sociaux entre services écosystémiques.

Quelques 'success stories' impliquant l'Inra

- *Paysage et service de contrôle biologique*

Les équipes Inra ont été très actives ces dernières années dans des projets de recherche documentant les effets du paysage sur les auxiliaires, les bioagresseurs et l'intensité du contrôle biologique, avec une utilisation en routine de proies sentinelles et l'interprétation des données de prédation. On citera les projets ANR Peerless, Landscaphid et Agrobiose, ainsi que des projets européens comme Farmland ou PURE et divers projets Ecophyto. Cette activité s'est traduite par la publication de méta-analyses ou revues portant spécifiquement sur paysage et biocontrôle portées par des chercheurs Inra (Veres *et al.*, 2013 ; Rush *et al.*, 2016) ou l'implication de chercheurs Inra dans des réseaux internationaux (Begg *et al.*, 2017 ; Karp *et al.*, 2018). Les principaux apports sont que si les habitats semi-naturels peuvent favoriser le biocontrôle dans les parcelles agricoles, la gestion des espaces agricoles à l'échelle du paysage peut être déterminante (par exemple, la proportion de paysage gérée en AB ; Henckel *et al.*, 2015 ; Muneret *et al.*, sous presse). Le suivi de dispositifs de réseaux de parcelles chez des agriculteurs indique que la variabilité des effets du paysage aux échelles locales s'explique en grande partie par des effets du paysage qui sont conditionnels de la gestion locale (Petit *et al.*, 2017 ; Ricci *et al.*, soumis). Les suivis menés sur les observatoires des pratiques à long terme dans les Zones Ateliers ont permis de mieux appréhender les effets de l'histoire de la gestion agricole des parcelles, de leurs bordures et des paysages sur les dynamiques écologiques (Marrec *et al.*, 2015 ; Alignier et Aviron, 2017). Ces travaux se sont accompagnés de la mise en place de réseaux d'observation à long terme sur des gradients paysagers et d'intensité de pratiques, notamment le Réseau national SEBIOPAG multicultures ou le réseau SAVI en viticulture en Aquitaine. On note enfin des développements méthodologiques pour les analyses de données à l'échelle paysagère (Miguet *et al.*, 2017 ; package SiLand de Carpentier et Martin, 2017).

- *Paysage et service de pollinisation*

La période 2012-2018 est marquée par des avancées des équipes Inra sur la compréhension de l'écologie de l'abeille domestique, l'importance de la distribution spatio-temporelle des ressources florales pour les pollinisateurs, l'impact des pesticides (notamment néonicotinoïdes) sur les colonies d'abeilles domestiques et l'importance du service de pollinisation pour les cultures oléagineuses à l'échelle des paysages agricoles. Ces avancées ont été permises par le dispositif ECOBEE (Odoux *et al.*, 2014) implanté sur la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre (Bretagnolle *et al.*, 2018). Le suivi des colonies et la veille palynologique dans les 50 ruches disposées dans des paysages contrastés ont ainsi permis de mettre en évidence l'importance de la flore adventice (coquelicot en particulier) pour la survie des abeilles domestiques, ressource indispensable entre les périodes de floraison de colza et de tournesol (Requier *et al.*, 2015), et l'impact négatif des néonicotinoïdes sur la colonie (Henry *et al.*, 2015). Plus récemment les expérimentations menées le long de gradients paysagers ont montré que la pollinisation par l'abeille domestique et les pollinisateurs sauvages augmente les rendements de colza et de tournesol de près de 35% (Perrot *et al.*, en révision ; Perrot *et al.*, soumis ; thèse financée à 50% par le métaprogramme EcoServ). Les résultats de ces travaux seront largement transférés aux agriculteurs et apiculteurs, grâce notamment au partenariat avec l'ITSAP, et plus largement aux conseillers techniques et enseignants avec le MOOC Abeilles & Environnement.

- *Epidémiologie végétale et animale à l'échelle des paysages*

Depuis une dizaine d'années, les questions de gestion des paysages agricoles pour limiter le risque épidémiologique constituent un enjeu majeur. En épidémiologie végétale, il s'agit de gérer la diversité intra- et interspécifique des cultures à plusieurs échelles d'espace et de temps en faisant appel à des concepts en épidémiologie, en écologie évolutive théorique et en écologie des paysages. L'Inra a commencé en interne sur des projets précurseurs. Il collabore maintenant étroitement avec le CSIRO de Canberra depuis 2012 avec le coencadrement de 2 post-doctorants et l'obtention de deux projets d'échange Inra-CSIRO. Côté Inra les travaux

impliquent aujourd'hui 5 unités et ils ont conduit jusqu'à présent à 7 publications (par exemple Burdon *et al.*, 2016 ; Papaix *et al.*, 2015, 2018) et à un package R dédié à l'épidémiologie des paysages agricoles (landsepi ; Rimbaud *et al.*, 2018). En épidémiologie animale, la prise en compte du paysage est beaucoup plus récente et a surtout porté sur les maladies vectorielles. Le projet européen EDENext (*Biology and control of Vector Borne Infections in Europe* ; coordination ASTRE et équipes EFPA et SA) a eu un effet structurant. Le projet ERA-Net Biodiversa SmallForest impliquant Dynafor puis l'ANR Woodnet coordonné par l'UMR BAGAP présentent aussi un volet sur les tiques et la borreliose de Lyme à l'échelle du paysage (Ehrmann *et al.*, 2017). Le paysage et ses conséquences sur les maladies à tiques étaient au centre du programme OSCAR (Outil de Simulation Cartographique à l'échelle du paysage Agricole du Risque acarologique) et qui a impliqué 3 unités Inra sur 2 zones ateliers (Armorique et Pygar ; Perez *et al.*, 2016).

- *Stratégies de gestion de la ressource en eau*

La question portée par la collaboration franco-indienne est celle de l'adaptation de l'agriculture irriguée, dans un contexte de rareté de l'eau et de changement climatique. L'observation s'est appuyée sur le bassin versant agricole de Berambadi (ORE BVET, IR OZCAR). La télédétection a permis de reconstituer l'expansion de l'irrigation et d'estimer les propriétés des sols. Une typologie des systèmes agricoles a été élaborée et leur vulnérabilité au changement climatique évaluée (Robert *et al.*, 2017a). Un modèle a été développé sur la plateforme RECORD qui intègre le modèle STICS calibré pour une diversité de cultures, le modèle hydrologique AMBHAS, un modèle économique et un modèle de décision, incorporant des dimensions de gestion adaptative tactiques et stratégiques (Robert *et al.*, 2017b). Les simulations suggèrent que des scénarios basés sur le renchérissement du coût de l'irrigation permettraient de stabiliser la ressource en eau mais entraîneraient la ruine pour de nombreuses exploitations (ou imposeraient le retour à une agriculture pluviale de subsistance ; Robert *et al.*, 2018). Des scénarios prenant en compte une meilleure répartition temporelle de l'irrigation et pénalisant les cultures dont les besoins en eau sont importants durant la saison chaude et sèche, apparaissent comme les plus prometteurs. Le projet se poursuit par l'ANR Atcha (début 2017) qui implique 4 départements (EA, MIA, SAE2, SAD), traduisant l'objectif d'adaptation de la gestion de la ressource en eau, en intégrant les contraintes environnementales et socio-économiques.

- *Stratégies des acteurs et santé des plantes*

Plusieurs projets récents menés à l'Inra renforcent le mouvement interdisciplinaire et les synergies entre sciences biophysiques et sciences sociales. Deux projets interdisciplinaires soutenus par le métaprogramme SMaCH ont porté sur les modalités et les conditions organisationnelles de l'existence d'une gestion collective paysagère de la santé des plantes. Le projet Fondu s'est intéressé à l'utilisation des fongicides en blé et vignes et a démontré que du fait des stratégies d'acteurs, le contexte de gestion des fongicides dans les territoires agricoles français est caractérisé par une combinaison de tragédie des communs et de tragédies des anti-communs, ce qui est un cas novateur dans la littérature sur les biens communs (Hannachi, en cours). Le projet Riz éternel montre que la biodiversité particulièrement élevée en riz cultivés assure la durabilité des rizières des terrasses du YuanYang en Chine. Cette biodiversité repose sur des normes sociales considérant les semences comme un bien commun (Hannachi et Dedeurwaerdere, *in review*) et son maintien peut être assurée si les acteurs mettent en place des '*mixed-form markets*' en visant collectivement à la fois des gains économiques et des objectifs de bien-être socio-écologiques non-monétaires, même si on peut observer des processus de déstabilisation de cette organisation (Dedeurwaerdere et Hannachi, *in review*) en identifiant des points de basculement socio-économiques. La modélisation économique-écologique menée dans l'ANR Peerless montre que le paysage influence l'efficacité de l'usage des pesticides surtout dans les situations où la production n'est pas intensive (Roques et Martinet, en cours). Des travaux identifient la composition optimale des paysages pour un rendement visé (Pérez-Urdiales et Martinet, soumis) ou une maximisation à la fois de la production et des abondances d'auxiliaires avec utilisation réduite de pesticides (Dakpo *et al.*, soumis).

Priorités scientifiques – fronts de science – priorités méthodologiques

Le groupe de travail a identifié quatre **priorités scientifiques et fronts de science** :

- **Analyser les effets de l'hétérogénéité à des échelles spatiales et temporelles emboîtées**

L'analyse des effets de l'hétérogénéité à différentes échelles d'espace et de temps reste un défi majeur en agroécologie. Répondre à cette priorité passe pour partie par un meilleur couplage entre les composantes abiotiques et biotiques, biophysiques et écologiques dans l'espace et le temps. Les progrès à venir nécessitent une meilleure compréhension de la dynamique de populations (par exemple de vecteurs de maladies), de populations en interaction (par exemple de pathosystèmes) et de communautés (par ex. d'ennemis naturels de ravageurs) dans des environnements hétérogènes et changeants. Le rôle des interfaces entre milieux cultivés et milieux semi-naturels (refuge, '*spill-over*', etc.) reste sous-documenté, que ce soit pour la gestion des maladies (Alexander *et al.*, 2014) ou la provision du contrôle biologique ou de la pollinisation (González-Varo et Vilà, 2017). Les effets de la diversification de la gestion agricole sur l'intensité et la stabilité des processus écologiques d'intérêt en agroécologie sont peu connus à l'échelle du paysage. Les effets de concentration et de dilution, de connectivité et de régulation des flux (zone tampon, zone source critique) induits par la configuration spatiale des mosaïques paysagères et les effets conditionnels de la gestion aux échelles parcellaires et paysagères sont encore mal compris. Le développement de modèles multi-organismes (en interaction) à l'échelle de paysages permettrait de mieux comprendre la provision de fonctions et services aux différentes échelles d'espace et de temps.

L'Inra est déjà très impliqué sur ces différentes questions, que ce soit en épidémiologie végétale ou animale (approches de modélisation), en écologie du paysage appliquée au biocontrôle et à la pollinisation (approches d'écologie comparative et d'expérimentation), et sur les flux d'éléments chimiques (pesticides, nutriments). Les recherches impliquent des chercheurs des départements EA, EFPA, MIA, SA, SAD et SPE disséminés dans la plupart des centres Inra et dont le point commun est la compréhension de processus biophysiques à l'échelle des paysages.

- **Développer des approches intégrées pour traiter de la multifonctionnalité des paysages**

Les processus abiotiques sont généralement considérés de manière compartimentée dans le paysage, et le plus souvent peu de processus écologiques sont considérés de façon simultanée (et encore moins en interaction). Les flux entre sol, eau et air sont de mieux en mieux couplés (cas de l'azote) mais cela reste l'exception. Les travaux traitant d'un ensemble de flux dans une vision intégrative sont rares. Au final, la question de la complémentarité ou de la synergie entre différentes fonctions n'est que peu abordée. Ces verrous limitent notre capacité à analyser plusieurs questions cruciales en agroécologie, et notamment en quoi la coexistence de systèmes de production différents au sein d'un même territoire permet une synergie de différentes fonctions.

Le développement d'études intégrées pour appréhender les impacts des systèmes de production à l'échelle paysagère sur les ressources et les organismes reste donc un défi majeur. Ce défi peut en partie être relevé par des approches de modélisation intégrée visant un meilleur couplage de processus pédologiques/hydrologiques/atmosphériques entre eux et avec des processus écologiques. L'étude des interactions entre flux abiotiques et biotiques reste embryonnaire, mais une réflexion récente à l'Inra a permis la présentation d'un cadre de modélisation sur ces aspects (Vinatier *et al.*, 2016). Le recours à la simulation de paysages nécessitera de nouveaux développements notamment pour intégrer les rétroactions entre le processus d'intérêt et la structure du paysage, prendre en compte la diversité des acteurs et accroître le réalisme des modèles de décision. Pour autant, la complexité d'un modèle intégrant ces différentes composantes est un facteur limitant et d'autres pistes sont proposées (voir plus loin). Dans ces approches intégrées, il semble crucial d'intégrer les sciences économiques et sociales dès l'amont (et non *a posteriori*). On peut regretter que les nouveaux

plafonds des demandes financières dans le cadre de projets ANR limitent aujourd'hui la capacité de l'Inra à monter des projets collaboratifs nationaux ambitieux sur ces thématiques.

L'Inra dispose de compétences dans l'étude de flux abiotiques (unités AGIR, EcoSys, LISAH, SAS) et des processus biotiques à l'échelle de paysages (unités Agroécologie, BAGAP, BioSP, CEBC, IGEPP, PSH, SAVE, etc.). Certaines unités d'économie, de sociologie ou de sciences de gestion sont investies sur ces sujets (unités CEE-M, Economie Publique, SAD-APT).

- **Rendre compte de la diversité des acteurs dans l'analyse des processus biophysiques à l'échelle des paysages**

La participation des acteurs est un facteur clé dans l'analyse des processus biophysiques dans un paysage, d'où l'importance des recherches sur les instruments de politiques publiques, les instruments plus volontaires tels les incitations non-économiques (*'nudges'*) et les processus de construction de cadrage commun et d'apprentissage collectif (*'community building'*) entre les acteurs des paysages. L'identification de mécanismes incitatifs permettant la coordination des différents acteurs du territoire pour promouvoir une gestion agroécologique des paysages demeure un enjeu majeur. Des chercheurs du département SAE2 s'intéressent à ces questions mais les forces sont limitées. Les équipes ont identifié un potentiel de collaboration fort sur cette thématique avec Chris Costello (UC Santa Barbara) qui a été professeur invité à Montpellier et qui souhaite poursuivre les interactions via une année sabbatique à Paris.

On note également que les modèles formels utilisés dans le cadre des systèmes socio-écologiques considèrent le comportement humain par le modèle de l'acteur rationnel et ne rendent pas compte de la complexité du comportement humain. Intégrer cette complexité dans des modèles formels est un front de science majeur en sciences de gestion (Schlüter *et al.*, 2017). Relever ce défi implique d'étudier des acteurs et des collectifs d'acteurs en interaction dans des études interdisciplinaires, incluant une interdisciplinarité intra-SHS (économie, sciences de gestion, sociologie, anthropologie) pour une meilleure intégration des différents aspects du comportement humain. Il semble également important de privilégier le lien à l'action (*'learning by doing'*) pour sortir de l'inertie des collectifs d'acteurs et du manque de preuves de concept de l'agroécologie à l'échelle des paysages. Les forces en présence à l'Inra sur ce thème sont à ce jour limitées.

Enfin, des chercheurs de MIA s'intéressent aux approches de modélisation multi-agents ou de décision sous incertitude, et aux moyens qu'elles offrent de coupler la modélisation de processus biophysiques et le comportement d'acteurs multiples et différenciés en interaction.

- **Accompagner la conception de paysages agroécologiques**

Les priorités précédentes doivent contribuer à la conception de paysages agroécologiques, s'appuyant sur un ensemble de fonctions et de services écosystémiques et rencontrant les demandes et l'organisation des acteurs.

Les paysages sont des échelles collectives et la mise en place et la gestion de fonctions écologiques à cette échelle impliquent une mobilisation collective des acteurs. Cette mobilisation peut être renforcée par le développement d'indicateurs et d'outils de décision pour les acteurs des paysages, d'autant plus s'ils sont co-construits avec ces acteurs via des dispositifs de recherche participative ou de recherche-action. De tels dispositifs induisent la sensibilisation et la participation des acteurs tout en offrant des perspectives de recherches interdisciplinaires novatrices. La modélisation et la simulation de processus biophysiques et écologiques, l'identification de règles de décision par diverses démarches (par exemple, métamodélisation), la modélisation d'accompagnement et les jeux sérieux

(*'serious game'*) sont des outils qui peuvent contribuer à la conception de paysages agroécologiques, et à des boucles de progrès dans le cadre d'une gestion adaptative. Plusieurs équipes Inra (Economie Publique, SAD-APT, BIOGER, Agronomie, MaIAGE, BIOSP) prévoient de coupler des modèles analysant la performance des paysages en termes de production, protection des cultures, bilan de gaz à effet de serre (GES), pollinisation et biodiversité pour identifier des paysages multiperformants (par exemple, projet API-SMAL du LabEx BASC).

Les **priorités méthodologiques** identifiées pour ce thème sont les suivantes :

- **Dispositifs d'acquisition de données**

L'analyse et la modélisation de processus spatio-temporels complexes, tels que ceux en oeuvre à l'échelle de paysages ruraux, sont souvent confrontées à la difficulté de disposer de jeux d'observations cohérents spatialement et répartis sur des durées significatives. Ainsi, pour la conception ou l'analyse de systèmes agroécologiques paysagers, trois priorités complémentaires sont à noter.

D'une part, la création de **sites d'observation et/ou d'expérimentation pluridisciplinaires** (*'experimental landscape ecology'*). Les observatoires ou les Zones Ateliers actuels peuvent être de bons candidats du fait de leur bonne documentation sur des durées avoisinant souvent de 1 à 3 décennies et de consortiums de recherche et développement bien rodés. Ils nécessiteront toutefois dans la plupart des cas d'être étendus au plan thématique (biophysique, biotechnique, SHS) et/ou instrumental afin de permettre une acquisition coordonnée de l'ensemble des données pour l'étude de systèmes de production agroécologiques. Il existe aussi un intérêt certain à favoriser l'émergence et la pérennisation de « réseaux » de paysages contrastés permettant de considérer de façon harmonisée des situations de production et des gradients paysagers importants. Un exemple de cette logique à l'Inra est le réseau national SEBIOPAG, réseau pour l'étude des services écosystémiques assurés par la biodiversité dans les paysages agricoles, qui rassemble des paysages localisés dans 5 régions françaises (Bretagne, Bourgogne Franche-Comté, Nouvelle Aquitaine, Occitanie, PACA) ²².

D'autre part, le **développement ou le renforcement des moyens d'observation**. Une attention doit être portée à l'utilisation et au test de nouveaux capteurs (proxi- et télédétection) afin de pouvoir accéder à des données haute densité et haut-débit pour l'ensemble des variables (biotiques, abiotiques et pratiques des acteurs), nécessaires pour l'analyse de la variabilité des phénomènes écologiques et agronomiques à l'échelle paysagère (lien avec le thème de l'ARP sur les agroéquipements).

Enfin, à cela peut être ajouté le développement d'**approches participatives** pour compléter l'observation scientifique par les connaissances expertes d'acteurs ou par des observations non formelles opérées par des acteurs non scientifiques ou professionnels. On pourrait également envisager la mise en place d'expériences économiques à grande échelle pour étudier les mécanismes incitatifs permettant d'enrôler les agriculteurs dans des mesures agro-environnementales de conception innovante (bonus d'agglomération, engagements collectifs, rémunération au résultat ...).

- **Gestion et analyses statistiques des données**

Les méthodes statistiques sont à adapter pour traiter de données hétérogènes. Les modèles à l'échelle des paysages sont multidisciplinaires (écologie, sociologie, agronomie) et doivent donc considérer une diversité de type de données (par exemple, comptage, occurrence, mesure spectrale, marque génétique) issues aussi bien des approches de *'big data'* (images aériennes, séquençage haut-

²² <http://sebiopag.inra.fr/>

débit, etc.) que d'observations plus ponctuelles telles qu'elles sont souvent réalisées en écologie. Dans ce cadre, les méthodes statistiques classiques ne s'appliquent plus. De nombreux outils ont été développés et sont maintenant utilisés assez couramment en écologie spatiale (régression PLS pour les multicolinéarités ou le traitement des '*big data*', arbre de décision et forêt aléatoire pour les variables hétérogènes et la prédiction, statistique spatiale via INLA, etc.). Cependant, les données actuelles sont de plus en plus spatio-temporelles. Elles demandent donc de caractériser des dépendances dans l'espace et le temps liées aux dynamiques des processus étudiés. L'extension des modèles issus de la statistique spatiale vers le spatio-temporel est encore en développement. Bien que des solutions sous R existent, un travail de transfert vers les non-spécialistes est nécessaire. Enfin, ce passage peut aussi se faire via la modélisation explicite des dynamiques des processus étudiés. Le développement de ces approches dites mécanistico-statistiques est en plein essor du fait des avancées en statistiques computationnelles (optimisation de problèmes complexes, statistiques bayésiennes, ABC, '*pattern oriented modelling*').

- **Approches de modélisation, de simulation et d'extraction de connaissance**

Une difficulté majeure est de trouver un compromis acceptable entre une modélisation trop complexe non gérable et une modélisation trop simpliste ne représentant pas (ou mal) les interactions aux échelles des paysages. La modélisation en environnement hétérogène s'oriente d'une part vers la modélisation intégrée ou ensembliste (couplage de modèles) pour étudier des systèmes complexes et des interactions entre processus, et d'autre part vers la méta-modélisation, c'est-à-dire la conception de modèle édictant des règles apprises des simulations faites sur des '*runs*' de modèles plus complexes pour mieux adapter la modélisation aux besoins des acteurs. Une autre stratégie pourrait être de combiner deux approches, d'une part de type plateforme MAELIA à Toulouse qui agrège des connaissances imparfaites, d'autre part des études ciblées pour approfondir les connaissances. Dans ce cas, les études ciblées peuvent être calibrées sur la base de données et de connaissances expertes mais les liens entre les briques demeurent difficiles à établir. L'approche expérimentale avec manipulation de paysage et suivi à long terme ou les dispositifs de type réseau de paysages contrastés sont dans tous les cas intéressants puisque répondant aux besoins de calibration/validation des modèles. La simulation de scénarios peut permettre de repérer des configurations spatiales et/ou temporelles pour une fonction ou pour un ensemble de fonctions visées. Elle permet d'avoir accès à de nombreuses variables agrégées à différentes échelles de temps et d'espace, ce qui la rend utile aux usagers pour comprendre, analyser ou décider. L'exploration des données de simulation demande de nouveaux développements en méthodes informatiques de type fouille de données et apprentissage (Bouadi *et al.*, 2017) mais aussi des avancées dans le domaine de la visualisation ou de la requête de données spatio-temporelles.

Les cadres de travail et partenariats

Les apports des départements et des métaprogrammes

- **Départements**

Les thématiques de ce thème sont traitées dans plusieurs départements de l'Inra :

- Département EA :

- Enjeu 2 – Objectif opérationnel 3. 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.

- Enjeu 3 – Objectif opérationnel 2. 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.
- o Département SPE : Priorité S-2.2. Comprendre les régulations trophiques et le service de pollinisation ; identifier les structures paysagères et les pratiques permettant de les mobiliser.
- o Département SA : Champ Thématique 3 : Epidémiologie, dynamique des processus pathologiques et infectieux (agents et vecteurs) : dynamique de populations ou communautés d’agents-de vecteurs-d’hôtes.
- o Département SAD : Priorité 1 - Agroécologie pour l’action (AEA).
- o Département MIA : Axe Méthodologique Extraction de connaissances à partir de données et modélisation intégrative de systèmes complexes ; CT2. Mathématiques et informatique pour la biologie des populations, l’écologie et l’épidémiologie ; Priorité Thématique 2. Modélisation de processus agroécologiques et application à la conception et l’optimisation de services écosystémiques par l’agriculture.
- o Département SAE2 : CT2. Protection de l’environnement, gestion des ressources naturelles et des territoires.
- o Département EFPA : Défi 1. Des processus et fonctions écologiques aux services écosystémiques (en lien avec la biodiversité). Priorité 1.2 : Comprendre le rôle fonctionnel de la biodiversité. Priorité 1.3 : Passer de la connaissance des processus aux services écosystémiques.

• **Métaprogrammes**

En parallèle, plusieurs métaprogrammes soutiennent ou ont soutenu des recherches sur les thématiques relatives à ce thème :

- o EcoServ a traité des liens entre composantes agronomiques et biologiques dans les agroécosystèmes à plusieurs échelles, et des fonctions et services fournis par la mosaïque agricole.
- o SMaCH a traité de nombreuses questions relatives au déploiement de stratégies de protection des cultures à l’échelle paysage et territoire, avec une ouverture aux SHS (stratégies d’acteurs).
- o ACCAF s’est intéressé aux impacts du changement climatique sur les ressources naturelles à l’échelle de paysages/territoire.
- o GISA s’est positionné explicitement dans le cadre de la dynamique *One Health*, à l’interface de la santé de l’animal et de l’homme. Il avait aussi pour vocation d’intégrer des programmes de recherche sur la santé animale à l’échelle du paysage (maladies zoonotiques, réservoirs dans la faune sauvage, maladies vectorielles, résistance aux antibiotiques ou autres xénobiotiques dans l’environnement...).
- o MEM a été le support du développement de connaissances sur les communautés microbiennes des sols et de la rhizosphère et sur leurs fonctions.

Enfin, des réseaux thématiques Inra traitent de questions centrales aux thématiques évoquées ici. On peut citer le réseau méthodologique PAYOTE qui traite de la représentation du paysage, la simulation dynamique des paysages, la fouille de données et l’initialisation de paysages virtuels, ainsi que l’analyse de l’impact du paysage sur les processus. Un autre réseau d’intérêt est ModStatSP (*Modélisation et statistique en santé des plantes* – réseau MIA-EA-SPE) qui rassemble des chercheurs autour de la thématique plante-bioagresseurs et de l’épidémiologie.

Outils et infrastructures mobilisés ou à développer

D'une manière générale, l'étude de processus en interaction à l'échelle du paysage se heurte au fait que les résultats sont souvent contingents à un site (site-spécifiques) donc peu généralisables. De ce fait, on aurait tendance à penser en termes de recherche « située ».

Dans le même temps, la multiplication des études de processus écologiques aux échelles paysagères a récemment stimulé les approches de type méta-analyse sur les effets du paysage sur quelques fonctions écologiques (lesquelles demeurent néanmoins encore rares). Ces méta-analyses se sont souvent révélées non conclusives mais ont permis de prendre toute la mesure : (i) du manque de références sur certaines questions ; (ii) du réel poids de la spécificité des sites ; et (iii) de la complexité des réponses écologiques, souvent tributaires des effets interactifs (conditionnels) de facteurs agissant à plusieurs échelles (notamment gestion parcellaire et paysage), effets non pris en compte dans les méta-analyses. Au final, une solution pourrait être de travailler sur un dispositif de type « réseau de paysages contrastés » dont on connaît initialement les différences intrinsèques (caractéristiques paysagères, systèmes d'exploitation et pratiques agricoles associées, historique des activités agricoles, etc.) et de rechercher au sein de ce réseau des signaux génériques (voir par exemple Ricci *et al.*, in prep). Quoi qu'il en soit, on peut faire le constat qu'il existe peu de données disponibles (ou des données dispersées) sur l'ensemble des composantes biotiques et abiotiques d'un paysage, et encore moins dans un réseau structuré de paysages.

En termes d'infrastructures, le réseau des Zones Ateliers (RZA) et divers SOERE sont mobilisés pour certaines recherches. Plus généralement, de nombreux sites de suivi/monitoring sont utilisés par les chercheurs Inra, sans être nécessairement labellisés. Il existe aussi des dispositifs de manipulation de la biodiversité pour en tester les effets sur les interactions biotiques et abiotiques (par exemple, ORPHEE-TreeDivNet, Plateforme CA-SYS sur l'UE de Dijon-Bretagne). Pour autant, les avancées discutées dans le cadre de ce thème présupposent une réelle pluridisciplinarité, où les méthodes existantes dans chaque discipline sont déployées sur un paysage/territoire unique sur lequel les acteurs ont une réelle volonté de s'engager dans une transition agroécologique. Il s'agit non seulement des ZA (voir par exemple Bretagnolle *et al.*, 2018) mais aussi de groupements d'acteurs comme certains GIEE ou Groupes Dephy-ferme. C'est aussi le cas des zones où une contrainte environnementale forte rend nécessaire une transition (zones à enjeu eau-biodiversité comme par exemple des aires d'alimentation de captage, milieux aquatiques eutrophisés, etc.).

Partenariats académiques nationaux et internationaux

Le partenariat académique national est déjà bien développé avec l'ensemble des instituts de recherche (CNRS, Irstea, CIRAD, INRIA) ainsi que de nombreuses universités et écoles d'ingénieurs. Il s'exprime dans des projets collaboratifs mais aussi, à plus long terme, sous la forme de réseaux formalisés, par exemple le réseau national RECOTOX²³, une initiative de l'Inra, du CNRS et d'Irstea, qui rassemble des expertises et des dispositifs instrumentés autour de l'écotoxicologie à l'échelle des paysages. Il demeure intéressant de développer les interactions entre chercheurs en biophysique, biotechnique et sciences humaines et sociales.

Les programmes supports internationaux sont diversifiés : H2020, Biodiversa, partenariat bilatéral Inra/CSIRO, etc. L'Inra s'investit aussi dans des réseaux thématiques (par exemple le réseau international SESYNC sur le contrôle biologique ; Karp *et al.*, 2018). De nombreux dispositifs/infrastructures sont des supports potentiels pour des collaborations internationales (LTOs, AnaEE, ILTER, TERENO). L'Inra a donc déjà de nombreuses collaborations internationales sur les

²³ <https://www.recotox.eu/>

thématiques traitées par ce groupe, avec notamment des équipes identifiées comme les meilleures équipes du domaine. L'expérience des '*biodiversity exploratories*' développés en Allemagne semble particulièrement pertinente pour cette thématique et des collaborations pourraient se renforcer. A noter qu'une réflexion est en cours pour mettre en place un partenariat recherche et formation avec la '*Bren School of Environmental Science & Management*' (University of California, USA) sur des aspects interdisciplinaires (incluant l'économie) relatifs à ce thème.

Partenariats socio-économiques et de transfert pour l'innovation

On dénombre de nombreux partenariats entre équipes Inra et Chambres d'Agriculture sur des problématiques paysagères, mais le plus souvent sur des fonctions précises ou des leviers particuliers (par exemple Agrotransfert Bretagne Territ'Eau sur les fonctions régulatrices des bordures de champ et des zones humides ripariennes). Certains partenaires de projets en cours (par exemple Réseau CIVAM, CDC Biodiversité) sont intéressés par l'étude de la performance de paysages agroécologiques. Les projets élaborés dans la perspective de l'appel d'offres du PIA sur les TIGA sont une opportunité de développer de nouveaux partenariats socio-économiques et d'aborder de nouvelles questions avec les acteurs des territoires. C'est notamment le cas du projet « Dijon, territoire modèle du système alimentaire durable de 2030 » porté par Dijon Métropole et développé en étroite collaboration avec l'Inra sur la transition du Grand Dijon vers une agriculture « agroécologique » par et pour les acteurs.

Valoriser la diversité génétique en sélection végétale et animale

Périmètre, bilan et priorités

Périmètre

Par définition, un système agroécologique mobilise la diversité biologique à tous ses niveaux d'organisation et de fonctionnalité. Cependant, la littérature considère le plus souvent le niveau taxonomique de la diversité et les interactions entre espèces. Le périmètre de ce groupe de travail est d'abord la diversité génétique intra-spécifique, mais il peut être étendu aux associations d'espèces et à la domestication de nouvelles espèces.

Les enjeux cognitifs sont :

- D'évaluer la contribution de la diversité génétique à la performance des systèmes agroécologiques des cultures et des élevages.
- De comprendre les mécanismes d'action de cette diversité, ainsi que l'effet de la gamme de diversité et de la gamme de variation environnementale sur l'amplitude des interactions « Génétique x Environnement ».
- D'identifier les traits d'intérêt majeurs impliqués dans les interactions plantes/plantes et animaux/animaux pour le maintien de la diversité et la performance agroécologique des cultures d'une part, de l'élevage d'autre part, et pour favoriser les complémentarités entre cultures et élevage.
- De définir la gamme de diversité permettant l'expression des mécanismes favorables au développement de systèmes de production plus robustes (= supportent plus facilement les aléas), plus résistants (= absorbent les chocs sans se déformer), et plus résilients (= reprend plus facilement une forme d'équilibre après la « déformation » induite par les aléas).

Les enjeux finalisés sont :

- De définir des critères de sélection et les gammes de variabilité génétique favorables de ces critères pour le fonctionnement agroécologique de l'unité de production.
- De développer des schémas de sélection innovants qui prennent en compte des objectifs de diversité.
- De définir le déploiement spatio-temporel de la diversité en relation avec le service attendu.
- De lever les verrous liés à : (i) l'évaluation et l'inscription des cultures diversifiées ; (ii) la difficulté de gestion et l'augmentation du travail de l'agriculteur/éleveur en cultivant/élevant la diversité ; (iii) la diminution de garantie de qualité qui peut être engendrée par la diversité ; et (iv) l'automatisation des processus de transformation et la standardisation attendue pour le produit final.

Les avancées scientifiques majeures des 3-5 dernières années

Les travaux considérant la contribution de la diversité génétique infra-spécifique au développement de systèmes agroécologiques sont récents et ont émergé chez les plantes un peu plus tôt que chez les animaux. La nouveauté de cette approche a été explorée et discutée par des articles de synthèse en 2015 chez les plantes (Litrico et Violle, 2015) et en 2016 chez les animaux (Phocas *et al.*, 2016a, 2016b). L'utilisation de la diversité diffère actuellement entre systèmes végétaux où une seule variété homozygote peut représenter la majeure partie des cultures d'une espèce (blé par exemple) et systèmes animaux où il existe une part importante de diversité intra-troupeau, même dans les races fortement sélectionnées (vaches laitières par exemple). Malgré cette différence, les

concepts mobilisés et les constats réalisés présentent de nombreux points communs à la sélection animale et à la sélection végétale.

En ce qui concerne les peuplements cultivés, outre les mélanges variétaux sur lesquels la littérature ancienne est relativement fournie, en particulier en ce qui concerne leur plus-value sur le contrôle des maladies, les principales avancées concernent la mise en évidence du rôle positif de la diversité génétique sur le fonctionnement des communautés végétales et les mélanges d'espèces. Certaines références récentes (Zuppinge-Dingley *et al.*, 2014 ; Prieto *et al.*, 2015 ; Schöb *et al.*, 2015 ; Van Moorsel *et al.*, 2018 ; Isbell *et al.*, 2017) ont mis en évidence des effets de la diversité génétique sur le fonctionnement des communautés. Des études sont en cours sur le sujet au sein du département BAP et certains résultats récents ont montré un effet positif de la diversité génétique sur, d'une part, la stabilité de production de biomasse et la résistance à la sécheresse de mélanges spécifiques (Prieto *et al.*, 2015 ; Meilhac *et al.*, 2018), et d'autre part sur la structuration des espèces composant un mélange cultivé (Meilhac *et al.*, 2018). Une **place de leader** pourrait ainsi être occupée par l'Inra sur les relations entre la **diversité génétique**, le **fonctionnement des communautés** et la **fourniture de services écosystémiques** dans les agroécosystèmes en relation avec l'**amélioration des plantes**.

L'inclusion et la prise en charge de cette diversité génétique dans la sélection et les schémas de sélection sont aussi relativement peu fréquentes dans la littérature récente (notons tout de même pour les mélanges variétaux la revue de Barot *et al.*, 2017), en particulier lorsque l'on s'intéresse aux couverts multispécifiques. Mais certains projets en cours ou récemment terminés s'appuient sur de la méthodologie ancienne développée pour les mélanges variétaux ou les populations composites. Un exemple de résultat récent dans ce domaine, qui s'inspire d'une publication plus ancienne sur le sujet (Wright, 1985), est en cours de valorisation (Sampoux *et al.*, *in review*). Il concerne la sélection pour les mélanges d'espèces et est issu de l'évaluation théorique de trois schémas de sélection pour l'aptitude à l'assemblage interspécifique : un schéma basé sur la sélection des espèces en pur, un schéma basé sur la sélection de l'aptitude réciproque à l'association (S-ARA) et un schéma basé sur l'aptitude générale à l'association (S-AGA). La comparaison des gains attendus à ceux de la sélection habituellement pratiquée sur des tests de descendance en condition mono-spécifique a montré que lorsque la sélection porte sur des traits soumis à des effets génétiques de compétition/facilitation, la sélection sur les performances en culture pure ne permet pas d'atteindre un gain génétique sur la performance du mélange aussi important que les méthodes conçues pour l'amélioration des performances en mélange. Autrement dit, il est pertinent de **modifier les schémas de sélection si on souhaite proposer les meilleures associations variétales**.

Une des problématiques portant sur les mécanismes sous-jacents à l'effet de la diversité, et qui s'étend aux traits à sélectionner pour des cultures diversifiées tire parti de la littérature de l'écologie des communautés pour définir des hypothèses sur les traits majeurs. Litrico et Violle (2015) ont proposé de relier certains traits majeurs avec la dynamique de croissance, la phénologie et l'architecture aérienne, mais il existe encore peu de preuves expérimentales sur le sujet (voir tout de même Meilhac *et al.*, *in review* et la revue de Barot *et al.* 2017 sur les mélanges variétaux).

Le développement de la sélection participative pour les céréales est un autre type d'avancée scientifique, qui joue sur l'organisation de la sélection et la valorisation de ressources génétiques en même temps que sur la détermination des critères. La France est dans le top 5 de ce domaine. Les travaux récents (Vindras-Fouillet *et al.*, 2014 ; Thomas *et al.*, 2015 ; Rivière *et al.*, 2015a, 2015b ; Barbillon *et al.*, 2015 ; Demeulenaere & Goldringer, 2017 ; Demeulenaere *et al.*, 2017) sur la sélection participative ont permis des avancées méthodologiques sur l'évaluation à la ferme de « variétés populations », permettant la comparaison de leurs performances dans des réseaux d'essais grâce à l'utilisation de statistiques bayésiennes, mais aussi le développement d'une base de donnée dédiée

(Shinemas), centrale dans la gestion des informations, les analyses de statistiques et génétique des populations (package R PPBstats), et les retours faits aux praticiens. Par ailleurs, le nombre croissant d'agriculteurs et de populations gérées par ces derniers témoigne de l'intérêt de ces pratiques par les sélectionneurs.

En sélection animale, l'objectif de concilier progrès génétique et maintien de la diversité intra-race est en fait un sujet ancien, avec des travaux méthodologiques qui proposent soit de maximiser le progrès génétique à niveau de consanguinité fixé, soit de minimiser l'augmentation de consanguinité à niveau de progrès génétique fixé. Ces travaux reposaient uniquement sur l'utilisation des relations de parenté et l'application de ces méthodes a été révolutionnée par le séquençage des génomes et l'accès à un marquage dense du génome, qui permet de caractériser et de piloter la diversité à un niveau bien plus fin en analysant la variation de diversité en fonction de la région du génome. Cette évolution culmine avec le développement de la **sélection génomique**, dont la publication fondatrice date de 2001 (Meuwissen *et al.*, 2001), mais qui a dû attendre la généralisation d'outils de génotypage peu coûteux et l'amélioration des méthodes de calcul avant d'être appliquée en routine depuis maintenant dix ans chez les bovins. Des méthodes ont alors été développées pour estimer la part génétique des interactions sociales afin de traiter les questions de bien-être animal, en modélisant l'influence d'un animal sur les performances des autres animaux au sein d'un même groupe ; là aussi la génomique vient améliorer la puissance de prédiction des interactions pour diminuer l'impact des comportements de cannibalisme (Alemu *et al.*, 2016), mais ces méthodes ont encore été peu considérées pour d'autres caractères (qui restent à identifier dans le cadre de systèmes agroécologiques performants) que le bien-être. Un exemple est donné par Bergsma *et al.* (2008) sur l'efficacité alimentaire chez le porc.

La vision actuelle en génétique animale repose soit sur la diversité de l'offre des reproducteurs pour l'adaptation aux besoins plus ou moins locaux (cas des ruminants), soit sur une plus grande combinatoire de lignées pour le croisement (porc ou volailles). Mais le niveau de diversité intra-troupeau n'est pas un objectif en soi, alors que Blanc *et al.* (2013) ont montré par la modélisation que les troupeaux diversifiés (diversité intra-race dans le troupeau) sont plus stables, rejoignant ainsi des constats faits en génétique végétale avec les mélanges variétaux et les mélanges d'espèces.

Dans le cas des forêts, les voies favorisées pour valoriser la diversité génétique sont :

- L'enrichissement génétique des peuplements, avec toujours un objectif de maintenir la diversité (*in situ*) pour les climats de demain et favoriser la création de diversité en mélangeant des pools génétiques qui vont se croiser entre eux (provenances allochtones ou variétés améliorées de la même espèce que le peuplement en place, voire dans certains cas espèces apparentées pouvant s'hybrider).
- L'utilisation d'espèces exotiques, qui n'est pas nouvelle et se fait souvent dans des systèmes de plantation-replantation (Douglas par exemple). Mais les espèces introduites peuvent aussi se régénérer naturellement (cèdre par exemple). Ce type de peuplement, si sa diversité génétique est suffisante, présente l'avantage de limiter la consanguinité dans les premières générations.

Ces deux stratégies innovantes combinant plantation et régénération naturelle, enrichissement génétique et espèces introduites en régénération, comportent des risques et des avantages qu'il faut bien évaluer : c'est une source supplémentaire d'incertitudes à gérer.

Quelques 'success stories' impliquant l'Inra

C'est dans le domaine végétal que les 'success stories' les plus visibles ont été identifiées :

- *Projets ANR PRAISE et Wheatamix (2013, coordination Inra – suite premier chantier agroécologie)*

- Le projet PRAISE, retenu pour financement en 2013 dans le cadre de l'appel ANR BIOADAPT, était focalisé sur la prairie temporaire semée plurispécifique dont la diversité intra- et interspécifique est une composante intrinsèque jusqu'ici peu exploitée. L'objectif général était de poser les bases génétiques et écologiques de l'amélioration des espèces destinées à une utilisation en mélange en s'appuyant sur l'étude des prairies devant faire face aux aléas climatiques. Plus spécifiquement, il s'agissait (i) d'identifier les conditions génétiques et écologiques qui favorisent une production importante et stable des prairies multispécifiques au cours du temps ; et (ii) de fournir les bases théoriques d'un schéma de sélection innovant des espèces fourragères prairiales dans la perspective d'une utilisation en mélanges plurispécifiques. Le projet a travaillé à l'interface de plusieurs disciplines (génétique quantitative, écophysiologie, écologie fonctionnelle des communautés, génétique des populations) en combinant expérimentations et modélisation pour l'analyse et la compréhension de l'effet de la distribution des caractères fonctionnels. Le couplage des modèles individu-centré et de l'approche fonctionnelle a permis une prise en compte efficace de la variabilité génétique intraspécifique. Un **effet complémentaire** de la **diversité spécifique** et de la **diversité génétique** (intrasécifique) dans la production des communautés a été mis en évidence (Prieto *et al.*, 2015). Alors que la diversité spécifique améliore la production de biomasse cumulée en régime hydrique limitant, la diversité génétique quant à elle influence positivement la stabilité de la production des communautés prairiales semées dans les conditions testées. Par ailleurs, l'analyse de la variabilité de la morphogenèse aérienne et racinaire d'un large panel d'espèces choisies pour leur importance agronomique et leurs traits morphologiques contrastés a permis : (i) de vérifier que les hypothèses sur lesquelles était fondée la morphogenèse dans le modèle L-legume étaient robustes ; et (ii) de récolter les données nécessaires au paramétrage de ce modèle pour un large panel de morphotypes (Louarn et Faverjon, 2018).
- Le projet WHEATAMIX, retenu pour financement en 2013 dans le cadre de l'appel ANR AGROBIOSPHERE avait pour but principal de mieux évaluer le rôle possible des **associations variétales intra-champ** pour renforcer la multifonctionnalité et la résilience des systèmes agricoles dans le contexte du changement global. WHEATAMIX s'est focalisé sur la production de blé dans le bassin parisien. Il reposait sur une approche pluridisciplinaire impliquant des généticiens, agronomes, écophysiologistes, écologistes, économistes, chercheurs en sciences de la gestion et des acteurs de la filière (chambre d'agriculture, agriculteurs). Le projet s'est attaché à mieux comprendre les interactions entre variétés, et avec le milieu, pour obtenir des associations performantes, que ce soit en terme de rendement et de qualité, de services écosystémiques ou encore de débouchés pour la production. Il visait notamment à établir de façon participative des règles d'assemblage des variétés, et à évaluer leur pertinence dans différents contextes de production.

- *Projet « Riz éternel »*

Le projet « Riz éternel » a été soutenu dans le cadre du métaprogramme SMaCH. Lancé en 2014, ce projet vise à étudier la gestion durable des résistances variétales du riz dans les rizières chinoises de Yuanyang inscrites au patrimoine mondial de l'Unesco (sud du Yunnan). Il combine des approches de génétique, de génomique, d'analyse des réseaux sociaux et de modélisation. Dans cette région où les agriculteurs n'utilisent pas de fongicide, le riz est étonnamment préservé des épidémies. Si la présence de *Magnaporthe oryzae* y est avérée, ces rizières ne sont que très peu affectées par le champignon. Or, deux types de variétés de riz sont co-cultivés : du riz ordinaire (Indica) et du riz gluant utilisé pendant les fêtes (Japonica). Les travaux ont montré que les variétés Japonica présentent une forte immunité basale et peu de gènes de résistance tandis qu'à l'inverse, les variétés Indica possèdent une faible immunité basale et beaucoup de gènes de résistance. Ces deux types de variétés de riz ayant des systèmes immunitaires si différents ont conduit à l'existence de deux populations spécialisées de champignons capables d'infecter des variétés spécifiques de riz. Ces deux « armées » d'agents pathogènes ultra-spécialisées sont donc incapables de combattre sur tous les fronts (même si localement dans certaines parcelles, quelques « batailles » sont perdues par les plantes) et le champignon ne peut alors pas se disperser dans le paysage. Cette étude fait le lien entre deux des articles les plus cités en biologie des plantes ces quinze dernières années (Zhu *et al.*, 2000 ; Jones et Dangl, 2006). Le premier porte sur un modèle de l'immunité des plantes (modèle zig-zag) qui prédit qu'un mélange approprié entre immunité basale et gènes de résistance

pourrait accroître la durabilité des résistances. Le second décrit un exemple chez le riz de succès d'utilisation de la diversité des plantes comme générateur de durabilité de la résistance à la pyriculariose. Ces résultats montrent que le **déploiement de systèmes immunitaires diversifiés** permet de développer des agrosystèmes présentant une **protection des plantes durable**. Ils ouvrent des perspectives pour d'autres plantes de grande culture (blé notamment).

- *Marque pour les semences de mélanges prairiaux Jouffray Drillaud « M les Mélanges ».*

Après plusieurs années de recherche et de sélection spécifique dédié aux mélanges fourragers multi-espèces, Jouffray-Drillaud, filiale de Terrena, a lancé « **M les Mélanges** », **gamme innovante de mélanges fourragers multi-espèces**, dont le comportement de chacune des variétés a été testé en situation de mélange, afin de pouvoir garantir à l'éleveur des performances techniques aux champs et jusqu'à l'auge, et ce, sur la durée. Les compositions fourragères avaient jusque-là résulté de l'association de variétés spécifiquement sélectionnées, testées et évaluées pour leur performance en association, pour, au final, plus de productivité, un fourrage plus équilibré et une haute valeur alimentaire. Afin de mettre au point ces compositions d'un nouveau genre, l'aptitude à la compétition entre espèces, la vitesse d'implantation et la résilience ont été, pour la première fois, prises en compte. La mise au point de ces compositions est le fruit des travaux menés par Jouffray-Drillaud pendant 4 ans sur la station de Saint-Sauvant (86) en collaboration avec l'Inra de Lusignan dans le cadre du projet PRAISE (voir plus haut) ainsi que du résultat des essais de la ferme expérimentale des Bordes (OIER/ARVALIS).

- *Projet H2020 ReMIX*

Le projet ReMIX (*Redesigning European cropping systems based on species MIXtures*), qui a démarré en 2017 et est coordonné par l'Inra, a pour objectif **d'exploiter les avantages des mélanges d'espèces**, essentiellement céréales et légumineuses à graines, pour concevoir des systèmes de culture agroécologiques plus diversifiés et résilients face aux aléas (économiques ou climatiques), et moins dépendants des intrants (engrais chimiques, pesticides...). Basé sur une approche pluridisciplinaire et multi-acteurs, ReMIX doit produire de nouvelles connaissances scientifiques transférables en agriculture conventionnelle et biologique. Il aborde les questions pratiques pour élaborer des solutions adaptées à la production des principales cultures de céréales et aux différentes conditions pédoclimatiques rencontrées en Europe. Les axes de travail du projet sont : (i) Réduire les facteurs qui freinent l'adoption de mélanges d'espèces par les agriculteurs et leur intégration dans les chaînes agroalimentaires ; (ii) Décrypter les interactions plante-plante pour optimiser l'usage des ressources (eau, azote, lumière) ; (iii) Déterminer l'influence des mélanges d'espèces dans le contrôle des maladies, ravageurs et adventices et dans la réduction des pertes de rendements ; (iv) Démontrer le rôle des mélanges d'espèces en améliorant l'apport de services écosystémiques et le développement de la résilience aux stress biotiques ; (v) Créer de nouvelles méthodes de sélection et de phénotypage, ainsi que de nouveaux outils adaptés aux mélanges d'espèces ; (vi) Produire du matériel végétal innovant (lignées et variétés) adapté aux mélanges légumineuses-céréales ; (vii) Développer des règles génériques pour les associations d'espèces en utilisant des modèles de simulation pour une production efficace de cultures commerciales ; (viii) Développer de nouvelles techniques culturales pour optimiser la performance des mélanges d'espèces ; (ix) Optimiser les paramètres et spécifications des machines agricoles pour la récolte et la séparation des espèces récoltées en mélange ; et (x) Développer une boîte à outils, un '*serious game*' éducatif et des fiches techniques pour les agriculteurs et conseillers agricoles. Le projet intègre à la fois l'identification des besoins des utilisateurs finaux, la co-conception des expérimentations au champ et dans les exploitations agricoles et l'évaluation de nouvelles variétés et pratiques.

- *Colloque Eucarpia sur « breeding for the mixtures » en 2018*

L'Inra était représenté dans le conseil scientifique du **premier colloque sur la sélection végétale pour les mélanges**, organisé en février 2018 à l'Université de Kassel par la section « Agriculture biologique et à bas niveau d'intrants » de l'Association Européenne pour l'Amélioration des Plantes (EUCARPIA). Il était organisé en partenariat avec les projets ECO-PB, DIVERSify, INSUSFAR, HealthyMinorCereals, LIVESEED, ReMIX et Wheatamix.

Dans le cas des animaux, les '*success stories*' sont proportionnellement moins nombreuses, et de trois types :

- Quelques études mobilisent la diversité génétique pour le développement de nouveaux systèmes de production, plus résilients qui peuvent être qualifiés d'agroécologiques *a posteriori* ; c'est particulièrement le cas de projets développés en climat chaud dans un

contexte expérimental et partenarial (travaux Inra en Guadeloupe) ou dans un contexte d'aide au développement (programme d'une ONG pour la sélection de la vache laitière en Inde, financée par la fondation Bill & Melinda Gates) ; dans le cas de ce dernier programme, la méthode est participative et permet un usage raisonné du croisement avec le maintien des capacités d'adaptation des animaux à un climat chaud.

- Quelques études ont permis d'associer la production sous signe de qualité au maintien de la diversité génétique, l'exemple emblématique étant le poulet de Bresse, mais dans ce cas, l'objectif est la qualité du produit associée au maintien de la diversité génétique et pas le développement d'un système exploitant les régulations biologiques pour être résilient.
- De nombreuses études identifient des marqueurs génétiques liés à des caractères favorables au développement de systèmes agroécologiques mais ces marqueurs ne sont pas encore mobilisés pour la mise en place de ces systèmes agroécologiques. Les caractères concernés sont notamment l'efficacité alimentaire (substitution alimentaire, diminution des intrants et de la pollution ; projets chez les ruminants, les volailles, les poissons) et la résistance aux maladies (addition de critères de résistance aux maladies dans les programmes de sélection, diminution des intrants).

Priorités scientifiques – fronts de science – priorités méthodologiques

Les **priorités scientifiques** identifiées pour ce thème sont les suivantes :

- Développer la **génétique des interactions G×M×E×C×P**, avec :
 - G : Variabilité génétique entre individus (plantes, animaux, arbres) et entre populations ;
 - M : Variabilité de l'environnement microbien : microbiote intestinal, microbiote de la feuille, des racines, du sol...²⁴ ;
 - E : Variabilité du milieu (climat, ressources en eau, système hydrologique, distribution des sols...) et prise en compte des interactions avec le fonctionnement de l'agroécosystème ;
 - C : Conduite de l'exploitation, du système de production et du système de culture, avec notamment la question de la modélisation des choix de l'agriculteur ;
 - P : Variabilité de la matière première issue d'exploitations agroécologiques, qui remet en cause le paradigme selon lequel la transformation peut gommer la diversité initiale.
- Développer des démarches couplées de **conception de systèmes de culture associés à différentes variétés ou mélanges**.
- Coupler les travaux sur l'**évaluation multicritère** menés sur la plateforme pluri-département MEANS avec la problématique de **pondération des objectifs de sélection**. Les départements GA et BAP ne participent pas à MEANS et pourtant l'évaluation génétique est toujours multicritère.
- Développer des **stratégies de sélection pour des populations en mélanges** de diverses races/lignées ou pour une utilisation en croisement permettant de mieux répondre aux besoins des systèmes à faibles niveaux d'intrants.
- Développer la **co-construction avec les acteurs** : Quels modes d'organisation des acteurs pour quelle méthode de sélection ? Comment définir une ressource génétique adaptée ?
- Utiliser la diversité pour **équibrer le produit final** au lieu de gommer la variabilité par un processus de transformation qui altère le matériau de base suppose d'accepter de revoir les *process*. Il convient également de se poser la question de savoir si la variabilité initiale ne pourrait pas être un atout.

²⁴ La sélection végétale parle de phénotype augmenté ; la sélection animale identifie le microbiote comme une nouvelle composante de la prédiction des performances ; la notion d'holobionte (individu + microbiome) se développe.

Pour conduire ce type de recherches, il faut aussi lever certains verrous. Les approches en génétique animale ou végétale vis-à-vis de la valorisation de la diversité génétique pour l'agroécologie convergent bien entre elles. La convergence est en revanche plus difficile avec les départements qui ont une approche « système ». Même si certains projets exploratoires proposent de relancer l'utilisation du croisement chez les ruminants (Salamix, Oasys, Aster-Mirecourt), le plus souvent la diversité génétique n'est pas considérée comme un paramètre prioritaire dans les expérimentations systèmes alors que l'agroécologie se caractérise par son approche système et que la diversité génétique est un levier à considérer. Les races rustiques ou à petits effectifs, réputées adaptées au milieu et aux pratiques qui les ont façonnées, font pourtant l'objet d'une littérature ancienne mais aussi plus récente sur les services spécifiques qu'elles rendent (voir par exemple Nozières-Petit et Lauvie, 2018). La même situation se rencontre avec les travaux du département SAE2 qui n'intègrent pas la dimension « variabilité génétique » dans les modèles développés, notamment parce que les données manquent. Des collaborations entre SAE2 et GA d'une part et BAP d'autre part devraient permettre d'accéder à des données, ou du moins de savoir comment les simuler dans un modèle.

Deux **fronts de science** majeurs ont été identifiés :

- Comprendre et estimer la **variabilité génétique des interactions** au sein des peuplements complexes. L'objectif est de développer des méthodes de sélection pilotant ou tirant parti de la variabilité génétique des interactions dans les espèces. A ce front de science sur les interactions plante/plante ou animal/animal, l'approche basée sur les traits apporte un aspect fonctionnel et laisse la possibilité d'obtenir des critères de sélection chez les plantes et les animaux.
- Etudier les relations entre la **diversité génétique** des cultures ou des élevages et les **services systémiques** qu'elles/ils doivent fournir au travers de la valorisation de la diversité intraspécifique (Nozières –Petit et Lauvie, 2018). Les questions sur (i) la marge de progrès que peut conférer le levier génétique sur l'amélioration des services écosystémiques ; (ii) la gamme de diversité efficace et son déploiement dans le cadre d'environnements hétérogènes où l'interaction GxE devient centrale ; et (iii) l'identification des traits des plantes et des animaux qui doivent être diversifiés ou qui ne doivent pas l'être pour optimiser les services attendus en maintenant des niveaux de production décents, doivent être approfondies. L'Inra pourrait prendre le leadership à l'échelle européenne sur ces sujets compte tenu de ses compétences et orientations.

Mettre en œuvre les recherches concernant les priorités scientifiques évoquées précédemment implique d'aborder plusieurs **priorités méthodologiques** :

- La **modélisation des interactions** suppose à la fois de développer des méthodes et de coupler les modèles, mais aussi de collecter un grand nombre de données. Les dispositifs habituels, en unités expérimentales, n'offrent pas assez de combinaisons possibles pour permettre l'expression de l'adaptation des génotypes à un système agroécologique. La sélection dans un système changeant (environnement et espèces d'intérêt) doit impliquer l'aval et associer les agriculteurs/éleveurs sur un mode participatif. Des réseaux de fermes en conditions réelles et d'autres dispositifs co-construits pourraient s'avérer particulièrement utiles à l'étude de l'adaptation, mais il faut optimiser ces nouveaux dispositifs.
- Le développement **d'approches fonctionnelles en conditions expérimentales** permet, de façon complémentaire, de déterminer les traits majeurs de la réponse des individus aux conditions de milieu (sols, climat, nutriments) et de proposer des critères de sélection.
- Il conviendrait de **combinaison la collecte de données** « en ferme » et la collecte de données en milieu expérimental mieux connu (phénotypage fin). Une façon d'améliorer la « réutilisabilité » des protocoles animaux serait de prévoir le génotypage systématique de tous

les animaux inclus dans des expérimentations « système », avec un outil de génotypage commun pour pouvoir regrouper les données et rechercher des associations marqueur-caractères robustes dans différentes conditions de milieu.

- La **conception de systèmes de culture** incluant le levier génétique est aujourd'hui extrêmement rare et se révèle compliquée en raison notamment (mais pas uniquement) de la difficulté d'articuler les niveaux d'organisation, les approches, les méthodes, ... reliés aux fronts de sciences disciplinaires. Cela pose les questions de la place des unités expérimentales dans le cadre de la recherche d'innovation et de la pertinence des expérimentations « système » pour les généticiens.
- Il faut aussi acquérir des données sur les liens entre **caractéristiques génétiques** initiales et **qualité** du produit final (lien génotype-phénotype) d'une part, et entre **processus naturels** et **processus industriels** d'autre part. L'élaboration du produit étant la dernière étape avant le consommateur, c'est une étape déterminante de l'acceptabilité de systèmes plus biodivers.
- En cohérence avec les réflexions du Thème 3, il s'agit de **modéliser les interactions au sein des peuplements**, par exemple grâce à des modèles individu-centrés, qui intègrent les pressions de sélection locales dues au « voisin » qui modifie les paramètres abiotiques. L'échelle d'application est la parcelle ou le troupeau mais cette approche est encore peu développée, notamment en génétique animale.

En ce qui concerne les apports possibles de la **recherche participative**, un groupe de travail a été constitué par le département BAP pour réaliser un état des lieux et proposer des pistes de recherche et les priorités méthodologiques correspondantes. Le rapport est en cours de finalisation. Un groupe de travail similaire devrait être organisé par le département GA.

Les cadres de travail et partenariats

Les apports des départements et des métaprogrammes

• **Départements**

- Les départements BAP et GA sont en 1^{ère} ligne. Le passage des déclarations du schéma stratégique de département sur la mobilisation de la diversité génétique pour l'agroécologie à l'ouverture de profils de recrutement est acté à BAP et il prend forme dans GA.
- Au sein de SAE2, les travaux portent sur l'innovation par le choix d'intégrer de la diversité, l'étude des impacts associés sur le travail et le système de production.
- En ce qui concerne le département SAD, les travaux portent sur la sélection participative, la conception d'outils d'aide à la décision pour des mélanges d'espèces, l'adéquation entre dispositifs de gestion des ressources génétiques et diversité des milieux productifs ainsi que sur le lien entre projets de sélection, diversité intra-troupeaux et formes de production alternatives encouragées par l'agroécologie.
- Le département EFPA s'intéresse notamment au '*breeding without breeding*' : amélioration sans croisement, exploitation des croisements spontanés et méthodes spatiales pour valoriser les observations sur les arbres adultes.
- Une question centrale pour le département EA est l'impact de nouveaux environnements de production sur les interactions GxE et pour la définition d'idéotypes. L'évaluation multicritère est centrale.
- Le département PHASE s'intéresse à la variabilité individuelle des phénotypes en considérant la mixité interspécifique et la mixité intraspécifique. La variabilité individuelle

est un levier de régulation du troupeau mais la part génétique de cette variabilité reste à étudier.

- o Pour le département SPE, réintroduire de la diversité est un élément central, peu controversé, dans le contrôle de maladies, de ravageurs ou d'adventices. Le niveau nécessaire et suffisant à introduire reste une question, en parallèle de l'identification permanente (et nécessaire, compte-tenu de l'évolution des ravageurs) de nouvelles formes et sources de résistance.
- o Le département SA s'intéresse à la maîtrise de la propagation de pathogènes en populations animales. La question de la diversité interindividuelle des hôtes est abordée au niveau inter- et intra-spécifique mais la dimension génétique intra-population est surtout considérée via des approches de modélisation et avec le département GA pour la recherche de marqueurs génétiques de la résistance.
- o Le département MIA apporte ses compétences en statistique, modélisation et optimisation dans différents projets interdisciplinaires intégrant de la génétique. Certains se situent en amont de la sélection (notamment via les métaprogrammes SelGen et MEM), d'autres portent sur des échelles plus larges (dynamique des populations, fronts de propagation, épidémiologie, sélection participative).
- o Le département CEPIA a pris l'initiative d'intégrer la prise en compte de la diversité génétique dans la transformation et la qualité du produit final.

Le groupe de travail a identifiés divers enjeux aux interfaces entre plusieurs départements :

- o Favoriser les collaborations commencées entre BAP, EA, SPE, EFPA d'une part, et entre GA, PHASE et SA d'autre part pour intégrer la génétique dans les actions et programmations de la recherche pour la transition agroécologique à différentes échelles spatio-temporelles.
- o Favoriser les interactions entre SAD et SAE2 sur l'évaluation et la gestion du risque pour le sélectionneur/agriculteur-éleveur qui introduit de la diversité (par exemple coût associé au fait de maintenir différents génotypes – inscription difficile pour variété hétérogène ; complexité du travail ...).
- o Favoriser les actions conjointes entre CEPIA/SAD/BAP/GA/SAE2 pour mieux établir les liens entre variabilité génétique / qualité du produit/ optimisation des transformations.

• Métaprogrammes

Plusieurs projets reconnus comme '*au cœur de l'agroécologie*' dans l'inventaire réalisé par le groupe de travail ont été financés par un ou plusieurs métaprogrammes : EcoServ (5), GISA (3), ACCAF (2), SelGen (2) et SMaCH (1). Neuf projets de thèse ont également été soutenus par les métaprogrammes. Il est à noter que si SelGen soutient des développements méthodologiques nécessaires pour l'agroécologie, notamment via la prédiction des GxE, **l'insertion de la génétique dans les autres MP ne va pas de soi**. La dimension génétique doit donc perdurer dans les MP, d'une façon ou d'une autre pour maintenir l'effort d'interdisciplinarité, soit en redimensionnant un MP existant soit en créant un MP sur la génétique des interactions pour l'agroécologie.

- o Dans EcoServ, la relation entre l'approche multiservice/multicritère et le niveau de diversité génétique pourrait être considérée davantage et prise en charge pour intégrer les échelles de la génétique dans l'étude des services.
- o ACCAF a soutenu des projets concernant la valorisation de la diversité génétique pour l'adaptation au CC, notamment pour stabiliser la production et la fourniture de services écosystémiques face aux aléas climatiques. Cette problématique constitue clairement une interface avec EcoServ.

- o MEM, SMaCH et GISA étaient bien placés pour soutenir les travaux sur le phénotype étendu, c'est-à-dire la prise en compte des microorganismes dans le modèle de prédiction du phénotype de la plante comme de l'animal (équation $P=G+E+M$).
- o GISA comme SMaCH auraient pu soutenir des travaux en épidémiogénétique afin de relier l'évolution des agents pathogènes et l'épidémiologie des maladies à la diversité génétique des hôtes ; c'est un sujet d'interface GISA/SMaCH.
- o GloFoodS a une approche système dans laquelle la génétique est peu visible, au moins via les titres de projets, alors qu'il pourrait être utile de l'intégrer davantage.

Outils et infrastructures mobilisés ou à développer

D'une manière générale, il faut veiller à la collecte d'informations sur la diversité génétique et le choix du génotype dans les BD utilisées par le département SAE2 (ODR par exemple) et dans les unités expérimentales non pilotées par les départements GA ou BAP.

Le génotypage haute densité est très développé chez les animaux mais le phénotypage haute densité est surtout partenarial avec des acteurs privés et l'Inra n'est donc ni leader, ni indépendant de son partenariat et des équipementiers pour l'accès aux données, alors que pour les plantes, de gros projets sont portés par l'Inra pour combiner données de phénotypage et génotypage (PHENOME).

Pour optimiser l'apport des expérimentations systèmes, celles-ci devraient prendre en compte de façon significative la composante génétique et son apport dès leur conception. Pour les dispositifs animaux, la collecte de sang (pour ADN) et le génotypage par les mêmes puces que celles utilisées en sélection devraient être prévus dès le début (coût limité chez les bovins, de l'ordre de 28 €).

Partenariats académiques nationaux et internationaux

Chez les animaux d'élevage, l'Inra collabore avec les écoles agronomiques ou vétérinaires (Nantes et Toulouse pour les maladies), sur les thématiques relevant de ce thème, mais les espèces d'intérêt pour l'Inra ne sont pas étudiées dans les universités.

Chez les plantes, les collaborations Inra-CNRS-université sont bien établies, mais une amélioration est attendue sur les collaborations avec les écologues dans le cadre de la prise en compte de la diversité génétique dans le fonctionnement des communautés et des écosystèmes.

La proportion de projets recensés avec une dimension internationale est de 37%. Il s'agit principalement de projets européens, car **chez les animaux comme chez les plantes, nos homologues s'intéressent à des questions similaires et plusieurs consortiums ont été ou sont soutenus**. Les collaborations hors Europe concernent des projets bilatéraux.

Les pays les plus représentés dans nos collaborations sont l'Allemagne, l'Espagne, l'Italie, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et la Suisse (avec au moins 10 participations aux projets internationaux recensés), puis le Danemark et la Hongrie (entre 5 et 10 participations).

Certains projets impliquent des pays non européens du pourtour méditerranéen (Egypte, Maroc, Turquie) voire des pays plus lointains (Canada, Chine, Inde et Uruguay). Les Etats-Unis et le Brésil n'ont pas été cités.

Partenariats socio-économiques et de transfert pour l'innovation

Le groupe de travail a identifié différents partenaires avérés ou potentiels, ainsi que des éléments de stratégie :

- TERRENA est dans une démarche agroécologique en entreprises semencières sur certaines de ses espèces.
- On note une implication de plus en plus forte du GIS BV sur la diversification et l'introduction de diversité génétique dans les cultures. Une animation commune au GIS BV et au GIS Grandes Cultures sur le levier génétique en articulation avec le levier agronomique dans la diversification est en cours de construction. En miroir, il faudrait encourager l'inclusion de la dimension génétique, actuellement pas visible, dans le groupe de travail autour de l'agroécologie et la multi-performance de l'élevage au sein du GIS Elevages demain.
- Un partenariat historique sur les travaux d'association génotype/phénotype dans le cadre de la sélection animale.
- Un besoin d'inciter les acteurs de la recherche participative à davantage soutenir les travaux en agroécologie via notamment les preuves de concepts.
- Réfléchir à une évolution du rôle d'Agri-Obtentions pour en faire un fer de lance de la génétique pour l'agroécologie.
- Lever le verrou réglementaire pour l'inscription de variétés génétiquement hétérogènes grâce à une prise de conscience et une évolution actuelle à laquelle participe de façon très significative l'Inra à travers l'implication de ses agents au CTPS.

Modélisation des interactions biotiques, en lien avec des dynamiques abiotiques et socio-économiques, pour une vision et une gestion agroécologique des agroécosystèmes

Périmètre, bilan et priorités

Périmètre

La modélisation en agroécologie est un défi, d'une part parce que l'agroécologie est naissante en France et en évolution dans le monde, et donc que les connaissances et les corpus de données pour l'ancrer sont en émergence, d'autre part parce qu'elle concerne par nature des systèmes complexes en environnement incertain, systèmes dynamiques dont les interactions entre les composantes sont nombreuses et variées. Pour autant cette modélisation est attendue, pour orienter et accompagner la transition des systèmes agricoles. Si la prévision est difficile, la modélisation peut aider à comprendre la dynamique des agroécosystèmes, à orienter des pistes d'action, à identifier des points d'attention et des impasses, à établir des systèmes d'avertissement pour anticiper et aider au pilotage des agroécosystèmes.

Un séminaire a été organisé sur ce thème en 2014 à l'initiative du Directeur Scientifique Environnement et du département MIA, à l'issue duquel un rapport synthétisant les présentations et discussions au sein d'ateliers et proposant quelques recommandations sur lesquelles nous reviendrons a été produit (Garcia *et al.*, 2014). Le présent document constitue un prolongement, visant à porter un diagnostic plus précis et des propositions plus concrètes, ancrées sur l'activité des départements.

L'agroécologie a pour ambition d'exploiter des processus biologiques riches et variés à des fins de production agricole et de durabilité. Le groupe de travail s'est intéressé aux travaux de modélisation conçus en appui à cette ambition, avec l'objectif de représenter et prédire des processus biologiques et leurs interactions dans les agroécosystèmes. Il a prioritairement ciblé les **modèles représentant des interactions biotiques**, seules ou en interaction avec des **dynamiques abiotiques**, seules ou en interaction avec des **dynamiques sociales, économiques ou des composantes de la biodiversité**, c'est-à-dire, tous les modèles contribuant partiellement ou pleinement à représenter la **cascade systèmes et pratiques agricoles–paysages ruraux–biodiversité–fonctions et services écosystémiques des agroécosystèmes**.

Au-delà de ce cœur de cible, le groupe de travail a également pris en considération **les modèles ayant vocation à alimenter les modèles de ce cœur de cible** : (i) par les méthodes mises en œuvre qui peuvent avoir une vocation générique, potentiellement utile pour l'agroécologie ; et (ii) parce que les interactions biotiques commencent à être explicitées sous la forme de fonctions empiriques ; c'est par exemple le cas de l'activité des microorganismes du sol et de leur rôle sur la disponibilité en nutriments sur les cycles biogéochimiques.

Deux périmètres imbriqués ont donc été définis : un centré sur un enjeu d'intégration de processus biologiques non triviaux, dit « cœur de cible », et un dit « périphérique » car plus prospectif, élargi à des modèles pertinents vis-à-vis de l'agroécologie, sans être dans le cœur de cible.

Aucune restriction sur les approches, le formalisme, les objectifs et finalités des modèles n'a été posée, pourvu qu'ils s'inscrivent dans le cadre de l'agroécologie. Les approches purement statistiques

et plus généralement les approches orientées données ('*data mining*') ont été écartées de l'analyse détaillée, mais elles sont toutefois évoquées plus loin.

Trois méthodes ont été mises en œuvre **pour porter ce diagnostic**, les méthodes et l'ensemble des résultats étant détaillées dans un rapport étendu (Monod *et al.*, 2018) :

- 1) **Une enquête par département, et au sein de chacun, par modèle**, pour les modèles dits « cœur de cible », visant à identifier : la généralité de l'approche, en termes de méthodes, d'objectifs ou de contribution à une/des plateforme(s) ; les compartiments modélisés (biotique, abiotique, décisions d'acteurs) ; le positionnement de la biodiversité dans une chaîne d'intégration (processus, fonctions et services écosystémiques) ; des aspects plus techniques (représentation spatiale et temporelle, échelles couvertes, outils mathématiques) ; la prise en compte ou non de données d'observation, et les infrastructures qui leur sont liées ; les objectifs (compréhension de l'écosystème, prévision de sa dynamique, test de scénarios). Cet inventaire fournit une vision synthétique de l'état de la modélisation en agroécologie à l'Inra. Y est associé un inventaire des publications liées à ces modèles.
- 2) **Une note de synthèse par département** indiquant enjeux, thèmes et perspectives.
- 3) **Une analyse bibliométrique de la modélisation en agroécologie**, à partir de deux requêtes sur le WoS : une première basée sur la requête utilisée à l'Inra pour capturer les productions relevant de l'agroécologie, croisée avec l'identification de travaux relevant des modèles, en combinant les déclinaisons du mot modèle en anglais (*model, model[ization]*...), simulation et calcul ou algorithmes ; une seconde qui cible, au sein de ce corpus, les références plus explicitement relatives aux interactions biotiques.

Les avancées scientifiques majeures des 3-5 dernières années

L'enquête interne par département a permis d'identifier ces avancées scientifiques (cf. rapport étendu ; Monod *et al.*, 2018). Les principaux enseignements sont listés ci-après :

- **Ce champ scientifique, déjà bien présent à l'Inra, est en plein développement.** Au cours de l'enquête, 107 modèles ont été recensés, ayant contribué à environ 400 publications, dont une grande partie très récemment. Ces modèles correspondent, pour certains à des familles de modèles, pour d'autres à un modèle unique. Du point de vue collectif, la modélisation commence à se structurer à partir de quelques réseaux de collaboration.
- **Les modèles en agroécologie couvrent de nombreux domaines :** relation plantes/bioagresseurs/usage de pesticides, cultures associées et accès aux ressources (eau, nutriments) ; santé animale - gestion des antibiotiques - populations de vecteurs (tiques, ...), en lien avec la faune sauvage ; exploitation agricole - atelier d'élevage - gestion de la ressource végétale - modèles intra- et inter-troupeaux ; politique de conservation (stratégie de conservation, relations entre espèces) ; interaction génétique-environnement.
- **Plusieurs catégories d'interactions ou de fonctions écologiques sont prises en compte :** parasitisme, prédation, compétition, facilitation, décomposition de la matière organique ; des modèles relatifs à la distribution spatio-temporelle de populations ou de particules biotiques existent.
- **Différentes échelles sont visées :** intra-hôte, population et territoire.
- **La modélisation commence à parcourir la cascade systèmes agricoles, paysages ruraux, pratiques agricoles – biodiversité – fonctions et services des agroécosystèmes.** La biodiversité est représentée dans 50% des modèles. Ces modèles répondent quasiment tous à un besoin de compréhension, certains en amont s'inscrivant dans des questions d'écologie théorique (40%), d'autres en aval allant jusqu'à traiter des fonctions de la biodiversité (45%) voire des

services écosystémiques associés (40%). Les relations abiotiques ou avec les acteurs sont modélisées via un compartiment indépendant, couplé avec le compartiment biotique, dans respectivement 50 et 25% des cas. L'intégration de processus dynamiques multi-échelles reste un défi pour la modélisation en agroécologie, y compris sur le plan méthodologique.

- **Un accrochage des modèles aux données pour des enjeux finalisés.** Les modèles ont le plus souvent vocation à répondre à des enjeux finalisés. La plupart des modèles s'appuient sur des données (80%) et ont vocation à produire des scénarios (85%). Le nombre d'approches permettant des « prévisions », au sens d'évolution de court terme pour une adaptation tactique, est plus réduit (60%). Les approches intègrent plus souvent une composante temporelle (90%) que spatiale (65%).
- **Des débuts de démarches probabilistes.** La plupart des modèles s'appuient sur un formalisme mathématique (75%) et ne sont donc pas des approches purement informatiques (par exemple de type automates cellulaires). Environ 40% des modèles intègrent une composante probabiliste. L'utilisation plus systématique d'approches stochastiques peut permettre la prise en compte d'incertitudes et aboutir à une simplification des modèles, par exemple en évitant la modélisation de mécanismes d'effet faible. L'intérêt de ces démarches est également de fournir des prévisions sous forme d'enveloppes de confiance, plutôt que de trajectoires uniques.

Quelques 'success stories' impliquant l'Inra

- *Le Séminaire 2014 « Nouveaux défis de la modélisation : l'agro-écologie ».*

Ce séminaire a rassemblé une centaine de scientifiques Inra, CNRS, ... pendant trois jours, au siège de l'Inra. Il a permis à la communauté de dresser un état des lieux, des questions, et de faire une première liste de recommandations (Garcia *et al.*, 2014).

- *Des réseaux d'animation scientifique interdisciplinaires construits autour de la modélisation : ModstatSAP, Payote et EpiArch.*
 - Le réseau ModstatSAP, créé en 2011 et soutenu par les départements MIA, SA et SPE, a pour objectif de fédérer les modélisateurs et statisticiens de ces départements et des autres entités de recherche Inra et non-Inra travaillant sur les dynamiques des systèmes hôtes/pathogènes ou hôtes/bioagresseurs. Depuis 7 ans, le réseau participe à la fédération des modélisateurs et statisticiens travaillant sur ces thèmes, en maintenant un site web, une liste de diffusion et un flux Twitter, et en organisant des réunions annuelles et des ateliers de travail.
 - Le réseau Payote s'intéresse à la modélisation des paysages agricoles et à l'étude de leur impact sur des phénomènes de propagation et de dynamique de population.
 - Le réseau EpiArch s'intéresse au rôle de l'architecture des plantes sur les processus épidémiques. Comme ModStatSAP, ces deux réseaux sont multi-disciplinaires et attirent des scientifiques Inra et non Inra.
- *Des exemples de modélisation structurants et visibles à l'international*
 - FLORSYS (pour flore adventice et système de culture ; Colbach *et al.*, 2017) simule la dynamique pluriannuelle d'une flore adventice plurispécifique et les interactions avec les plantes cultivées au niveau d'un îlot de parcelles et d'habitats semi-naturels, en fonction des systèmes de culture et des conditions pédoclimatiques, puis l'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement. Il considère plusieurs types d'interactions (plante-plante, plante-parasite, plante-champignon, plante-prédateur) et de services écosystémiques.
 - La plateforme CAPSIS est une plateforme logicielle générique donnant accès à des modèles de croissance (croissance et mortalité des arbres) pour des formations variées, plus ou moins hétérogènes, pures ou en mélanges d'espèces, en zone tempérée, mais également subtropicale et tropicale, et pour divers types de gestion (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012). Cette plateforme, surtout développée pour la gestion forestière, est aussi utilisée pour les agroécosystèmes arborés (vergers...),

voire les milieux aquatiques. Un modèle de croissance est un ensemble d'équations mathématiques qui relient les caractéristiques dendrométriques des arbres (hauteur, diamètre, volume...) et du peuplement qu'ils constituent, leur nombre, leur âge, et qui traduisent leur évolution selon la compétition qui s'exerce entre eux.

- *Des travaux scientifiques en émergence*
 - o Un cadre générique de simulation en épidémiologie (EMuLSion) a été développé (Picault *et al.*, 2017). La représentation des processus (infection et cycle de vie des animaux) sous forme de machine à états en assure la généricité.
 - o La biodiversité devient explicitement modélisée pour des phases clé des cycles biogéochimiques, avec la représentation de groupes fonctionnels microbiens et de leur rôle dans des modèles de décomposition de la matière organique des sols (modèles GDM, CANTIS, EEZY de l'UMR FARE ; Iqbal *et al.*, 2014 ; Moorhead *et al.*, 2012, 2014).
 - o Un environnement de modélisation et de simulation de dynamiques de populations sur paysages réalistes (ESOMED) a été mis en place (Roques et Bonnefon, 2016). Cet environnement permet de coupler des dynamiques sur des parcellaires 2D et sur des éléments 1D du paysage (haies, routes ...). L'environnement intègre un générateur stochastique de parcellaires et d'usages des sols (environnement développé à BioSP/MAIAGE).

Priorités scientifiques – fronts de science – priorités méthodologiques

Les priorités mentionnées dans ce qui suit sont inspirées des recommandations émises dans le rapport du colloque « Nouveaux Défis de la Modélisation : l'Agro-écologie » de février 2014 et revisitées ici (cf. rapport étendu ; Monod *et al.*, 2018). Certaines priorités sont scientifiques et d'autres méthodologiques et le groupe de travail a suggéré de les regrouper pour mieux indiquer leur nécessaire mise en complémentarité : la modélisation en agroécologie a pour partie l'objectif de faire de la recherche sur les méthodes.

- Un premier verrou scientifique important au développement de modèles porte sur la **connaissance des mécanismes d'interaction et leur intégration dans des approches systèmes**. Les « briques de base » qui décrivent séparément chaque compartiment du système étudié, existent généralement et peuvent être calibrées sur la base de données et/ou de connaissances expertes. Ce sont les liens entre ces briques qui sont difficiles à établir (par exemple, compétition, synergie, prédation, pour ce qui concerne les liens entre compartiments biotiques). Cette difficulté provient (i) de problèmes méthodologiques liés à l'identifiabilité de modèles comportant des interactions multiples ; (ii) d'un manque de données permettant de calibrer les fonctions d'interaction ; et (iii) des limites à des approches reposant trop exclusivement sur le couplage pour prendre en compte des phénomènes complexes multi-échelles. Le **nombre d'interactions prises en compte dans les modèles reste faible**. Par exemple, les **interactions binaires**, entre plantes et bioagresseurs ou entre plantes, sont plus souvent représentées que les **interactions multiples**, Florsys et Virtual Grassland étant des exceptions. Peu de travaux, voire aucun, portent, par exemple, sur l'**interaction entre biodiversité souterraine et aérienne**.

La priorité méthodologique correspondante est de **développer des approches permettant la prise en compte de fonctions multiples d'interaction**. L'importante sensibilité des modèles aux fonctions d'interaction rend hasardeuse les approches s'appuyant sur une somme de briques de base dont les fonctions d'interaction ne seraient pas clairement identifiées. Les approches actuelles fonctionnant par agrégation sont questionnées : peut-on (et comment) **prendre en compte cette complexité autrement que par agrégation de briques** ? Ces approches par « briques de base » doivent continuer à se développer, en bénéficiant de données plus adaptées (voir ci-dessous), éventuellement par le biais d'une **structuration collective**, rendant disponible et opérationnel ce qui a été validé et sélectionné comme

pertinent. Parallèlement, d'autres approches de la complexité doivent être envisagées : **approches stochastiques** évitant dans certains cas la modélisation de mécanismes d'effet faible (par exemple, *via* l'ajout d'un terme de bruit) ; utilisation de **modèles conceptuels**, apportant des réponses qualitatives à des questions ciblées ; introduction dans les modèles des contraintes liées aux **connaissances qualitatives** sur les mécanismes d'interaction (approches mécanistico-statistiques et modèles à espace d'état), permettant de limiter les besoins en données. Enfin, au-delà des méthodes existantes, il semble nécessaire d'**explorer de nouvelles pistes** pour le développement de modèles calibrés à partir de données dans le cas d'interactions multiples (**assimilation de données...**).

La **rareté des données** fait la spécificité des systèmes en transition ou conduits en agroécologie, en relation avec le nombre d'interactions mises en jeu dans ces systèmes. La modélisation peine à s'appuyer sur un corpus de données diversifiées et de moyen terme, intégrant une variabilité de conditions pédoclimatiques et agronomiques. Une seconde priorité méthodologique est de **mieux utiliser et valoriser les dispositifs d'observation (ORE/SOERE) ou d'expérimentation (expérimentations « système »)**, et de **les faire évoluer** afin qu'ils s'engagent plus **dans le champ de l'agroécologie**. L'IR RZA²⁵ mène des travaux complémentaires en agroécologie, en particulier aux échelles larges du paysage et du territoire. L'intérêt de **s'appuyer sur des informations issues de la société a été souligné**. Des initiatives sociétales en agroécologie (CIVAM, chambres d'agriculture, réseau AB,...) peuvent apporter des connaissances expertes et des données sur une diversité de systèmes. Il existe de nombreuses données sur les systèmes en AB dans le monde, comme en témoignent les méta-analyses sur les performances comparées AB/non AB (voir par exemple Fess et Benedito, 2018 ; Knapp et van der Heijden, 2018 ; Schrama *et al.*, 2018). La question de leur accès et disponibilité se pose. Les partenariats existent mais ils sont encore peu structurés sur ce plan. Des initiatives de **sciences participatives** peuvent également contribuer à enrichir les contextes d'observation.

- Une seconde priorité scientifique porte sur la **compréhension et l'intégration dans la modélisation, de la nature aléatoire, incertaine, chaotique parfois de certains processus**, en particulier de ceux qui sont en interaction avec des processus abiotiques, notamment avec le climat.

A cette priorité scientifique correspond le besoin de disposer de **méthodes d'analyse des risques dans les systèmes en agroécologie ou en transition vers l'agroécologie**. La notion de risque est importante à intégrer dans des démarches de modélisation prédictive. En agroécologie, elle va de pair avec certains concepts comme celui de la gestion adaptative (gestion qui s'adapte au fur et à mesure de l'évaluation des contraintes) ou de la viabilité (gestion qui assure une dynamique des systèmes au sein d'un espace de viabilité), de résistance aux chocs et aux aléas, notions qui proviennent ou sont aussi traitées dans d'autres disciplines (écologie, gestion...). La notion de risque s'inspire souvent de la littérature économique et mathématique, par exemple de la représentation mathématique de la théorie de la viabilité. La communauté devrait **échanger sur les concepts (résilience, vulnérabilité, flexibilité, robustesse...) et la représentation de la notion de risque**. La notion de résilience notamment devrait être plus mobilisée. Il s'agit par exemple d'instruire la question de la capacité des systèmes agroécologiques à présenter une certaine robustesse vis-à-vis de la

²⁵ IR RZA : infrastructure de recherche du réseau des Zones Ateliers.

variabilité climatique, par opposition à une adaptation à un optimum sur les années climatiques les meilleures.

En complément de ces priorités scientifiques et méthodologiques, le groupe de travail a identifié le besoin de « creuser » plusieurs dimensions ou thèmes insuffisamment explorés :

- **Travailler sur la dimension temporelle.** L'agroécologie questionne plus encore que les systèmes conventionnels la dimension temporelle. Du fait de l'importance des interactions entre processus, ceux-ci s'enchaînant dans le temps en lien avec les conditions biotiques et abiotiques (rotation, arrière-effet, variabilité climatique...). Il s'agit de **revisiter les données de long terme**, en prenant en compte l'évolution du contexte de leur acquisition (qui peut biaiser l'analyse). Des approches de type '*pattern-oriented-modelling*' peuvent permettre d'identifier les pas de temps caractéristiques, et donc les données qui seraient à acquérir. Il s'agit aussi de **renforcer les modèles développés avec des objectifs de court terme**. Certains modèles sont développés avec des objectifs de prévision ou de comparaison de scénarios, mais il y a relativement peu de confrontation au réel et au court terme. La scénarisation elle-même fait partie de ce champ.
- **Développer les modèles couplant des processus biotiques et abiotiques, notamment à l'échelle du paysage.** Des modèles commencent à être développés à l'international, mais insuffisamment à l'Inra (50% des modèles). **Les modèles représentant les réseaux trophiques et leur dynamique font également défaut** ; on manque également de modèles basés sur la biodiversité qui représentent simultanément différents processus et **services écosystémiques** et leurs interactions (25% des modèles, souvent des modèles développés par les économistes).
- **Amplifier la prise en compte des composantes biotiques dans les modèles de cycles de nutriments** (GDM, EEZY, CANTIS). Pour l'instant il s'agit surtout de décomposition de la matière organique des sols. La connaissance de plus en plus avancée des communautés microbiennes et de leurs fonctions offre des opportunités. Faire se rencontrer les communautés représentant les fonctions par des équations empiriques et les écologues microbiens, notamment modélisateurs, peut ouvrir de nouveaux fronts de recherche.
- La biodiversité est représentée explicitement dans un nombre important de modèles, via des traits, ou des guildes dans quelques cas, avec des fonctions associées sans que cela se prolonge fréquemment vers la **contribution de ces fonctions à la fourniture de services écosystémiques**. Des approches commencent à être développées, notamment en élevage. Les modèles multi-services écosystémiques sont encore peu présents. Il y a une large **marge de progression pour atteindre la cascade pratiques culturelles-biodiversité-fonctions-services**. Un défi porte aussi sur la **gestion des invasions biologiques**, en lien notamment avec le changement climatique, et les changements de systèmes agricoles et forestiers.
- **Inclure la dimension agroécologie dans les outils d'évaluation des performances et des services des agroécosystèmes et dans les modélisations d'accompagnement qui visent une gestion concertée multi-acteurs.** L'évaluation multicritère des systèmes agricoles s'appuie à l'Inra sur la plateforme MEANS, dans laquelle on trouve des démarches de type ACV au sein desquelles les interactions biotiques commencent à être prises en compte. Le cadre DEXi, utilisé pour évaluer la durabilité de systèmes agricoles y compris agroécologiques (MASC, DEXi-IPM, DEXi-fruit ...), prend en compte les interactions biotiques, par exemple dans l'évaluation de l'effet des amendements organiques divers sur la fertilité du sol. Renforcer cette prise en compte de manière à disposer de méthodes d'évaluation multicritères intégrant bien des dimensions biotiques (indicateurs, couplage avec des modèles dynamiques ...) semble important. La modélisation d'accompagnement, qui vise à aider à une gestion concertée multi-acteurs, par le développement de ComMod, de MAELIA, et à favoriser l'action collective pour

la gestion de bouquets de services doit aussi s'articuler avec les modèles d'interactions biotiques.

- Des perspectives de modélisation sont annoncées en lien avec, par exemple : le biocontrôle (approches fondamentales, telles que la modélisation démogénétique des petites populations ou l'étude de la dépendance des insectes vis-à-vis des organismes symbiotiques) ; l'écologie du paysage (régulation biotique, analyse géomatique, épidémiologie ; la régulation des flux d'éléments chimiques et biologiques) ; la symbiose, dont les avantages pour l'agriculture restent encore limités ; l'épidémiologie (stratégies de maîtrise des maladies).

Les cadres de travail et partenariats

Les apports des départements et des métaprogrammes

• Départements

Des communautés importantes sont présentes dans certains départements (EA, MIA, SPE) qui ont impulsé le développement de communautés de modélisateurs en agroécologie, en particulier par des recrutements ou des réseaux. De nombreux modèles sont développés en inter-département (BAP/EA, GA/MIA, MIA/autres ...).

Les méthodes et usages varient fortement d'un département à l'autre, illustrant leur complémentarité.

Sur la représentation de la biodiversité et des interactions (Figure 1), on note par exemple des profils très différents entre BAP (fortes représentations des compartiments abiotique et acteurs), SAE2 (forte représentation des acteurs, faible représentation du compartiment abiotique, de la biodiversité et des fonctions associées) et EA (proche des résultats à l'échelle Inra, hormis une faible représentation du compartiment « acteurs »).

Représentation de la biodiversité et des interactions

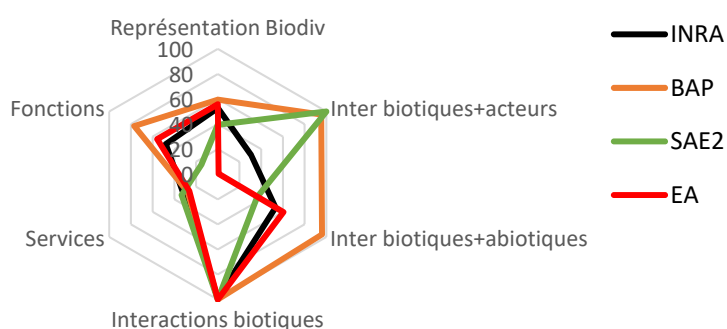


Figure 1. Représentation de la biodiversité et des interactions dans les démarches de modélisation au niveau de l'Inra considéré dans son ensemble et de 3 départements de recherche.

Sur l'ancrage aux données et usages des modèles, on note que MIA s'investit fortement sur les questions méthodologiques et d'écologie théorique, mais est en retrait sur l'utilisation des données, la prévision et la scénarisation, au contraire de SA. Ce dernier s'investit peu sur les questions méthodologiques et d'écologie théorique, mais fait souvent appel aux données, avec des objectifs de scénarisation forts. Les résultats d'EA sont proches des résultats obtenus à l'échelle Inra. Il apparaît donc que **développer des travaux en inter-départements est essentiel pour profiter des compétences et approches complémentaires.**

Beaucoup d'initiatives dans le domaine de la modélisation ont été identifiées. Certains modèles, comme en atteste le nombre de publications, ont d'ores et déjà fédéré des réseaux de collaboration entre chercheurs. Il semble important de conforter et de développer les travaux autour de ces modèles. D'autres sont au contraire des initiatives individuelles ou d'équipes, et participent d'une certaine émergence à cultiver. L'inventaire de ces modèles n'est pas connu de la communauté, qui reste faiblement structurée avec l'existence de petits groupes constitués autour d'une méthode ou d'une thématique particulière. Ainsi, la modélisation d'accompagnement est portée par le CIRAD et l'Inra, la plateforme MAELIA par l'Inra (EA, avec SAD et autres départements), la modélisation de la viabilité par le CNRS et l'Inra (SAD). Une priorité est de mieux définir **les contours de la communauté travaillant sur la modélisation en agroécologie** (au sens du « cœur de cible ») **afin qu'elle s'identifie en tant que telle et se structure davantage. Cette démarche devrait être trans-départements et trans-métaprogrammes.**

- **Métaprogrammes**

Les métaprogrammes (en particulier EcoServ, MEM, ACCAF et SMaCH) ont permis de créer des ponts entre thématiciens et modélisateurs, ainsi qu'entre départements, sur des enjeux finalisés, de favoriser des démarches intégrées et transdisciplinaires, rassemblant des briques de connaissance, notamment sur des plateformes comme RECORD. En ce qui concerne les outils de modélisation, on note également des différences importantes entre EA (plus forte utilisation des plateformes), MIA (faible utilisation des plateformes, utilisation de modèles à l'échelle populationnelle « agrégée ») et SPE (faible utilisation des plateformes, beaucoup d'approches spatialement explicites).

Outils et infrastructures mobilisés ou à développer

L'enquête indique que seuls 20% des modèles, correspondant à 20% des publications, sont inscrits dans des plateformes, en particulier RECORD ou CAPSIS. Ceci peut traduire deux choses, soit que la modélisation en agroécologie en est à un stade « pré-plateforme » (objectif de recherche amont plus que de mise à disposition ou de travail collaboratif), soit que les plateformes actuelles sont trop contraignantes pour la modélisation en agroécologie. Les plateformes ne répondraient donc que partiellement au souhait de structuration des modèles.

Le parangonnage de la modélisation en agroécologie réalisé au niveau de l'Inra puis à l'échelle nationale et internationale, a conduit le groupe de travail à proposer, comme première priorité, d'améliorer la connaissance croisée des travaux réalisés dans ce champ. Une première valorisation possible est de faire une **base de données des modèles** pouvant être partagée, notamment à l'échelle nationale (en sachant qu'une minorité de ces modèles utilise les plateformes Inra). Cette base pourrait être ouverte aux modèles « périphériques » (cf. supra) à des fins de partage entre les différentes communautés intéressées. Ce parangonnage pourrait être une **base de réflexion pour la construction d'une e-infrastructure de modélisation en agroécologie**. Un des enjeux est la représentation des connaissances et la définition d'ontologies facilitant le couplage et l'interopérabilité des modèles, le développement d'approches d'ensemble, d'organisation de '*data challenges*', hackathons,... Complété et approfondi, ce parangonnage pourrait faire l'objet, à court terme, d'un **article de positionnement**, qui rende compte de l'analyse bibliométrique et qui s'appuie sur le cas de l'Inra, pour analyser les enjeux, forces et faiblesses de la modélisation en agroécologie.

Une des propositions du groupe est donc d'étudier comment structurer la modélisation en agroécologie dans toutes ses composantes : archivage, gestion et analyse des données, modèles, plateformes actuelles ou à créer, outils de gestion opérationnels, scénarios de gestion tactique et stratégique en agroécologie. En effet, le saut à opérer ne semble pas très grand pour évoluer d'une

collection de modèles vers un réseau de modèles. Un modèle étant un outil qui permet de répondre à une question sur un objet, ce réseau pourrait se construire par question.

Cette réflexion doit s'articuler avec les infrastructures productrices de données, en s'appuyant là aussi sur une ontologie des données et une interopérabilité des bases de données. Ceci a été pris en charge par la cellule Ecoinformatique, dans l'IR AnaEE-France. Les MP peuvent accueillir des projets sur ce thème (EcoServ). Plus généralement, les IR productrices de données doivent engager une réflexion pour s'engager plus dans le champ de l'agroécologie, en s'y inscrivant dans le temps et dans un cadre de type FAIR (*'Findable, Accessible, Interoperable and Re-usable'*) pour en faire bénéficier la communauté. L'IR RZA, ou certains sites Inra d'OZCAR, hébergent des travaux s'inscrivant dans le cadre de l'agroécologie, en particulier aux échelles du paysage et du territoire, qui sont complémentaires et utiles aux modélisateurs.

Partenariats académiques nationaux et internationaux

Le partenariat avec l'Inria est important, notamment avec les départements les plus impliqués dans les développements méthodologiques comme MIA. Parmi les thèmes d'intérêt de la collaboration, les approches qualitatives ou symboliques, ou mixtes, davantage développées dans certains départements (MIA, SPE, CEPIA, par exemple les réseaux INCOM de CEPIA ou ModStatSAP de MIA-SPE-SA ; ou quelques initiatives dans EA et PHASE), pourraient faire l'objet de discussions dans le cadre du partenariat Inra-Inria. Le partage et l'apprentissage de ces approches pourraient se faire via une école-chercheur dédiée.

Certains travaux sont développés avec le CNRS, plus sous la forme de partenariat de proximité que de partenariats construits institutionnellement, aux échelles locales comme nationales. Les infrastructures partagées (RZA, AnaEE...) contribuent à ce que se nouent des partenariats autour de la modélisation en agroécologie. Enfin, le lien entre adaptation au changement climatique et agroécologie peut mobiliser le partenariat avec Météo-France (par exemple, outils de prévision des risques).

Une communauté de recherche active s'est construite entre l'Inra, le CNRS et le CIRAD autour du réseau COMOD et de la plateforme CORMAS, avec l'organisation d'écoles-chercheurs, pour former et promouvoir cette méthode et pour maîtriser la plateforme de modélisation CORMAS. Des travaux sont faits en agroécologie pour accompagner les transitions et intégrer des dimensions sociologiques.

L'enquête indique peu de liens à l'international. Beaucoup des publications relatives aux modèles inventoriés sont issues d'auteurs de la communauté française. La richesse actuelle indique cependant une maturité pour certaines qui devrait leur permettre de se positionner à l'échelle européenne et internationale.

La requête sur le WoS indique la bonne place de certains chercheurs Inra (5 parmi les 20 les plus cités) et la prédominance de l'Inra sur ce thème (cf. rapport complet, Monod *et al.*, 2018). Par contre, l'agrégation par pays, tous organismes confondus, indique la prédominance des USA, de la Grande-Bretagne ou de l'Allemagne sur la France. L'analyse indique clairement les domaines où l'Inra a une place dominante (adventices) et ceux où il contribue (méthodes d'évaluation). L'analyse indique des dynamiques de développement de modèles sur le long terme, portées par des gros modèles adaptables et adaptés à différentes situations, construits en lien avec des supports expérimentaux de long terme. Ce sont des facteurs de développement et de lisibilité de la modélisation en agroécologie qu'il faut prendre en compte à l'Inra.

Un frein important reste l'absence d'organisation sur ce domaine, en particulier en Europe, et plus encore en Europe du Nord. Différentes voies sont à explorer : les infrastructures productrices de données (comme TERENO en Allemagne), d'où peuvent émerger des collaborations ; un lobbying pour que la modélisation en agroécologie apparaisse dans les mots-clés des prochains instruments, soit directement (« agroécologie »), soit indirectement (« zéro pesticide », « recyclage » ...) ; enfin, l'Inra pourrait être plus présent dans des colloques clés, comme MODSIM où la communauté concernée se construit.

Partenariats socio-économiques et de transfert pour l'innovation

Le potentiel de partenariat existe, mais reste encore insuffisamment développé, la modélisation en agroécologie étant encore trop en amont, trop éloignée de la complexité des situations réelles. Ce partenariat socio-économique se construit sur trois segments : (i) les données utiles pour faire progresser la modélisation en agroécologie ; (ii) le passage des modèles de recherche à des modèles opérationnels (systèmes d'alerte, de risques ...) ; et (iii) le transfert en principes d'action des connaissances en agroécologie issues des modèles.

Les essais systémiques en agroécologie de la recherche ont souvent une information riche, mais sont peu nombreux. Les infrastructures de recherche (ISC de l'Inra, ou IR nationale) y contribuent (réseau SEBIOPAG, Zones Ateliers ...), notamment aux échelles du paysage. Certaines infrastructures (AnaEE) pourraient permettre d'amplifier le registre d'étude des pratiques en agroécologie (diversification végétale ou animale ...). Une analyse de la contribution des dispositifs de l'Inra (ISC) à tout ou partie de la modélisation en agroécologie serait intéressante, en allant jusqu'à leur lien à la modélisation.

La diversité des pratiques agroécologiques inciterait à développer des partenariats avec la société, sur des agricultures pionnières (CIVAM, GIEE ...), sur des outils de partage d'expériences (Solagro, PEPS). Soulignons l'opportunité de données nouvelles (capteurs, télédétection haute fréquence – haute résolution). Traiter de l'articulation données – modèles reste un enjeu important (cf. atelier sur les données du séminaire de 2014). Certaines données peuvent être difficiles à acquérir, ou captées par certains acteurs (notamment à l'échelle de l'exploitation) qui peuvent vouloir se les approprier pour développer des services (prévision des risques ...) à des fins commerciales. C'est un point de vigilance.

Le passage et le transfert des outils de la recherche à des systèmes opérationnels (système d'alerte ...), s'opèrent soit directement, soit par le biais des instituts techniques (IDELE par exemple). La demande publique existe également (cf. séminaire de 2014). L'analyse de l'offre et la demande en modélisation, et au-delà en Outils d'Aide à la Décision, émergente, pourrait être prise en charge dans un domaine d'innovation, par exemple le DI Agriculture numérique.

Quelle contribution des agroéquipements à l'agroécologie ?

Périmètre, bilan et priorités

Périmètre

- **Les limites de l'existant**

Divers documents d'orientation de la recherche abordent la thématique de la place des agroéquipements *sensu lato* dans l'adaptation de l'agriculture aux nouveaux enjeux. Le rapport Agriculture et Innovation 2025 (Bournigal *et al.*, 2015) consacre quelques actions à la robotique agricole et d'autres à l'appui au déploiement de l'agroécologie. Le rapport sur la triple performance de l'agriculture (Machenaud *et al.*, 2014) porte lui aussi l'accent sur ce que les agroéquipements doivent réaliser pour porter l'ambition d'une performance élargie sur les critères économiques, environnementaux et sociaux. Il reprend des conclusions que le rapport sur les agroéquipements (Bournigal, 2014) mettait lui aussi en avant.

La logique qui y est développée tourne autour d'une idée simple : si par une meilleure connaissance des besoins des plantes et des animaux on peut moduler au plus juste les interventions et les apports d'intrants, alors le système sera plus vertueux car :

- o plus économique, évitant les gaspillages et les pollutions inutiles ;
- o plus favorable à l'environnement car moins dispendieux en énergie fossile et moins créateurs de « fuites » du système qu'il faut ensuite venir corriger ;
- o plus socialement juste car réduisant la pénibilité du travail, tenant mieux compte des spécificités de chaque situation, potentiellement support du bien-être animal, plus en phase avec les cahiers des charges, les circuits courts, le bien des consommateurs ...

En bref, la technologie en marche peut, si elle est utilisée convenablement, être source majeure de progrès, voire parée de presque toutes les vertus.

Nous pourrions ici facilement reprendre les grandes lignes qui sont déployées dans ces documents car elles sont en partie ce que la technologie est effectivement en train d'offrir et en même temps elles restent d'une grande actualité car toutes les agricultures (du monde) n'y ont pas accès, tous les agriculteurs ne sont pas équipés, toutes les avancées possibles ne sont pas réalisées.

Un exemple : la technologie des pulvérisateurs permet de moduler la dose apportée à la vitesse d'avancement, elle permet de couper les tronçons qui ne sont pas au dessus d'une zone à traiter, elle ajuste automatiquement la hauteur de la rampe à la hauteur de la végétation pour éviter les zones de double traitement ou les 'trous', elle permet de ne pas mélanger à l'avance l'eau et le produit de traitement ; le bouchon standardisé vient se visser et se dévisser sur le pulvérisateur sans nécessiter aucun contact ; des mouchards enregistrent l'intervention et pré-remplissent les fichiers informatisés de suivi, des récupérateurs ou dispositifs permettent de mieux confiner la pulvérisation qui ne part plus dans la nature ; des buses « antidérive » limitent les pertes hors des zones ciblées ; l'intervention est possiblement mieux synchronisée sur la présence avérée du risque phytosanitaire et des conditions météorologiques pour que le traitement soit optimal et donc que les doses appliquées soient les plus faibles possibles. Sans même cumuler toutes ces avancées et à condition d'y mettre le prix, les usages de phytosanitaires peuvent facilement baisser dans une fourchette de 10 à 30% sans réduction d'efficacité. Qui peut se lever et dénoncer les bienfaits de cette tendance ? D'autant, qu'en face, la majorité du parc des pulvérisateurs reste obsolète et présente pour plus de deux tiers d'entre eux le

réglage « sortie d'usine », c'est-à-dire sans adaptation aux conditions locales. Difficile de dire que l'information et les savoirs nécessaires n'ont pas été délivrés puisque les agriculteurs ont tous suivis et obtenus leur 'Certiphyto' au cours des cinq dernières années.

Dans l'absolu, il n'y a donc pas de problème à suivre un chemin largement emprunté à en devenir une avenue, s'engouffrer dans la brèche pour souligner l'intérêt de la technologie et prôner d'avancer rapidement dans ce sens (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Pour autant, ce n'est pas ce que l'on va faire dans la suite de ce document et, ceci pour trois raisons :

- Le message a été martelé et il n'y a pas vraiment de raison de renforcer cette ligne qui est maintenant largement comprise et diffusée.
- Il y a quelques exceptions comme exploiter la capacité à moduler la fertilisation traduite dans une carte mais la science agronomique, l'écologie, les sciences de gestion, la géographie ne sont que très marginalement embarquées dans cette avancée avant tout technologique, portée par les sciences de l'ingénieur, l'algorithmique, la robotique, la géolocalisation par guidage, la connexion sans fil de capteurs physiques, le couplage des informations dans un système pilotant des électrovannes mais surtout par le foisonnement d'offres de service aux agriculteurs et aménageurs paysagers qui se déploient avec l'avènement du numérique portant la R&D en agriculture.
- Cette révolution numérique étant dans la continuité de 70 ans d'innovations en agriculture est bien perçue et légitime. Elle aura donc lieu de toute façon, que l'agroécologie deviennent un paradigme dominant ou pas. Dans un certain sens, elle peut même contribuer à faire régresser ou reculer le nécessaire avènement du paradigme agroécologique en rendant le modèle d'agriculture industrielle plus logique, plus cohérent. Donc discuter ici d'agroéquipement pour l'agroécologie si l'agroécologie n'en ressort pas grandie ou facilitée, cela n'a plus vraiment de sens maintenant que le pli est pris. Ce qui cristallise la distinction que l'on fait sur l'ambition, c'est l'absence possible dans ces documents d'orientation de tout recours aux processus biologiques dans le fonctionnement de l'agroécosystème. En fin de compte, ce que ces documents proposent est à la fois immense, car tous les secteurs sont concernés, et peu ambitieux voire timoré car se cantonnant quasi exclusivement à l'étape d'optimisation, presque en amont de la première étape d'efficience d'une échelle ESR. Se faisant, la technologie renforce le système devenu dominant sans jamais vraiment le remettre en cause.

Partant de ce constat et de cette analyse, le groupe de travail s'est attelé à capter ce que les agroéquipements pouvaient apporter à l'agroécologie. Sans jamais renier l'intérêt et l'importance d'une agriculture de précision, nous avons cherché à imaginer et étayer les pistes de ce que la recherche pourrait être bien inspirée de travailler et de prioriser pour que les processus biologiques et leur traduction dans la dynamique des flux et la couverture des fonctionnalités soient au cœur des dispositifs de l'agriculture de demain. Même en se projetant sur un court terme de 3 à 5 ans, nous pensons que cette posture est porteuse d'ambition, d'identification de fronts de sciences pour la biologie, de sérieuses pistes pour résoudre ou à minima contribuer à la couverture des défis auxquels l'agriculture fait face, par exemple : renouveler en profondeur la conception de la protection des plantes que l'agriculture a toujours mis au cœur de ses préoccupations depuis l'antiquité ; exporter de la biomasse sous forme de grain, de fibre, de lait sans pour autant déséquilibrer le fonctionnement ni déstocker massivement du carbone ; ou bien encore placer les principes de robustesse, de résistance et de résilience au cœur des systèmes déployés pour qu'ils passent avec un certain succès à travers les aléas d'ordre divers (climatiques, économiques ou sanitaires).

Là où l'agriculture de précision visera principalement l'optimisation d'intrants essentiellement externes, notre définition de l'agroécologie s'envisage dans la volonté de leur internalisation au

système embrassé, de leur intégration dans l'agroécosystème rendu plus autonome, de leur disponibilité (ce qui nécessite de gérer les flux et reconstituer les stocks) et de leur efficience. Cette intégration portée par l'agroécologie implique des reconceptions et des évolutions dans l'évaluation de performances étendues à la couverture des services écosystémiques comme reflets de l'état de santé du système. Le biologique est au centre. Certains agroéquipements permettent ou facilitent cette internalisation effective. Ils couvrent la conduite du diagnostic, le pilotage des processus biologiques en équilibre dynamique, l'évaluation de la fonctionnalité du système et de la couverture des propriétés traduisant son (bon) état de santé.

En s'intéressant aux processus, les avancées permises par ces agroéquipements ne sont pas cantonnées à l'agriculture des pays tempérés, ni à la seule agriculture conventionnelle, mais elles viennent enrichir l'ensemble des agricultures. Les champs d'applications majeurs que l'on peut envisager concernent :

- o La réalité et les mécanismes déclencheurs de stimulation des défenses internes (comme en partie prôné par la biodynamie).
- o Les régulations naturelles (en partie mises en exergue par l'AB).
- o L'occupation des niches écologiques et leur préservation (en partie prônées par l'agriculture de conservation).
- o La valorisation des complémentarités entre organismes pour réduire la compétition et créer des synergies (prônée par l'AB, la biodynamie, l'agriculture de conservation...).
- o La reconstitution des stocks et le maintien des paramètres de l'environnement dans une gamme qui respecte les particularités locales de l'environnement et ses potentialités, mobilisant pour ce faire le bouclage des cycles à travers le recyclage, la sobriété et l'efficience des ressources mobilisées.

• **Eléments bibliométriques**

La difficulté rencontrée pour bien cerner le périmètre se trouve dans l'imprécision et la rareté du corpus scientifique spontanément identifiable à travers la bibliométrie (analyse du WoS). L'intersection des références traitant d'agroécologie avec celles traitant d'équipements au sens large génère un ensemble de très petite envergure. L'intersection d'un secteur recouvrant l'agroécologie puis son extension à l'ingénierie écologique en agriculture d'un côté, et le machinisme étendu à la tracterisation, la robotique, l'imagerie, les capteurs et l'ensemble de l'ingénierie mécanique en agriculture, est au mieux de quelques centaines de publications, soit moins de 0,01% des références des sciences mécaniques. Le contenu de cette intersection semble en première instance faire ressortir des thématiques autour de la prévision météorologique, de la place de la télédétection et de la proximité dans la caractérisation de la diversité des situations, de la caractérisation des hétérogénéités à différentes échelles, du suivi du tassement et de ses effets sur l'activité biologique et le fonctionnement des sols, ou bien encore du pilotage de l'irrigation ; côté méthodologique, une large place est occupée par l'usage des techniques de '*machine learning*'. Chacun de ces points semble largement faire référence à des enjeux préexistants bien identifiés mais renforcés par l'expression des préoccupations agroécologiques finalisées.

Le croisement des disciplines fondatrices d'agronomie et d'écologie n'allait déjà pas toujours de soi ; le rajout d'une composante disciplinaire en machinisme ou en sciences de l'ingénieur amène à viser des communautés scientifiques qui n'ont sans doute que peu de points et d'intérêts communs. Une analyse critique approfondie pourrait donc s'avérer nécessaire. En première instance, on peut suggérer que des besoins de développements scientifiques n'aient pas encore émergé qui ne soient pas traitables par les approches (mono)disciplinaires existantes en agronomie, écologie, géographie, télédétection ou sciences de gestion. Vue à travers les outils et approche de pilotage de l'ingénierie,

l'agroécologie serait ainsi encore dans une phase d'appropriation des briques disciplinaires plus que dans le déroulement d'objets majeurs qui lui soient originaux.

Ce relatif '*no man's land*' de la communauté scientifique contraste avec les nombreuses conventions qui toutes poussent à déployer rapidement l'agroécologie. En reprenant par exemple l'analyse de Sivakumar *et al.* (2000) : '*Three International Conventions which have a bearing on sustainable agriculture including the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), the Convention on Biological Diversity (CBD) and the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) were negotiated and ratified since 1992. The World Food Summit Plan of Action (WFSPA), which was developed in 1996, includes several commitments to make agricultural production sustainable*'. Le flot des conventions ne s'est pas tari depuis, et la FAO a notamment investi le thème²⁶.

- **Enjeux**

Suivant notre définition, les **enjeux cognitifs** touchent la caractérisation du fonctionnement de l'agroécosystème, la couverture des régulations biologiques, l'estimation du potentiel de mobilisation de processus tels que la prédation, la libération d'éléments fertilisant par dégradation de la matière organique, la capacité de stockage de carbone, le potentiel de rétention d'eau (Dobriyal *et al.*, 2012), la mobilisation de mécanismes d'immunité et de résilience des organismes. Ils impliquent la maîtrise de la chaîne qui passe de la collecte d'informations à sa traduction dans une capacité de modulation via les processus biologiques sous-jacents. Plus largement, ils impliquent des articulations avec les secteurs amont et aval de l'agriculture dans le choix des espèces et variétés, le pilotage modulé des hétérogénéités et la traçabilité généralisée des modes de production jusqu'au consommateur.

Il y a aussi un saut qualitatif à franchir : non seulement il s'agit d'intégrer les hétérogénéités constatées de l'environnement pour moduler au mieux et localement la réponse en vue de proposer à chaque situation la réponse la plus adaptée, mais plus encore on peut soutenir une stratégie autour d'une hétérogénéité et d'interactions que l'on pilote. Le maintien à un niveau expressément élevé de ces interactions biotiques confère des propriétés intéressantes en termes de répartition des risques, de meilleure couverture de toute l'étendue de chaque situation, de moindre stress pour les organismes qui trouvent des conditions plus adaptées à leurs besoins, de moindre prévisibilité pour les pathogènes et ravageurs, etc. En somme, l'agroécologie, loin d'orienter les espèces et les systèmes vers une spécialisation et une sélection univoque, accepte la variabilité et la diversité comme sources pour accroître la performance étendue des systèmes face à un environnement moins artificialisé par différents intrants susceptibles de déséquilibrer les écosystèmes.

Il y a des implications évidentes sur la capacité des équipements à faire face et à gérer les hétérogénéités rencontrées pour moduler la réponse apportée et préserver les bénéfices en termes de fonctionnalité et de robustesse. La transition numérique s'est avérée un outil puissant pour gérer les spécificités de la multitude apportant une réponse adaptée à chacun²⁷, tout en déroulant un processus global. Il y a donc des besoins de :

- o Caractérisation, y compris des situations d'incompatibilité ou d'inadaptation (place accordée à la caractérisation à l'aide de marqueurs appropriés des situations de stress des plantes et des animaux).
- o Capacité de modulation des itinéraires tenant compte de la situation rencontrée.

²⁶ www.fao.org/agroecology/fr/

²⁷ L'arrivée du numérique en médecine a par exemple permis d'apporter des traitements adaptés aux particularismes de chaque patient. Le numérique a aussi facilité la caractérisation d'effets faibles ou différés à travers la taille de cohortes que l'on peut mieux caractériser.

- o Adaptation à la diversité pilotée.
- o Enregistrement pour un suivi dans la durée et, du coup, plus orienté sur la dynamique du processus suivi que sur la valeur absolue atteinte.
- o La place accordée à la capacité à soutenir des aléas prend beaucoup d'importance et renvoie donc logiquement sur la couverture des fonctionnalités sur des échelles d'espace et de temps plus larges qu'à l'accoutumée.

Les grands enjeux cognitifs de base semblent là. Ils doivent de plus être traduits dans des moyens de pilotage des processus mobilisés. Les **finalités**, quand on s'intéresse aux agroéquipements, sont rendues compliquées par le fait que les équipements ne sont qu'un petit bout du processus à réaliser ou couvrir²⁸. D'ailleurs, il semble symptomatique de constater que les rapports sur les agroéquipements (Bournigal, 2014) et sur Agriculture et Innovation 2025 (Bournigal *et al.*, 2015) ne développent les attendus de couverture et de caractérisation du fonctionnement biologique que dans des termes généraux relevant du diagnostic d'un défi plutôt que de sa résolution.

Pour autant, les agroéquipements et plus largement ce qui rentre dans le cadre pour l'action (OAD, tableaux de bord, prévisions, cartographie ...) symbolisent le rapport à l'action et la couverture de sa facette d'appropriation par le plus grand nombre. **On comprendra donc que le rapprochement des termes agroécologie et agroéquipements cerne, en fait, la fourniture des moyens, outils de pilotage et d'accompagnement pour permettre l'adoption de pratiques à portée agroécologique à travers un suivi fin du fonctionnement de l'agroécosystème.** En somme, l'intitulé de ce thème renverrait assez largement à l'acquisition des connaissances et sa chaîne de traitement à même de permettre, dans sa facette finalisée, le pilotage de l'ingénierie agroécologique.

Les avancées scientifiques majeures des 3-5 dernières années

Une interrogation élargie du public ferait prioritairement ressortir deux fronts technologiques : la généralisation du **guidage GPS** ouvrant la voie à la différenciation des actions pour tenir compte d'un contexte très local et la profusion des **services d'accompagnement de la décision** permis par l'analyse de données de masse, couplé à la généralisation des outils issus de l'IA. Telles sont les avancées vécues sur le terrain et portées par le marché. Elles relèvent de l'agriculture de précision plus que de l'agroécologie et elles s'inscrivent majoritairement dans la continuité de l'agriculture conventionnelle actuelle. Sur ce registre, on peut dire que le monde scientifique n'est que modérément mobilisé au delà de la généralisation d'approches de spatialisation des processus suivis *via* leur dimension géoréférencée (Andrew *et al.*, 2015 ; Badenko *et al.* 2015).

Plus de 10 ans après le '*Millennium Ecosystem Assessment*', l'effort de recherche se concentre sans doute plus sur la caractérisation du fonctionnement de l'écosystème sous différentes contraintes anthropiques et climatiques et la couverture des services écosystémiques (Burkard *et al.*, 2012 ; Van Zanten *et al.*, 2014) et la fiabilité que l'on peut accorder aux estimations et mesures (Landuyt *et al.*, 2015 ; Mira *et al.*, 2016) ou encore les conséquences sur des compartiments plus difficilement observables (Baveye *et al.*, 2016).

On a mentionné la place qu'occupait l'accumulation de la biomasse issue de la photosynthèse. Pour couvrir les situations où la gestion de la biomasse s'avère un objet d'optimisation (Bardgett et McAlister, 1999 ; Haberl et Geissler, 2000 ; Tilman et Lehman, 2006), des développements de systèmes

²⁸ Si on se cantonne aux développements d'ordre biotechnique, les processus biologiques communément cités comme devant être mobilisés couvrent les bases de la tolérance et de la résistance ou de l'immunité, la capture des ressources dont l'interception de la ressource lumineuse, les chaînes trophiques dont les symbioses et les régulations naturelles, l'occupation des niches écologiques et la synergie entre organismes, l'effet direct ou indirect des activités biologiques sur les états du milieu (par exemple, porosité et aération des sols, capture et efficacité de la réserve en eau, bilan du carbone stocké).

de cultures originaux ont eu lieu dont on peut dire qu'ils mobilisent le principe agroécologique d'occupation élargie des niches écologiques pour limiter la compétition entre organismes, favoriser les complémentarités, renforcer l'autosuffisance interne et valoriser les synergies. A différentes échelles, de la plus fine à la plus large, les développements scientifiques concernent les interactions biotiques, les peuplements plurispécifiques complexes, l'agroforesterie, la mise en valeur des atouts de systèmes alliant polyculture et élevage (Beringer *et al.*, 2011 ; Finney *et al.*, 2016 ; Carlsson *et al.*, 2017). Certains y adosseront aussi les agrosystèmes hautement productifs de biomasse qui visent à maximiser l'énergie solaire capturée en entrée de système. Pour ces différentes situations, le recours à des outils de pilotage et, parfois à des agroéquipements dédiés, peut être sollicité. Ainsi, et toujours en gardant en tête de proposer une forme de rupture dans la conduite des agrosystèmes, on pourra retenir quelques avancées significatives depuis le premier chantier agroécologie conduit en 2012 :

- Les efforts de synthèse sur les coûts et bénéfices de la diversification (SAD).
- La mobilisation des animaux comme sentinelles de leur environnement (notamment SPE sur abeilles) et plus généralement à la miniaturisation du radiotracking ouvrant la voie au '*biologging*' (EFPA).
- L'automatisation de la caractérisation de l'environnement et des animaux (phénotypage à haut débit) pour mieux évaluer puis valoriser l'interaction génotype × environnement (GA, PHASE, EFPA et BAP ; dans une moindre mesure SPE) ou mieux quantifier leur santé (bien être animal et quantification de l'état immunitaire des plantes).
- Le développement des approches spatialisées en statistiques, représentation des données, archivage, modélisation (MIA, SPE et SA sur l'épidémiosurveillance et la gestion des crises sanitaires ; EA et plus largement l'ensemble des départements).

Peu de ces avancées semblent expressément traduites dans des outils dédiés, bien que certains soient assez largement mobilisés.

Quelques 'success stories' impliquant l'Inra

Les travaux sur agroéquipements *sensu stricto* sont largement en dehors du périmètre couvert et revendiqué par l'Inra. Aucun des 13 départements n'est spécifiquement organisé sur ou autour des sciences de l'ingénieur et de la mécanisation. Les partenariats avec certaines équipes du CNRS, des Universités ou du CEA ne sont pas particulièrement développés sur ce secteur, ce qui fait que l'expertise n'est pas non plus très prégnante dans les UMRs, voire dans les LabEx ou IdEx auxquels les unités sont rattachées. Il faut descendre au grain des initiatives et projets pour disposer d'exemples emblématiques, souvent plus tournés vers la couverture de nos propres besoins de recherche que vers une ambition de transfert à la profession.

• *Des outils de phénotypage à large échelle pour une prise en considération effective*

La dynamique est portée du côté végétal par les initiatives du projet PHENOME dans le cadre des investissements d'avenir, notamment sur Montpellier, Dijon, Clermont-Ferrand, et dans une moindre mesure Angers. Il existe un symétrique du côté animal (projet CASDAR Morpho3D de Phénotypage morphologique par imagerie 3D et projets européens SMARTCOW ou Aquaexcel2020).

Ces travaux mobilisant les unités de recherche comme les installations et unités expérimentales pavent les avancées vers trois innovations majeures :

- La quantification et la qualification des caractéristiques de **robustesse, résilience, plasticité** que l'agroécologie peut mobiliser. C'est tout particulièrement adapté à un enjeu porté en élevage de mieux caractériser la propriété de résilience, peu étudiée jusqu'à présent faute de phénotypage à

haut débit, d'intégrer explicitement la santé et le système immunitaire, l'état des réserves et leurs variations avec l'imagerie 3D, la capacité à se reproduire, etc.

- O La prise en compte des **hétérogénéités au sein des parcelles et des troupeaux** que l'on peut non seulement caractériser mais piloter de manière différenciée. Ceci peut se traduire par une meilleure résilience face aux aléas et par une possible valorisation de l'articulation de la performance à la durabilité à l'échelle des exploitations.
- O La **prédiction génomique de la valeur des individus** qui va se développer rapidement (par exemple, en élevage bovin) ouvre la possibilité de prédire et donc d'intégrer ces nouveaux caractères²⁹. En gérant de manière différente les individus au sein d'un troupeau, on peut mieux étaler les risques mais aussi diminuer la compétition entre individus en jouant la carte de la complémentarité. Adossé à une traçabilité accrue, il n'y pas forcément d'incidence pour la collecte et la mise en marché.

- *Développement de méthodologies et appareils associés permettant de caractériser les risques écotoxicologiques attachés aux usages de certains intrants agricoles.*

Ce secteur profite des avancées méthodologiques mais le corpus scientifique fait assez largement appel à des connaissances acquises en écotoxicologie. Un secteur semble toutefois prendre forme dont on ignorait sans doute l'étendue, celui du dialogue ou de la signalisation et des effets induits sur la réussite des organismes au sein des communautés (voir par exemple Musilova *et al.*, 2016). Un champ d'application touche directement le suivi puis le pilotage des interactions à fort potentiel bénéfique.

Cet apport œuvre en soutien à l'évaluation étendue des coûts et bénéfices de différents choix de conduite agricole. Ponctuellement, les avancées scientifiques se traduisent dans la modification des réglementations, l'interdiction réaffirmée des néonicotinoïdes ayant valeur d'exemple emblématique, mais la réduction du risque de lessivage du nitrate, traduite notamment par la réglementation sur les CIPAN, peut aussi être évoquée.

Les activités correspondantes sont menées par des équipes et unités des départements EFPA, EA, SPE essentiellement, en phase avec quelques enjeux soutenus par le métaprogramme SMaCH, et en lien avec la partie « sol » de MEM : les équipes leader sur la qualité de l'eau de EFPA (UMR CARTEL-Thonon, ESE et U3E-Rennes, Ecobiop-St-Pée), l'UMR EcoSys sur Versailles-Grignon concrétisé dans son projet d'unité, l'UR Abeille et Environnement en Avignon ainsi que l'UE Entomologie du Magneraud, et dans une moindre mesure Agroécologie à Dijon, System à Montpellier ou encore Agir à Toulouse. Les méthodologies mobilisées concernent notamment l'usage des technologies RFID, l'élevage des naissains sur milieu artificiel, la calibration de l'activité enzymatique des sols ou bien encore l'évaluation du potentiel d'activité biologique. De leur côté, les voies de dialogue de l'interaction plante x plante sont travaillées au sein de SPE et de BAP (par exemple au LIPM).

En perspective, la caractérisation de la couverture en continu des besoins (azotés) des cultures autorise différentes pistes d'optimisation dont une traduction largement diffusée est la cartographie des hétérogénéités au sein des parcelles réalisée par drone. Une mesure des carences sur les plantes compléterait utilement les besoins pour permettre des pilotages au plus près de ce que les plantes peuvent absorber et valoriser (Ravier, 2017). Le pilotage dynamique de la fertilisation en remplacement d'une approche prédictive des bilans peut être considéré comme emblématique de la dimension agroécologique.

Si les avancées sont notoires y compris dans la mise au point de normes, la transformation de ces avancées de laboratoire dans des dispositifs plus ou moins automatisés ou rendus accessibles au plus grand nombre reste à mener. Par exemple, comment rendre compte de l'état réversible de carence d'une plante pour un pilotage dynamique de la fertilisation ? Cette question constitue un cas d'école de ce qu'il faudrait rendre accessible aux agriculteurs.

- *Avancées en ingénierie agroécologique en culture sous abris*

²⁹ Thème en lien direct avec le Thème 4, ce groupe de travail regardant plutôt la facette de caractérisation des traits recherchés et leur mesure plus ou moins automatisée sur des pas de temps permettant l'intégration et l'articulation aux informations génomiques collectées par ailleurs.

Diverses techniques sont dès à présent disponibles pour le déploiement d'une ingénierie agroécologique en culture sous abris avec gestion des ravageurs par solarisation, aspiration, pièges, lâchers d'auxiliaires, plantes pièges, usage de plantes relais, fermetures des vantaux en cas de signalisation de nuages de spores avec risque de contaminations aériennes, capture d'une partie des rayonnements solaires, etc. Ces pratiques d'ingénierie nécessitent souvent des équipements dédiés et couvrent une gradation de pratiques que l'on considérera comme diversement mobilisatrices de la biodiversité, favorables à l'environnement et à la santé et durables.

Au sein de l'Inra, ceci passe par la mobilisation d'un pôle étalé dans un triangle Avignon, Sophia, Alenya, avec quelques équipes et projets phares notamment en soutien au déploiement du biocontrôle. On peut citer le montage de l'UMT Fiorimed³⁰ et d'une plateforme d'accompagnement, complété par quelques ouvertures via des applications smartphone (Bordeaux).

A noter aussi dans ce domaine l'articulation à l'enseignement avec différents modules de l'UVED³¹, notamment *ECOHORT - La conception de systèmes horticoles écologiquement innovants*.

Dans tous les cas, l'expertise et le savoir-faire dispensés sont très orientés par et sur le fonctionnement biologique *sensu lato*. Cette posture autorise des approches a priori plus vertueuses et durables, faisant elles-mêmes appel à des agroéquipements quand cela s'avère nécessaire. Le lien aux équipements et outils d'accompagnement est donc assez logiquement plus indirect que direct.

- ***Rendre compte de l'activité biologique***

Puisque c'est un point fort des axes de recherche à couvrir, il peut paraître pertinent de détailler un set de travaux positionné sur la thématique. Très axé sur les substances à l'état de traces (interactions entre organismes via des hormones, signalisation du dialogue plante/plante) ou les activités biologiques prenant place dans des compartiments difficilement accessibles, à l'instar du sol (optodes pour la mesure du pH ou de la concentration en CO₂ dans le sol au voisinage des racines ; Blossfeld *et al.*, 2013) ou de l'eau. En terme d'équipements, les travaux sont conduits avec du matériel pour l'expérimentation mais on peut assez facilement visualiser ce que cela peut recouvrir pour une caractérisation élargie, fiable et à moindre coût.

Priorités scientifiques – fronts de science – priorités méthodologiques

La **priorisation scientifique** peut être organisée en quelques grands domaines :

- **Des outils et des approches pour la valorisation de la biodiversité dans son contexte local**

Les approches antérieures de modernisation de l'agriculture intensive en milieu tempéré ont largement contribué à simplifier la conduite par une plus grande homogénéisation des entités de production tant animales que végétales, facilitant la diffusion généralisée des voies de progrès. La conduite des systèmes agroécologiques suscite un intérêt croissant pour valoriser la diversité intra- ou interspécifique comme un moyen privilégié d'accroître les capacités de résilience et d'efficacité des systèmes de production. Ces derniers peuvent fonctionner sur une base très productive même si une partie de la biomasse doit rester sur place pour soutenir l'activité biologique, permettre le maintien des chaînes trophiques et des régulations attenantes et garantir la couverture de fonctionnalités indispensables à l'écosystème. Cette conduite agroécologique cherche aussi à mobiliser les caractéristiques et propriétés propres de l'environnement local comme autant de conditions sur lesquelles appuyer la démarche de durabilité. Ceci plaide pour un phénotypage en continu et assez large pour englober la couverture des besoins des organismes ainsi que les fonctionnalités qu'ils y exécutent. Déjà de nombreux travaux et projets visent à mieux identifier les propriétés et tirer parti de cette double source de diversité, externe (l'environnement local) et interne (ce que l'on y introduit

³⁰ <https://www.umat-fiorimed.fr/>

³¹ <https://www6.inra.fr/uva/ressources-uva/Types-de-modules/Ingenierie-agroecologique>

et que l'on pilote)³². Il s'agit donc ici de voir comment ces connaissances peuvent être mobilisées par les acteurs.

Sur ce domaine, l'Inra occupe une place reconnue sur la caractérisation des hétérogénéités à différentes échelles dont la dimension paysagère (en lien avec le Thème 3), l'articulation du phénotypage végétal et animal aux avancées sur la connaissance des génomes (en lien avec le Thème 4). Plus ponctuellement sont menés des travaux pilotes mais reconnus sur la valorisation de la biodiversité dans des couverts hétérogènes (agroforesterie, associations végétales y compris en prairie et en forêt mixte, mélanges variétaux, etc.). La caractérisation des propriétés résultantes de robustesse face aux aléas, de productivité, etc. sont souvent au cœur des travaux conduits. Des capteurs, des campagnes de mesures, de la cartographie, sont mobilisés pour cela plus que des (agro)équipements au sens strict et on déborde donc progressivement de ce thème lorsque l'on cible les services écosystémiques.

- **Couverture des services écosystémiques inféodés à la production agricole**

La quantification de la couverture des services écosystémiques est susceptible d'ouvrir la possibilité d'octroyer des paiements pour service rendus. Plus généralement, il en va de la durabilité même des agroécosystèmes que de pouvoir mieux caractériser l'environnement à travers des métriques simples qui rendent compte de l'état de son fonctionnement. On peut penser que la quantification sera rendue d'autant plus nécessaire que l'on passe d'une logique d'obligation de moyens à une obligation plus proche des résultats. Derrière la stratégie de reconnaissance étendue des services écosystémiques couverts, c'est la question du multicritère et de l'internalisation des externalités en lien avec les choix de conduite qui est ciblée. Un développement de l'agroécologie concerne donc la mesure de l'efficacité des outils (incitatifs ou réglementaires) des politiques publiques et donc, *in fine*, la manière de caractériser la couverture des cahiers des charges.

Ce domaine fait largement l'objet des préoccupations du métaprogramme EcoServ qui peuvent être reprises ici dans leur majorité mais sous l'angle de l'appui à la mesure et au pilotage. L'ensemble s'appuie sur des travaux menés dans les départements. Là aussi, si on se limite à l'entrée par la mesure et le pilotage, les travaux éligibles et reconnus sont beaucoup plus difficilement identifiés. C'est donc une priorité scientifique que de les rendre visibles et mobilisables.

- **Rendre compte de la réalité de l'activité biologique et de sa fonctionnalité**

Cette fois encore ce domaine constitue une force de l'Inra. Toutefois, des verrous importants apparaissent si on ajoute la contrainte d'une entrée par le pilotage et la facilitation de la mesure.

Sur la base de ce diagnostic général apparaissent des **besoins méthodologiques** (acquisition des données, gestion et analyse des données, modélisation) pour la mise en œuvre des priorités scientifiques :

- **Mobiliser la boucle « capter- actionner » pour attacher le diagnostic à l'action**

On fait ici référence à ce qui est classiquement présenté comme une chaîne pouvant fonctionner en boucles successives recouvrant l'articulation entre l'observation (à partir de capteurs, de données satellitaires, d'imagerie ou d'une entrée manuelle), un diagnostic d'interprétation de la situation (de l'état des cultures ou des animaux), couplé à la modélisation pour ouvrir sur des recommandations

³²Cela nécessite une articulation fine avec les modèles de simulation des effets des interactions biotiques sur la valeur phénotypique afin d'appuyer le pilotage approprié des systèmes. Cet enjeu est partagé avec le Thème 5. Le présent thème aborde la facette d'acquisition des données, là où le Thème 5 travaille les choix de modélisation et l'articulation au pilotage.

capitalisant les connaissances engrangées (sous différents formats dont l'IA) pouvant se traduire en décision, et enfin, en modulant l'action (en utilisant ou non des systèmes automatisés d'entrée).

En lien avec la couverture de la chaîne « capture des variations–interprétation–décision–action modulée », des priorités méthodologiques relèvent des besoins de performance sur chaque élément de la chaîne ainsi que sur sa cohérence intégrative d'ensemble. Sa capacité à apporter un éclairage sur l'état des processus impliqués et le côté adapté de la réponse sont sans doute deux critères d'évaluation à adosser. La capitalisation progressive des observations peut permettre de repérer des signaux faibles et ainsi d'apporter un regard renouvelé sur les pas de temps longs ou les effets élargis. On peut en attendre une meilleure appréhension de ce qui peut conduire à une durabilité renforcée.

- **Caractériser les hétérogénéités spatiales et temporelles pour mieux les intégrer, voire même les valoriser**

Les hétérogénéités sont autant spatiales que temporelles puisque l'on porte une attention toute particulière à la réalisation des processus et au maintien de leur fonctionnalité dans une perspective dynamique. Il s'agit donc ici d'instruire comment les nouvelles technologies sont en mesure d'offrir des perspectives prometteuses pour contribuer (depuis la télédétection à haute résolution jusqu'à des capteurs *in situ*) à caractériser l'environnement et ses hétérogénéités, à suivre les trajectoires de grands processus biologiques impactant le maintien de la santé, la mise en place des étapes résultant de la réalisation de la production, le bouclage des cycles, la purification de l'eau, la dynamique d'entrée et de sortie des flux. On retrouve ici la liste des activités biologiques dont on peut souhaiter rendre compte. Pour tous ces attendus, c'est plus le delta entre deux points ou entre deux dates qui devient l'objet d'attention que la valeur absolue sauf si cette dernière conduit, via des effets seuils à des effets de bascule. Ces questions renvoient notamment aux besoins d'évaluation du degré de couverture de l'activité biologique (Wells *et al.*, 2013) et, plus largement des services écosystémiques pouvant donner lieu à des aides financières conditionnées au service rendu. Il reste actuellement encore relativement difficile de savoir quels besoins d'équipement pour l'analyse et la compréhension des processus biologiques sous-tendant la réalisation des services sont jugés nécessaires.

Dans les deux situations évoquées ci-dessus et compte tenu du contour de la thématique « agroécologie et agroéquipements » marquée par l'appui à l'ingénierie, plus que les possibilités de phénotypage ou de connaissance de l'état du milieu, des verrous résident aussi dans l'intégration de ces éléments dans des outils de décision ou d'aide à la conduite des systèmes de production. Le partenariat qui peut permettre cela reste encore assez largement à monter.

La masse d'informations à gérer compliquera le travail du décideur si des outils performants ne sont pas développés pour intégrer ces informations dans le pilotage. On peut penser que les **attentes couvrant le potentiel des interactions génétique × environnement × conduite constituent à elles seules un véritable secteur de recherche innovant et encore peu abordé.** L'incapacité à en rendre compte serait susceptible de décrédibiliser la production d'une information plus riche qui peut par ailleurs noyer le décideur s'il ne sait pas comment l'interpréter. Par exemple, comment intégrer l'information de prévision de la performance génomique des animaux dans une conduite individualisée adaptée, et ce en fonction des différents environnements pour tirer parti de cette diversité ? Comment combiner ces flux d'informations dynamiques sur les différents phénotypes et génotypes pour décider des opérations les plus pertinentes à des échelles fines (individus ou petites surfaces) ? La question de la valeur ajoutée apportée par l'interprétation de ces données, traduite en règles de décision, est bien au cœur des questions et compétences de recherche qui intéressent l'Inra. On peut approfondir aussi bien la mesure que le pilotage mais on sera de plus en plus attendu sur notre éclairage et notre contribution à la distinction entre « outil pour phénotyper » et « outil pour piloter ».

C'est aussi dans cette partie relevant de la méthodologie que la question de l'accès aux données, des droits et devoirs concernant leur utilisation, réutilisation et diffusion peut conduire à faire appel à des compétences juridiques pour anticiper les chausse-trappes susceptibles de nous fragiliser ou de nous mobiliser au-delà du raisonnable.

- **Entrée par les champs d'application**

Pour coller aux attendus fixés par notre thème qui sont d'apporter les connaissances ayant un certain potentiel à être actionnables, les méthodologies à maîtriser peuvent être préférentiellement regroupées en cinq secteurs qui sont aussi cinq champs de partenariat socioprofessionnels :

- o Ce qui relève de la caractérisation de l'environnement, des plantes ou des animaux d'élevage dans l'optique de mieux piloter, mieux analyser et mieux reprendre la main sur les processus et les actes associés.
- o Ce qui relève du partage d'information pour déployer les logiques agroécologiques qui s'expriment à l'échelle supra-exploitation sur la caractérisation du risque épidémiologique, le rapprochement offre-demande, et l'articulation aux éléments amont-aval.
- o Les agroéquipements pour les besoins spécifiques de l'agroécologie et des conduites que cela mobilise (par exemple, trieuse de semences).
- o La caractérisation de la réponse des organismes à des fins de phénotypage et de sélection.
- o Les éléments de la traçabilité des modes de conduite pour une différenciation.

Sur ces différents champs, le rapport AI2025 positionnait nombre de ces finalités, dont certaines explicitement estampillées « agroécologie » :

Champs d'application	Finalité visée dans le rapport AI2025
Meilleure caractérisation	Développer des outils de diagnostic sanitaire rapide sur le terrain
Plus-value au partage d'information	Faire évoluer les réseaux d'expérimentation et d'observation
	Adapter les procédures et protocoles d'évaluation du biocontrôle des bioagresseurs des plantes
Couverture de besoins spécifiques	Améliorer la fertilité des sols et atténuer le changement climatique
Réponse en lien avec phénotypage et sélection	Faire évoluer les procédures et protocoles pour favoriser le progrès génétique et son adoption
	Anticiper le changement climatique et s'y adapter : développer un portail de services pour l'agriculture
	Anticiper le changement climatique et s'y adapter : développer et promouvoir une gestion intégrée de l'eau
Traçabilité et différenciation	Développer et diffuser les outils d'évaluation multicritère des systèmes agricoles et alimentaires

Les cadres de travail et partenariats

Les apports des départements et des métaprogrammes

Le département MIA est en première ligne sur ces problématiques, notamment via le Domaine d'Innovation Agriculture numérique. Au-delà, tous les départements et métaprogrammes sont à la fois potentiellement concernés mais aussi peu impliqués stratégiquement. A titre d'exemple, rien ne transparaît spontanément dans les schémas stratégiques des départements EA ou PHASE. De même, la problématique est plutôt cachée au sein du document d'orientation #Inra2025 (même si c'est un élément de #3Perf).

Outils et infrastructures mobilisés ou à développer

Le RMT Agroetica, sous le pilotage FNCUMA, dont l'intitulé est « *Agroéquipement et technologie de l'information et de la communication pour l'agroécologie* », couvre en théorie le thème de ce groupe de travail mais les ambitions visées semblent assez conventionnelles, voire timorées³³.

Parmi les autres dispositifs peuvent être cités : les Instituts de convergence (#DigitAg³⁴), le montage des projets de LIT/TIGA, le partenariat numérique avec In Vivo, etc.

Il convient toutefois de souligner le faible niveau actuel de numérisation des unités expérimentales de l'Inra et la rareté des situations de pilotage de processus en dynamique hors digesteurs et chambres de culture.

Partenariats académiques nationaux et internationaux

Plusieurs partenariats récurrents ou émergents peuvent être mentionnés : Inra-Irstea et Inra-Inria, notamment à travers les programmes de bourses cofinancées avec l'Inria et l'Institut de convergence #DigitAg, qui a consacré un challenge à l'agroécologie (animation Christian Gary). On peut noter que #DigitAg est un lieu de convergence Inra-Inria-Irstea-CIRAD intéressant pour favoriser et faire émerger des approches nouvelles inter-organisations. Dans cette enceinte, l'Inra peut porter la dimension de rupture sur la mise en avant des processus biologiques et pousser l'offre technologique à dépasser l'agriculture de précision pour des objectifs plus ambitieux de durabilité.

A brève échéance, le rapprochement Inra-Irstea devrait offrir de nouvelles opportunités. De même, les contacts préliminaires avec la Chaire Agro-machinisme et nouvelles technologies de l'Institut Polytechnique UniLaSalle sont à développer. A noter aussi, un projet de chaire d'agriculture numérique en cours d'élaboration à AgroParisTech.

Au niveau international, quelques contacts avec des pays reconnus sur les problématiques d'automatisme existent, notamment avec Israël.

La cartographie de collaborateurs potentiels reste à faire. Une source d'information pourrait être les CR des congrès EFITA (*European Federation for Information Technologies in Agriculture, Food and the Environment*) ou ECPLF (*European Conference on Precision Livestock Farming*) qui proposent des avancées intéressantes.

Partenariats socio-économiques et de transfert pour l'innovation

A titre d'exemple d'une vision d'un futur possible, on peut citer Christelle Gée dans une interview donnée dans Sciences et Avenir : « *On peut concevoir une parcelle équipée de nombreux capteurs pour*

³³ 1-Améliorer l'état des connaissances du monde agricole concernant les impacts des agroéquipements sur les chantiers notamment par l'utilisation accrue des nouvelles technologies. 2-Dresser un état des connaissances sur la thématique de l'utilisation et de l'impact des nouvelles technologies des agroéquipements sur les chantiers, notamment ceux utilisant les techniques culturales simplifiées et le désherbage mécanique. Faire le point sur les actions à mener pour coordonner les partenaires travaillant des domaines similaires ou complémentaires. 3-Proposer des pistes de réflexion sur l'évolution des matériels (conception de nouveaux outils, intégration de nouveaux capteurs basés sur des outils optiques ...). Une attention particulière sera portée sur les travaux menés par "l'Atelier Paysan" (ex-ADABio Auto construction). 4-Favoriser l'émergence de projets communs sur des références manquantes, des méthodes, des outils techniques, des référentiels et des documents communs. 5-Valoriser les résultats des différents acteurs et les résultats des travaux collectifs. Il s'agit également d'intégrer la communication de résultats de travaux conduits en dehors de France et transposables à la situation nationale. 6-Accroître les liens de travail, les processus de transfert de connaissances entre les différentes familles de partenaires (de l'agriculteur à la recherche en passant par les constructeurs), en créant une cellule de travail dédiée. Elle aura pour mission de construire les méthodes et outils nécessaires aux transferts efficaces, notamment via la formation (lien entre la recherche et l'enseignement, entre l'enseignement et le développement agricole ...).

³⁴ <https://www.actu-environnement.com/ae/news/digitag-montpellier-agriculture-precision-agro-ecologie-numerique-29281.php4>

étudier la composition du sol, l'humidité de l'air ou la météo. Ceux-ci sont tous connectés à une plateforme de stockage (un cloud). La machine, elle aussi, est connectée à cette plateforme, récupère ces données, en plus de celles issues des capteurs embarqués, pour prendre des décisions et agir au mieux : la machine connectée voit son intelligence entretenue »³⁵.

Il reste sans doute beaucoup à faire pour que la partie « *pour prendre des décisions et agir au mieux* » couvre une réalité tangible à même de mieux couvrir les principes de l'agroécologie. On perçoit la nécessité d'intégrer l'ensemble des mesures de la performance étendue recherchée pour en faire un modèle économique attractif et cela ne va pas spontanément de soi. Couvrir cet attendu est sans doute la contribution que la recherche peut et doit apporter au sein de ses possibles partenariats.

Par ailleurs, la distinction entre mesurer pour connaître et mesurer pour piloter concentre quelques défis majeurs pour rendre les avancées effectives. Si on peut facilement identifier et rendre compte de l'activité biologique d'un sol dans une campagne de mesures pour une expérimentation dédiée, il n'en va pas de même pour imaginer comment cette connaissance peut être traduite dans : une action de modulation des pratiques, l'orientation vers certaines impasses, la manipulation de facteurs correctifs pour accroître ou diminuer la dynamique observée (enfouissage d'un engrais vert, mobilisation du *priming* pour lancer la minéralisation de la matière organique, action via des facteurs physiques et éventuellement chimiques, modification des communautés microbiennes, de micro- ou de macrofaune par ajout d'organismes à fort pouvoir modificateur direct – compétition ou indirect – aération, pouvoir drainant augmenté, acidification réduite, etc. Ceci peut nécessiter d'y consacrer une partie des efforts dans les arènes où la co-conception est de mise. Sans tomber dans une mode béate, il y a sans doute de grands besoins de créativité qui peuvent conduire à mobiliser des approches nouvelles de partenariat, comme des hackathons, par exemple.

Enfin les agroéquipements doivent être plus vus pour leur **fonction première**, celle **d'alléger et d'améliorer le travail des hommes**, en tant qu'organisateur du travail et exécutant de tâches. La construction de machines (atelier paysan, certains fabricants) adaptées à des techniques d'agroécologie, mais également à es capacités d'investissements modestes est un sujet travaillé dans les pays du Sud, sur lequel il faudrait pouvoir s'appuyer au Nord, ou au moins travailler les enjeux d'une transposition.

³⁵ <http://inra.sciencesetavenir.fr/agriculture-precision-au-service-agroecologie/>

Transversalités et perspectives pour la recherche

Ce dernier chapitre synthétise les réflexions des groupes de travail et du comité de pilotage de l'ARP. Deux objectifs ont été poursuivis : identifier, d'une part, des transversalités entre les différents groupes de travail, et d'autre part dresser des perspectives pour renforcer la recherche en agroécologie à l'Inra.

Transversalités

Les six groupes de travail ont précisé le périmètre de leur réflexion. Cette étape a montré que les messages issus du premier chantier agroécologie avaient percolé de manière hétérogène au sein des différentes communautés scientifiques. Elle a aussi souligné les dimensions d'assemblage de connaissances et d'interdisciplinarité qui caractérisent l'agroécologie. Trois groupes de travail sur six ont distingué les travaux « *au cœur de* » l'agroécologie fortement interdisciplinaires et qui considèrent toutes les dimensions du système de production, de ceux « *en appui à* » ou « *pouvant contribuer dans le futur à* » l'agroécologie. Ces derniers peuvent être des développements méthodologiques mobilisables pour l'agroécologie, y compris dans le domaine SHS, ou des expérimentations sur des composantes de l'agroécologie. Ils peuvent porter sur des processus fondamentaux en biologie (photosynthèse, nutrition des plantes, des animaux...) ou sur des processus microbiens dans des systèmes contrôlés (bioprocédés), en lien avec l'évolution possible des caractéristiques des produits issus de systèmes de production agroécologiques.

- Enjeux fondamentaux

Trois **enjeux fondamentaux** pour la recherche en agroécologie ont été identifiés :

- **Le vivant au cœur de la conception des agroécosystèmes**

Le **vivant** est au cœur des enjeux de l'agroécologie (et donc du devenir de l'agriculture), et ceci à toutes les échelles. Déjà identifié lors du premier chantier « agroécologie », ce postulat a pour corollaire que la conception agroécologique des agroécosystèmes doit s'appuyer sur une compréhension et une utilisation plus systémique du vivant en agriculture, notamment grâce à des concepts, des données et des approches de modélisation *ad hoc*.

- **La diversité des agroécosystèmes et l'hétérogénéité des produits**

Les systèmes de production agroécologiques sont étroitement associés à l'idée de **diversité-diversification**, et ceci à différentes échelles : choix des génotypes ou des espèces, gestion à l'échelle intra- et inter-parcellaire, allongement et diversification des rotations, mode de conduite des cultures, capacité des équipements à gérer cette diversité, etc. L'une des conséquences est une tendance à l'augmentation de l'**hétérogénéité** des productions qu'il faut gérer à différents niveaux, y compris dans ses aspects qualitatifs.

- **Des processus socio-économiques spécifiques pour des ruptures**

L'identification des freins et leviers, qu'ils soient techniques, économiques ou sociologiques, est une première étape pour la reconception des systèmes de production. Passer de cette analyse à la mise en mouvement des exploitations agricoles, des filières et des territoires implique de nouveaux modes de gouvernance, de nouvelles modalités d'accompagnement économique et social des acteurs,

de nouveaux modes de travail les associant. L'implication des sciences humaines et sociales est particulièrement importante par le fait que l'agroécologie marque une **rupture**, avec des fondements nouveaux dans la conception des systèmes agri-alimentaires.

- Besoins de recherche

Sur ces bases, quelques fronts de recherche ont été identifiés :

- **Considérer davantage de niveaux d'interaction et rétroaction dans la conception des agroécosystèmes** : $G \times M \times E \times C \times P$, où *G* est la variabilité génétique entre individus (plantes, animaux, arbres) et entre populations, *M* est la variabilité de l'environnement microbien (microbiote intestinal, microbiote de la feuille, des racines, du sol...³⁶), *E* est la variabilité de l'environnement (climat, ressources en eau, distribution des sols...) et la prise en compte des interactions avec le fonctionnement de l'agroécosystème, *C* est la conduite de l'exploitation, du système de production et du système de culture, avec notamment la question de la modélisation des choix de l'agriculteur, et *P* est la variabilité de la matière première issue d'exploitations agroécologiques, qui remet en cause le paradigme selon lequel la transformation peut tout faire en gommant la diversité initiale. L'appréhension de cette complexité doit être plus étroitement liée aux réseaux d'acteurs qui la déterminent.
- **Analyser les conséquences de la diversité des agroécosystèmes sur celle de la matière première produite.** Est-il possible de tirer parti de la diversité d'une matière première hétérogène, pour élaborer différemment les produits à finalité alimentaire comme non-alimentaire, tout en satisfaisant l'utilisateur final ? De cette question découle la nécessité de revisiter le **rôle des normes et des standards**, élaborés pour garantir un niveau de qualité à l'utilisateur final.

Plusieurs aspects doivent être considérés : comment gérer les variétés hétérogènes ? Faut-il considérer les semences et leurs environnements (incluant les différents) ? Comment les normes peuvent-elles accompagner la transition et les pratiques agroécologiques qui induisent une hétérogénéité de la qualité des produits que la chaîne de collecte et de transformation doit pouvoir absorber ? Est-il souhaitable que les principes de l'agroécologie conduisent à des labels « Agroécologie » ?

Si la qualité des produits est modifiée alors la définition d'un label peut en tenir compte et contribuer à établir la confiance entre le consommateur et le producteur. Si elle ne l'est pas, l'attrait pour le consommateur pour les produits issus de l'agroécologie relève d'une **motivation sociétale** pour l'amélioration de l'environnement. Finalement, ne faut-il pas voir l'agroécologie comme un ensemble de **principes et de trajectoires toujours questionnés**, en évitant toute référence normative ?

- **Concevoir des agroéquipements pour caractériser et gérer l'hétérogénéité.** Il s'agit de caractériser de manière numérique les **phénotypes** des individus (imagerie, capteurs), afin de compléter une connaissance déjà numérique des génotypes, mais aussi de caractériser **l'environnement** et son **hétérogénéité** (capteurs, données satellitaires), voire les produits et procédés de fabrication des produits. Il s'agit aussi de gérer cette hétérogénéité par la **mise au point d'outils** (logiciels, outils d'aide à la décision...) qui permettent de moduler de manière plus ou moins automatisée les actions en appui à une conduite d'exploitation diversifiée. Le terme « gérer » ne doit plus être vu dans sa dimension « subie », c'est-à-dire « être en mesure de pallier à » mais au sens « d'entretenir et de tirer profit, voire d'amplifier », à travers des approches différenciées. On attend de cette différenciation, de **meilleures propriétés de**

³⁶ La sélection végétale parle de phénotype augmenté ; la sélection animale identifie le microbiote comme une nouvelle composante de la prédiction des performances ; la notion d'holobionte (individu + microbiome) se développe.

robustesse et de résilience et de couverture minimale des services écosystémiques dont l'agroécosystème a besoin pour sa pérennisation.

- **Concevoir des modes de gouvernance des systèmes socio-économiques pour accompagner les transitions des agrosystèmes** et fonder de manière nouvelle l'aide à l'agriculture. Il s'agit d'accompagner les transitions sur le long terme en intégrant un certain nombre d'étapes, de disposer de systèmes assuranciers pour couvrir les risques et de faire coexister des systèmes variés. Plus généralement, les systèmes d'aides à l'agriculture devront intégrer : (i) des composantes biologiques plus diverses (sols, couverts, complémentarités élevage/culture, etc.) ; (ii) une adéquation plus forte aux contraintes et potentialités des milieux ; et (iii) des dimensions sociales et économiques plus larges y compris en ce qui concerne le travail en agriculture.

- *Thèmes transversaux*

- **L'information, les données**

La prise en compte **d'interactions à multiples dimensions** induit un **besoin massif en données** : il faut expérimenter comme observer, et combiner les deux à différentes échelles.

Par exemple, pour analyser l'effet de la diversité génétique dans les protocoles visant à tester l'interaction diversité génétique x modes de conduite x environnement, il faut analyser : (i) le phénotype et le génotype des individus (animaux, plantes) par un jeu de marqueurs communs définis par espèce, ceci afin de quantifier la diversité présente ; (ii) caractériser l'environnement (par exemple, état des sols) en relation avec des fonctions d'intérêt agronomique ; (et iii) comparer *in fine* en profondeur leur réponse selon différents protocoles. De nombreuses expérimentations « système » mises en avant pour la transition agroécologique de l'exploitation agricole n'intègrent actuellement pas la dimension génétique et le levier variétal. Le choix des génotypes est généralement occulté ou fait par défaut. Dans ces expérimentations, la diversité génétique pourrait constituer une variable explicative, mais aussi expliquée et contextualisée. Il y a un réel intérêt à y adjoindre des études génériques de mécanismes et à développer des approches de modélisation pour la biologie et l'écologie prédictive.

Les approches numériques peuvent permettre de tester plus de niveaux d'interaction et de combinatoires dans les dispositifs expérimentaux de l'Inra. Cela peut nécessiter de disposer de réseaux de capteurs connectés venant alimenter des modèles, utiles pour analyser et comprendre les résultats des expérimentations. Les pratiques mises en œuvre au sein d'unités expérimentales différant le plus souvent des conditions réelles des exploitations, de nouvelles stratégies d'acquisition de données doivent être mises en place, complétant celle des dispositifs expérimentaux de la recherche, par la mobilisation d'autres sources de données (par exemple, télédétection) ou issues d'autres dispositifs (par exemple, collectées chez les agriculteurs). Les recherches participatives sont une voie pour développer et valoriser des réseaux d'acteurs sur un mode '*actor-driven*' et '*citizen-driven*'. De tels réseaux sont particulièrement utiles à l'étude de l'adaptation au milieu³⁷ et au suivi de trajectoires de transition³⁸. Ils permettent de tester des conditions sortant des gammes habituelles afin d'anticiper de futurs déploiements ou changements. Par exemple, la sélection dans un système changeant (environnement et espèces d'intérêt) gagnerait à impliquer l'aval et à associer les agriculteurs. Les méthodes d'analyse des

³⁷ Voir par exemple l'initiative OPTIMA du LIPM de Toulouse : un projet participatif sur l'adaptation des plantes à leur environnement: <http://www.toulouse.inra.fr/Toutes-les-actualites/OPTIMA>

³⁸ Sur les transitions alimentaires appuyées sur des réseaux locaux : <http://www.rennes.inra.fr/Evenements/Diversifood>

données devront alors s'adapter à des données incomplètes ou obtenues sur des effectifs limités. Cette stratégie peut compléter le dispositif expérimental de l'Inra, ce dernier étant plus spécifiquement dédié à des approches fonctionnelles permettant de déterminer les traits majeurs de la réponse des individus aux conditions de milieu (sols, climats, états hydriques, modes de conduites), et de proposer ainsi des interprétations pour les résultats obtenus dans les exploitations agricoles.

La réflexion doit se poursuivre pour mieux collecter et utiliser des données actuellement dispersées et les rendre compatibles et accessibles. Cet enjeu, déjà identifié pour les dispositifs expérimentaux de l'Inra, est encore plus critique lorsqu'il concerne des dispositifs impliquant des acteurs variés.

- **L'appréhension du risque : de l'aléa à l'incertitude**

La transition agroécologique entraîne une remise en cause de pratiques bien établies, contrôlées par l'apport d'intrants. Elle vise le développement de systèmes agricoles nouveaux, sans en préconiser un seul, meilleur ou dominant. Cette transition peut être perçue comme une importante prise de risque au niveau de chaque exploitant, et probablement plus encore au niveau d'une filière qui va devoir gérer une plus grande diversité d'acteurs et de cahiers des charges. Les risques d'une telle transition sont liés au passage d'un système prédéfini pour lequel des itinéraires types sont définis et où les intrants sont les variables d'ajustement, à un système qui doit s'adapter aux incertitudes (probabilisables ou non) de par ses caractéristiques propres (régulations systémiques, gestion adaptative). Les risques se situent aussi au niveau du consommateur qui peut choisir d'encourager ou d'ignorer la diversification des systèmes selon son comportement d'acheteur.

Deux approches sont incontournables : (i) la **modélisation**, pour augmenter la capacité prédictive de l'évolution des systèmes agricoles à différentes échelles de temps ; cette modélisation peut s'assortir d'approches assurancielles pour aider au pilotage d'agroécosystèmes nouveaux et plus sensibles aux aléas ; et (ii) l'**apprentissage collectif**, par le partage d'expériences, de savoirs d'origines diverses, s'inscrivant dans une démarche de sciences participatives. Cet apprentissage peut être complexifié par de possibles jeux d'acteurs.

La question du changement climatique (changements tendanciels et variabilité accrue) est posée à plusieurs niveaux : comment les systèmes agroécologiques vont-ils réagir ? Seront-ils fragilisés et pourquoi (moindre ressource en eau par exemple) ? Seront-ils au contraire plus aptes à absorber des chocs ou des enchaînements climatiques particuliers, car plus autonomes et moins dépendants des intrants (y compris de la ressource en eau). Leur conception doit intégrer ce risque climatique, y compris en terme de diversification.

- **Les changements d'échelle**

L'agroécologie demande de prendre en compte des processus sur des temps courts (par exemple, le besoin immédiat de la plante en azote ou la régulation des adventices) et sur des temps longs (par exemple, la restauration ou le maintien de la fertilité des sols via les communautés bactériennes, l'inoculum de ravageurs, les banques de graines, etc.). La contribution au maintien de la biodiversité dans les paysages, y compris celle qui est moins strictement inféodée aux espaces agricoles mais qui en dépend, constitue un enjeu de long terme, car les solutions pour « remettre un système à 0 » (par exemple pour réduire fortement une population de bioagresseurs qui serait devenue trop abondante) sont hors du champ d'une pratique agroécologique. Globalement les actions préventives sont amenées à prendre le pas sur les actions curatives. D'autres services que la production sont visés. La gestion n'est plus

prédéterminée mais adaptative : les objectifs et règles de décision peuvent évoluer en fonction des connaissances acquises sur le long terme, comme au fur et à mesure des variations de l'état du système.

Les systèmes menés en agroécologie dépendent d'effets de voisinage, par exemple des éléments du paysage. Leur gestion prend donc en compte des étendues spatiales supérieures, de l'échelle parcellaire (plante-plante, plantes-organismes associés...) à celle de l'exploitation agricole, du paysage et du territoire. Pour gérer des pathogènes ou des bioagresseurs, il faut raisonner à l'échelle de métapopulations maintenues dans un processus d'équilibre dynamique. Dans les territoires, les échanges de ressources (biomasse, effluents, machines...) entre exploitations engagées dans l'agroécologie sont plus importants. Les processus sont pilotés à différentes échelles dont il faut réfléchir les articulations. La question des changements d'échelle est plus complexe du fait que les solutions sont très dépendantes, dans le temps et dans l'espace, des conditions locales, et qu'elles s'inscrivent nécessairement dans le cadre d'une gestion adaptative pour laquelle les objectifs sont revus au fur et à mesure de la conduite de l'agroécosystème. La généralité n'est pas dans les solutions techniques, mais plutôt dans les cadres et outils pour favoriser la capacité d'adaptation des acteurs.

Enfin, l'agroécosystème prenant valeur de bien commun, les questions de coordination entre acteurs hétérogènes d'un territoire sont au cœur de l'agroécologie. Les agriculteurs, les forestiers, les gestionnaires de l'eau, mais aussi les acteurs de la collecte (coopératives) et les industries de transformation sont des acteurs importants à considérer en regard de ces questions de coordination.

Perspectives pour la recherche à l'Inra

Des fronts de sciences, des fronts méthodologiques et des dispositifs de recherche en lien avec la société, ont été identifiés pour amplifier la recherche pour l'agroécologie.

- Fronts de sciences

Les fronts de sciences se situent à deux niveaux, ceux qui touchent à la manière de repenser les agroécosystèmes (production agricole et alimentation), et ceux, plus techniques, de la mise en œuvre de leur nouvelle gestion.

- **Repenser les agroécosystèmes sur de nouvelles bases conceptuelles**
 - o Penser les agroécosystèmes à partir d'une nécessité et d'une opportunité, celle de **maintenir et utiliser le vivant, dans un cadre de ressources limitées** (production de biomasse et de produits agricoles, source d'une alimentation suffisante en quantité et en qualité). Répondre à cette exigence oblige à identifier des organisations et des systèmes qui prennent en compte les impacts écologiques et humains dans les modes de production agricole et dans l'alimentation.
 - o Renforcer les **recherches systémiques**, en prenant en compte (i) une utilisation optimale des flux de matière ; (ii) des modèles économiques innovants ; et (iii) la compréhension des atouts et contraintes des conditions (milieux/flux, acteurs/formes de gouvernance des flux) qui prévalent localement, dans l'optique de mieux en tirer parti. Les approches d'**écologie industrielle**, basées sur la recherche d'une efficacité des flux, sont peu développées à l'Inra. Une réflexion pourrait être menée sur leur intérêt potentiel et sur les modalités de leur contribution (partenariat, intégration de compétences). L'ARP

bioéconomie partage cet enjeu, avec des niveaux à la fois plus englobants et plus spécifiques, comme celui des échanges territoriaux de biomasse.

- o **Considérer des formes d'agroécologie variées**, dans des environnements divers allant d'une **agroécologie urbaine et péri-urbaine** combinant forte productivité, main d'œuvre importante et lien aux consommateurs, qui va se développer en lien avec les évolutions démographiques et les attentes des consommateurs en ville, à une **agroécologie rurale** adaptée aux potentialités des milieux, visant la minimisation des intrants et la diversification des productions dans le temps et l'espace.
- **Connaître et gérer les agroécosystèmes**
 - o **Elaborer des indicateurs pour caractériser la biodiversité** reste un front de science qui doit être décliné pour l'agroécologie : quels indicateurs fonctionnels ? Peut-on définir des valeurs seuils, des échelles spécifiques selon les contextes ? Sont-ils recouvrants, substituables ? La notion de compensation écologique qui s'appuie sur de tels indicateurs, alors qu'elle n'est pas scientifiquement fondée (spécificité, et donc non substituabilité et non permutabilité des écosystèmes), se base sur la définition de tels indicateurs pour caractériser les écosystèmes et leurs fonctionnalités. La reconnaissance nécessairement normative de systèmes agroécologiques dans le cadre de la PAC s'appuiera sur de tels indicateurs.
 - o **Le passage du suivi au pilotage de l'exploitation agricole.** Les capteurs et outils de suivi des cultures ou des animaux sont encore peu courants, et encore moins utilisés pour aider au pilotage des systèmes, qu'ils soient ou non à visée agroécologique. La question de l'amélioration du pilotage va au-delà de la simple acquisition d'informations. Elle concerne la capacité à identifier et à entretenir des processus en équilibre dynamique, notamment par la mesure de flux, par des méthodes de contrôle et d'assimilation de données et par des systèmes d'aide à la décision. Ce pilotage prend en compte, au-delà des dimensions biologiques, des dimensions socio-économiques (travail, marché...) et de contexte (prévisions climatiques, vulnérabilité des productions...) qui participent du pilotage de l'exploitation. Ce front de science est aussi l'assemblage cohérent d'informations écologiques, mais aussi de contextes et de contraintes pour aider au pilotage de l'exploitation.
 - o **L'analyse et la gestion du risque et de l'incertitude dans la transition des agroécosystèmes.** Les chercheurs en économie et mathématiques travaillent sur l'analyse du risque, sur les incertitudes, sur le contrôle de systèmes dynamiques en situation d'incertitude. La prospective Inra-Irstea qui vient d'être lancée va réaliser un état des lieux des recherches et des perspectives dans le domaine des risques. D'autres travaux portent sur les propriétés de vulnérabilité, de robustesse, de résilience, d'adaptabilité des agroécosystèmes. Le partage et l'apprentissage de ces approches peuvent faire l'objet d'écoles chercheurs. Ces approches dépassent le seul contexte de l'agroécologie, mais ils sont, en agroécologie, au centre de la conception et de la transition de systèmes nouveaux, plus résilients et plus adaptables, dans des considérations de long terme. Du fait de leur complexité, prédire leur dynamique reste difficile. Le contexte du changement climatique renforce l'importance du front de recherche posant la question de la convergence entre transition climatique et agroécologique des agroécosystèmes.
 - o **L'analyse des co-bénéfices et effets adverses de l'agroécologie, des coûts et consentements à payer pour une transition.** L'évolution des systèmes agricoles va de

l'agroécologie à des grandes fermes à caractère industriel, accompagnée en cela par des normes et des politiques dédiées. La question de l'analyse des co-bénéfices et effets adverses doit prendre appui sur des causalités de long terme : Qui est prêt à payer, pour quoi et avec quelles incitations ? Quels impacts en termes socio-économiques, de production, d'alimentation et d'environnement ?

- **Evaluer les impacts du développement de systèmes conduits sur les principes de l'agroécologie**
 - Le développement de systèmes conduits en agroécologie, à l'échelle de régions, de la France, de la planète, aura des conséquences sur le travail en agriculture, sur les produits et productions agricoles, sur les filières et leurs places et complémentarités, sur les régimes alimentaires. L'évaluation environnementale, mais aussi sociales et économiques doit faire l'objet de travaux de recherche à différentes échelles pour mieux projeter les conséquences, pour tenir compte des enjeux du changement climatique, de la démographie et de la sécurité alimentaire.

- Fronts méthodologiques

Des méthodes nouvelles et plus systémiques sont en cours de développement :

- Une meilleure connaissance des dynamiques des agroécosystèmes, par les apports de **l'agriculture numérique**, des **méthodes de proxi- et télédétection**, et d'**analyse spatio-temporelle des données** (écologie spatiale, statistique spatio-temporelles, approches relevant du 'Big Data', ...). Ces démarches doivent notamment s'appuyer sur des **capteurs biologiques**, des suivis à des fins de connaissance et de pilotage des systèmes, permettant d'approcher la complexité des systèmes en agroécologie, riches par nature en interactions biotiques et abiotiques.
- **Le renforcement de méthodes de diagnostic et de gestion des agroécosystèmes.** L'**évaluation multicritère** peut internaliser, à l'échelle de l'exploitation agricole, des externalités actuellement non prises en compte dans leur suivi, pour faire évoluer les critères de performance des agroécosystèmes selon les différentes dimensions de la durabilité. La plateforme d'analyse multicritère interdisciplinaire MEANS et le pôle ELSA de Montpellier (Irstea, CIRAD, Ecole des Mines d'Alès, INRA, Montpellier SupAgro) doivent être mieux mobilisés. Les approches récentes en **ACV conséquentielle**, incluant une régionalisation des impacts, doivent se poursuivre, en intégrant des **dimensions sociales et économiques**. Une réflexion sur le besoin de développer le domaine de **l'agro-logistique**, en particulier sur l'impact environnemental du transport des produits issus de l'agroécologie, devant y être associée.
- **Le besoin de faire évoluer la modélisation**, notamment par une **simplification des modèles, des approches de méta-modélisation**, pour traiter du **changement d'échelle et de la complexité inhérente à l'agroécologie**. Cette réflexion converge avec celle menée dans le cadre de l'ARP « Biologie et Ecologie prédictive » : Comment les sorties de modèles à un niveau d'organisation « bas » peuvent-elles être utilisées pour alimenter un modèle à niveau d'organisation « haut » ? Comment valoriser des modèles de culture dans d'autres modèles d'agroécosystèmes, de paysages, de filières ? Comment les **connaissances qualitatives** (issues de programmes scientifiques ou d'experts) peuvent-elles pallier le manque de connaissances quantitatives sur les interactions biotiques, leurs dynamiques spatiales et temporelles ? De telles approches, ou des approches mixtes (mêlant données quantitatives et qualitatives) ont

été développées (par ex. dans le réseau INCOM de CEPIA, le réseau MIA-SPE-SA ModStatSAP). Le partage et l'apprentissage de ces approches, le renforcement des liens entre thématiciens et spécialistes des méthodes peut accroître les **ambitions de modélisation de systèmes complexes, d'anticipation et de gestion des risques**.

Favoriser l'interdisciplinarité entre les sciences humaines et sociales, les sciences de l'environnement et les disciplines biotechniques est un premier enjeu essentiel. Mieux articuler connaissances scientifiques et action, individuelle et collective, favoriser le partage d'expérience constitue un second enjeu. Il s'agit d'échanger sur la façon de penser, d'agir et d'évaluer dans une démarche **transdisciplinaire**. Le décloisonnement et la mise en cohérence des compétences sont pour cela des conditions nécessaires (mais pas suffisantes). Il s'agit (i) de mobiliser les compétences existantes, de les faire évoluer, de les associer autour de problématiques d'agroécologie ; (ii) de trouver et/ou de former des « assembleurs » de compétences ; et (iii) d'identifier les domaines qui nécessitent un renforcement, notamment en faisant évoluer les compétences actuelles. Il s'agit par exemple de favoriser la montée en compétence dans le domaine des interactions génétique/environnement, dans la conceptualisation et l'analyse des socioécosystèmes, dans la modélisation bioéconomique ou dans l'analyse des données issues du numérique.

Dans tous les cas, l'ambition doit être de promouvoir une vision plus systémique et plus interdisciplinaire. Il faut recruter mais favoriser plus encore l'implication de chercheurs dans des démarches interdisciplinaires aux interfaces entre agriculture et alimentation, sciences biotechniques et sciences sociales. De manière transversale, quelques domaines sont identifiés comme étant porteur de nouvelles connaissances, comme le domaine de **l'Intelligence Artificielle** (ingénierie des connaissances, ontologies, modèles de décision et d'argumentation, réseau de neurones ...), dans le cadre notamment de la coopération avec l'Inria.

- *Dispositifs de recherche*

Les métaprogrammes (MP), dans leur principe d'interdisciplinarité, sont des instruments appropriés au développement de l'agroécologie. A titre d'exemple, le MP EcoServ a proposé dans son dernier appel d'offres une priorité sur « la modélisation du fonctionnement des écosystèmes, intégrant explicitement la biodiversité pour l'évaluation de la fourniture de services multiples ». GloFoodS a soutenu des projets interdisciplinaires sur l'analyse de systèmes alimentaires basés sur l'agroécologie dans des pays en développement, notamment en milieu périurbain. Proposer un MP sur l'agroécologie n'aurait pas de sens, tant l'agroécologie est centrale dans de nombreuses activités de l'Inra. Dans le cadre de la réflexion en cours pour définir de nouveaux MP, l'agroécologie sera présente, avec une intensité variable. Elle sera au cœur du MP sur l'AB et présente dans la plupart des autres MP.

La dynamique initiée autour de projets de territoires d'innovation est utile pour construire des projet d'agroécologie territoriale, dans un contexte favorable aux interactions avec les porteurs d'enjeux. A titre d'exemple, les projets « Dijon, territoire modèle du système alimentaire durable de 2030 », « Acteurs économiques et citoyens construisent les territoires viticoles responsables et innovants de demain », « Champs du possible, villes du futur », « Des hommes et des arbres, les racines de demain » et « LIT Ouest Territoires d'Elevage » portent de manière plus ou moins forte des problématiques d'agroécologie. Ceci pourrait permettre d'aborder diverses questions originales comme par exemple : les critères et la dynamique d'adhésion des exploitations aux principes de l'agroécologie font-ils sens à une échelle territoriale ? L'agroécologie est-elle perçue comme une fin, ou comme une trajectoire toujours révisable, sur la base de principes fondamentaux ? Quel rôle pour des labels ?

Les infrastructures et dispositifs expérimentaux contribuent et contribueront au développement de l'agroécologie, en mettant plus encore **l'agroécologie au cœur du projet de certaines unités**

expérimentales : y augmenter la collecte d'information par une instrumentation et une acquisition de données numériques, **par de nouvelles stratégies d'acquisition de données *in situ* ou issues d'autres sources** (par exemple, télédétection), par une capacité à gérer, croiser, interpréter les données à différentes échelles spatiales et temporelles pour leur donner sens pour l'agroécologie. **Les travaux de modélisation en agroécologie doivent s'inscrire dans la dynamique de construction des e-infrastructures.** Il s'agit notamment de faire dialoguer les initiatives actuelles, mettant en réseau les outils et compétences dans différents champs et articulant des e-infrastructures sur les données avec des e-infrastructures dédiées à la modélisation. **La construction d'un dispositif « innovation ouverte »**, en lien avec de petits living-labs territoriaux, peuvent se concrétiser autour de quelques objectifs. Des initiatives innovantes existent (par exemple, le projet CA-SYS à Epoisses). Des dispositifs comme le réseau DEPHY, ou les 500 parcelles ENI et les réseaux d'AB, peuvent faire partie de ce type de dispositif, en les faisant évoluer (pratiques testées, nature des données...).

Nous remercions vivement les très nombreuses personnes qui ont participé et apporté un regard critique à ce travail de prospective, scientifiques et membres des conseils de l'Inra.

Bibliographie

Introduction

- Angeon V., Ozier-Lafontaine H., Lesueur-Jannoyer M., Larade A., 2014. Agroecology theory, controversy and governance. In Ozier-Lafontaine H., Lesueur-Jannoyer M. (eds.), *Agroecology and Global Change. Sust. Agric. Rev.*, **14**, 1–22.
- ANR, 2015. Emergence de l'agroécologie et perspectives pour le futur. *Les cahiers de l'ANR*, 53 pp. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/documents/2015/agroeco/ANR-CAHIER-AGRO-2015.pdf>
- Bell M., Bellon S., 2018. Generalization without universalization: Towards an agroecology theory. *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, **42**, 605–611.
- Claveirole C., 2016. La transition agroécologique : défis et enjeux. *Les Avis du CESE*, **13**, 105 pp.
- Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M., Tichit M., 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*, **7**, 1028–1043.
- Duru M., Farès M., Therond O., 2014. Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain), la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. *Cah. Agric.*, **23**, 84–95.
- Francis C., Lieblein G., Gliessman S., Breland T.A., Creamer N., Harwood R., Saolomonsson L., Helenius J., Rickerl D., Salvador R., Wiedenhoft M., Simmons S., Allen P., Altieri M., Flora C., Poincelot R., 2003. Agroecology: the ecology of food systems. *J. Sustain. Agric.*, **22**, 99–118.
- Garcia F., Gascuel-Odoux C., Soussana J.F. (eds), 2014. Colloque sur les nouveaux défis de la modélisation : l'agro-écologie – Synthèse. Inra, 49 pp.
- Gliessman S.R., 2006. *Agroecology: the Ecology of Sustainable Food Systems*. CRC press, 408 pp.
- Inra, 2012. Rapport du chantier agro-écologie. 107 pp.
- Lemanceau P., Maron P.-A., Mazurier S., Mougél C., Pivato B., Plassart P., Ranjard L., Revellin C., Tardy V., Wipf D., 2015. Understanding and managing soil biodiversity: a major challenge in agroecology. *Agron. Sust. Dev.*, **35**, 67–81.
- Soussana J.-F., Côte F., 2016. Agro-écologie : le positionnement des recherches de l'Inra et du Cirad, 8 pp. <https://www.cirad.fr/content/download/11293/132717/version/3/file/Agro-ecologie-Inra-CIRAD-note-longue.pdf>
- Tchamitchian M., 2018. Modélisation agroécologique : analyse du contenu du WoS, place de l'INRA. Rapport interne Inra, 23 pp.
- Toffolini Q., Cardona A., Casagrande M., Dedieu B., Girard N., Ollion E., 2018. Agroecology as farmers' situated ways of acting: a conceptual framework. *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, online.
- Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sust. Dev.*, **29**, 503–515.
- Wezel A., Goris M., Bruil J., Félix G.F., Peeters A., Bàrberi P., Bellon S., Migliorini P., 2018. Challenges and action points to amplify agroecology in Europe. *Sustainability*, **10**, 1598.

Intégration de l'agroécologie dans les filières

- Asioli D., Aschemann-Witzel J., Caputo V., Vecchio R., Annunziata A., Næs T., Varela P., 2017. Making sense of the “clean label” trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food Res. Int.*, **99**, 58–71.
- Bernacchia R., Preti R., Vinci G., 2016. Organic and conventional foods: differences in nutrients. *Ital. J. Food Sci.*, **28**, 565–578.
- Bonroy O., Constantatos C., 2015. On the economics of labels: how their introduction affects the functioning of markets and the welfare of all participants. *Am. J. Agricult. Econ.*, **97**, 239–259.
- Bougherara D., Gassmann X., Piet L., Reynaud A., 2017. Structural estimation of farmers' risk and ambiguity preferences: A field experiment. *Eur. Rev. Agric. Econ.*, **44**, 782–808.
- Boysen O., Jensen H.G., Matthew A., 2016. Impact of EU agricultural policy on developing countries: a Uganda case study. *J. Int. Trade Econ. Dev.*, **25**, 377–402.
- Chiffolleau Y., Millet-Amrani S., Canard A., 2016. From short food supply chains to sustainable agriculture in urban food systems: food democracy as a vector of transition. *Agriculture*, **6**, 57.
- Cintra R.M.G., Malheiros J.M., Ferraz A.P.R., Chardulo L.A.L., 2018. A review of nutritional characteristics of organic animal foods: eggs, milk, and meat. *Nutr. Food Technol. Open Access*, **4**, 1.
- Clark B., Stewart G.B., Panzone L.A., Kyriazakis I., Frewer L.J., 2017. Citizens, consumers and farm animal welfare: A meta-analysis of willingness-to-pay studies. *Food Policy*, **68**, 112–127.

- Connolly C., Klaiber H.A., 2014. Does organic command a premium when the food is already local? *Am. J. Agric. Econ.*, **96**, 1102–1116.
- David G., Gontard N., Angellier-Coussy H., 2019. Mitigating the impact of cellulose particles on the performance of biopolyester-based composites by gas-phase esterification. *Polymers*, **11**, 200.
- Dolgoplova I., Teuber R., 2018. Consumers' willingness to pay for health benefits in food products: A meta-analysis. *Appl. Econ. Persp. Pol.*, **2**, 333–352.
- Drexler D., Fiala J., Havlíčková A., Potůčková A., Souček M., 2018. The effect of organic food labels on consumer attention. *J. Food Prod. Market.*, **24**, 441–455.
- Duval L., Binet T., Dupraz P., Leplay S., Etrillard C., Pech M., Deniel E., Laustriat M., 2016. Paiements pour services environnementaux et méthodes d'évaluation économique. Enseignements pour les mesures agro-environnementales de la politique agricole commune. Rapport SSP, Oréade-Brèche, 135 p.
- Etrillard C., 2015, Contrats et écosystèmes agricoles : des mesures agroenvironnementales aux paiements pour services environnementaux. *Droit de l'Environnement*, **237**, 296.
- Etrillard C., 2016. Paiements pour services environnementaux : nouveaux instruments de politique publique environnementale. *Développement Durable et Territoires*, **7**, 1.
- Gontard N., Sonesson U., Birkved M., Majone M., Bolzonella D., Celli A., Angellier-Coussy H., Jang G.-W., Verniquet A., Broeze J., Schaer B., Batista A.P., Sebok A., 2018. A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **48**, 614–654.
- Handayati Y., Simatupang T.M., Perdana T., 2015. Agri-food supply chain coordination: the state-of-the-art and recent developments. *Logist. Res.*, **8**, 5.
- Hemmerling S., Hamm U., Spiller A., 2015. Consumption behaviour regarding organic food from a marketing perspective - a literature review. *Organic Agric.*, **5**, 277–313.
- Hill S.B., 1985. Redesigning the food system for sustainability. *Alternatives*, **12**, 32–36.
- Jones A.D., 2017. Critical review of the emerging research evidence on agricultural biodiversity, diet diversity, and nutritional status in low- and middle-income countries. *Nutr. Rev.*, **75**, 769–782.
- Marette S., 2016. Quality, market mechanisms and regulation in the food chain. *Bio-based Appl. Econ.*, **5**, 217–235.
- Mie A., Andersen H.R., Gunnarsson S., Kahl J., Kesse-Guyot E., Rembiałkowska E., Quaglio G., Grandjean P., 2017. Human health implications of organic food and organic agriculture: a comprehensive review. *Environ. Health*, **16**, 111.
- Sierra J., Chopart J.L., Guindé L., 2016. Optimization of biomass and compost management to sustain soil organic matter in energy cane cropping systems in a tropical polluted soil: a modelling study. *Bioenerg. Res.*, **9**, 798–808.
- Sörqvist P., Hedblom D., Holmgren M., Haga A., Langeborg L., Nöstl A., Kågström J., 2013. Who needs cream and sugar when there is eco-labeling? Taste and willingness to pay for "eco-friendly" coffee. *PLoS One*, **8**, e80719.
- Sproul T.W., Kropp J.D., Barr K.D., 2015. The pricing of community supported agriculture shares: evidence from New England. *Agric. Finance Rev.*, **75**, 313–329.
- Średnicka-Tober D., Barański M., Seal C., Sanderson R., Benbrook C., Steinshamn H., Gromadzka-Ostrowska J., Rembiałkowska E., Skwarło-Sońta K., Eyre M., Cozzi G., Krogh Larsen M., Jordon T., Niggli U., Sakowski T., Calder P.C., Burdge G.C., Sotiraki S., Stefanakis A., Yolcu H., Stergiadis S., Chatzidimitriou E., Butler G., Stewart G., Leifert C., 2016. Composition differences between organic and conventional meat: a systematic literature review and meta-analysis. *Br. J. Nutr.*, **115**, 994–1011.
- Suder A., Kahraman C., 2018. Multiattribute evaluation of organic and inorganic agricultural food investments using fuzzy TOPSIS. *Technol. Econ. Dev. Econ.*, **24**, 844–858.
- Tacconi L., 2012. Redefining payments for environmental services. *Ecol. Econ.*, **73**, 29–36.

Transition agroécologique de l'exploitation agricole

- Andrieu N., Dugué P., Le Gal P.-Y., Rueff M., Schaller N., Sempore A., 2012. Validating a whole farm modelling with stakeholders: evidence from a west African case. *J. Agric. Sci.*, **4**, 159–173.
- Anglade J., Godfroy M., Coquil X. 2018. A device for sharing knowledge and experiences on experimental farm station to sustain the agroecological transition. Theme 1. Learning and knowledge systems, education, extension and advisory services. Session Learning, participatory methods, system thinking, design: New roles of extension and research. *IFSA 2018 Symposium Farming systems: facing uncertainties and enhancing opportunities, 01-05 July 2018, Chania, Greece*.
- Bareille F., Letort E., 2018. How do farmers manage crop biodiversity? A dynamic acreage model with productive feedback. *Eur. Rev. Agricult. Econ.* **45**, 617–639.

- Bellon-Maurel V., Huyghe C., 2016. L'innovation technologique dans l'agriculture. *Géoeconomie*, **80**, 159–180.
- Bland W.L., Bell M.M., 2007. A holon approach to agroecology. *Int. J. Agric. Sustain.*, **5**, 280–294.
- Bouttes M., Darnhofer I., Martin G., 2018a. Converting to organic farming as a way to enhance adaptive capacity. *Organ. Agric.*, 1–13.
- Bouttes M., San Cristobal M., Martin G., 2018b. Vulnerability as a function of trade-offs between productivity and efficiency is driven by farmers' practices on French organic dairy farms. *Eur. J. Agron.*, **94**, 89–97.
- Bouttes M., Bize N., Maréchal G., Michel G., Martin G. Dairy farms initially far away from organic farming models decrease most their vulnerability during their conversion to organic. A case study in French Brittany. *Agron. Sustain. Dev.* (in review).
- Brown G., Kraftl P., Pickerill J., Upton C., 2012. Holding the future together: Towards a theorization of the spaces and times of transition. *Environ. Plan. A*, **44**, 1607–1623.
- Bui S., Cardona A., Lamine C., Cerf M., 2016. Sustainability transitions: Insights on processes of niche-regime interaction and regime reconfiguration in agri-food systems. *J. Rural Stud.*, **48**, 92–103.
- Carpentier A., Letort E., 2011. Accounting for heterogeneity in multicrop micro-econometric models: implications for variable input demand modeling. *Am. J. Agricult. Econ.*, **94**, 209–224.
- Cayre P., Michaud A., Theau J.-P., Rigolot C., 2018. The coexistence of multiple worldviews in livestock farming drives agroecological transition. A case study in French Protected Designation of Origin (PDO) cheese mountain areas. *Sustainability*, **10**, 1097.
- Cerf M., Jeuffroy M.-H., Prost L., Meynard J.-M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: Taking account of the use situations. *Agron. Sustain. Dev.*, **32**, 899–910.
- Chantre E., Cardona A., 2014. Trajectories of french field crop farmers moving toward sustainable farming practices: change, learning, and links with the advisory services. *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, **38**, 573–602.
- Chantre E., Le Bail M., Cerf M., 2014. Une diversité de configurations d'apprentissage en situation de travail pour réduire l'usage des engrais et pesticides agricoles. *Activités*, **11**, 3–25.
- Coquil X., 2014. Transition des systèmes de polyculture élevage laitiers vers l'autonomie : Une approche par le développement des mondes professionnels. ABIES - AgroParisTech, Paris.
- Coquil X., Béguin P., Dedieu B., 2014a. Transition to self-sufficient mixed crop–dairy farming systems. *Renew. Agric. Food Syst.*, **29**, 195–205.
- Coquil X., Béguin P., Dedieu B., 2017. Professional transitions towards sustainable farming systems: the development of farmers' professional worlds. *Work*, **57**, 325–337.
- Coquil X., Béguin P., Dedieu B., Lusson J.M., 2014b. Ressources pour une transition vers des systèmes de polyculture-élevage plus autonomes. *Fourrages*, **219**, 203–212.
- Coquil X., Cerf M., Auricoste C., Joannon A., Barcellini F., Cayre P., Chizallet M., Dedieu B., Hostiou N., Hellec F., Lusson J.M., Olry P., Omon B., Prost L., 2018. Questioning the work of farmers, advisors, teachers and researchers in agro-ecological transition. A review. *Agron. Sust. Dev.*, **38**, 47.
- Cristofari H., Girard N., Magda D., 2018. How agroecological farmers develop their own practices: a framework to describe their learning processes. *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, **42**, 777–795.
- Darnhofer I., Gibbon D., Dedieu B. (Eds), 2012. *Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamics*. Springer, 490 pp.
- Darnhofer I., Bellon S., Dedieu B., Milestad R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, **30**, 545–555.
- Darnhofer I., Lamine C., Strauss A., Navarrete M., 2016. The resilience of family farms: Towards a relational approach. *J. Rural Stud.*, **44**, 111–122.
- Dedieu B., Serviere G., Madelrieux S., Dobromez L., Cournut S. 2006. Comment appréhender conjointement les changements techniques et les changements du travail en élevage ? *Cahiers Agricultures*, **15**, 506–513.
- Ditzler L., Klerkx L., Chan-Dentonia J., Posthumus H., Krupnik T.J., López Ridaura S., Andersson J.A., Baudron F., Groot J.C.J., 2018. Affordances of agricultural systems analysis tools: A review and framework to enhance tool design and implementation. *Agric. Syst.*, **164**, 20–30.
- Dumont B., González-García E., Thomas M., Fortun-Lamothe L., Ducrot C., Dourmad J. Y., Tichit M., 2014. Forty research issues for the redesign of animal production systems in the 21st century. *Animal*, **8**, 1382–1393.
- Dupraz P., Vermersch D., De Frahan B.H., Delvaux L., 2003. The environmental supply of farm households: A flexible willingness to accept model. *Environ. Res. Econ.*, **25**, 171–189.

- Duru M., Therond O., Martin G., Martin-Clouaire R., Magne M.A., Justes E., Journet E.P., Aubertot J.N., Savary S., Bergez J.-E., Sarthou J.-P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, **35**, 1259–1281.
- Elzen B., Geels F.W., Leeuwis C., van Mierlo B., 2011. Normative contestation in transitions ‘in the making’: Animal welfare concerns and system innovation in pig husbandry. *Res. Pol.*, **40**, 263–275.
- Emile J.-C., Barre P., Delagarde R., Niderkorn V., Novak S., 2017. Les arbres, une ressource fourragère au pâturage pour des bovins laitiers ? *Fourrages*, **230**, 155–160.
- Emile J.-C., Barre P., Bourgoin F., Perceau R., Mahieu S., Novak S., 2018. Effect of season and species on the nutritive value of leaves of high stem trees. *27th EGF General Meeting on Sustainable Meat and Milk Production from Grasslands*, 17-21 June 2018, Cork, Ireland.
- Féménia F., Letort E., 2016. How to significantly reduce pesticide use: An empirical evaluation of the impacts of pesticide taxation associated with a change in cropping practice. *Ecol. Econ.*, **125(C)**, 27–37.
- Francis C.A., Jordan N., Porter P.M., Breland T.A., Lieblein G., Salomnsson L., Sriskandarajah N., Wiedenhoef M., DeHaan R., Braden I., Langer V., 2011. Innovative education in agroecology: Experiential learning for a sustainable agriculture. *Crit. Rev. Plant Sci.*, **30**, 226–237.
- García de Jalón S. *et al.*, 2018. How is agroforestry perceived in Europe? An assessment of positive and negative aspects by stakeholders. *Agroforestry Systems*, **92**, 829–848.
- Geels F.W., 2004. From sectoral systems of innovation to socio- technical systems: insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Res. Pol.*, **33**, 897–920.
- Hinrichs C.C., 2014. Transitions to sustainability: a change in thinking about food systems change? *Agric. Human Val.*, **31**, 143–155.
- Knowler D., Bradshaw B., 2007. Farmers’ adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Pol.*, **32**, 25–48.
- Lacombe C., Couix N., Hazard L., 2018. Designing sustainable farming systems with farmers: a review. *Agric. Syst.*, **165**, 208–220.
- Lamine C., 2011. Anticiper ou temporiser: injonctions environnementales. *Sociol. Trav.*, **53**, 75–92.
- Lamine C., 2018. Transdisciplinarity in research about agrifood systems transitions: A pragmatist approach to processes of attachment. *Sustainability*, **10**, 1241.
- Latruffe L., Nauges C., 2014. Technical efficiency and conversion to organic farming: the case of France. *Eur. Rev. Agric. Econ.*, **41**, 227–253.
- Lubello P., Falque A., Temri L. (Eds), 2017, *Systèmes agroalimentaires en transition*. Editions Quae, 184 pp.
- Lusson J.-M., Coquil X., Frappat B., Falaise D., 2014. 40 itinéraires vers des systèmes herbagers : comprendre les transitions pour mieux les accompagner. *Fourrages*, **219**, 213–220.
- Magrini M.B., Anton M., Cholez C., Corre-Hellou G., Duc G., Jeuffroy M.-H., Meynard J.-M., Pelzer E., Voisin A.S., Walrand S., 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecol. Econ.*, **126**, 152–162.
- Mahieu S., Emile J.-C., Novak S. 2018. Mineral composition of ash leaves (*Fraxinus excelsior* L.) used as fodder for the ruminants in summer. *Euraf congress, Tree fodder: food for thoughts ? 28-30 May 2018, Nijmegen, The Netherlands*.
- Marshall N.A., Stokes C.J., Webb N.P., Marshall P.A., Lankester A.J., 2014. Social vulnerability to climate change in primary producers: A typology approach. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **186**, 86–93.
- Martin G., Magne M.A., 2015. Agricultural diversity to increase adaptive capacity and reduce vulnerability of livestock systems against weather variability – A farm-scale simulation study. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **199**, 301–311.
- Martin G., Allain S., Bergez J.E., Burger-Leenhard D., Constantin J., Duru M., Hazard L., Lacombe C., Magda D., Magne M.-A., Ryschawy J., Thénard V., Tribouillois H., Willaume M., 2018. How to address the sustainability transition of farming systems? A conceptual framework to organize research. *Sustainability*, **10**, 1–20.
- Martin-Clouaire R., 2017. Modelling operational decision-making in agriculture. *Agric. Sci.*, **8**, 527–544.
- Meynard J.-M., 2017. L’agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l’innovation. *OCL*, **24**, D303.
- 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. *Agric. Syst.*, **157**, 330–339.
- Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Fares M., Le Bail M., Magrini M.-B., 2015. La diversification des cultures : lever les obstacles agronomiques et économiques. Éditions Quae, 106 pp.

- Nelson D.R., Adger W.N., Brown K., 2007. Adaptation to environmental change: Contributions of a resilience framework. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **32**, 395–419.
- Novak S., Emile J.-C., 2014. Associer des approches analytiques et systémiques pour concevoir un système laitier innovant : de la Fée à l'OasYs. *Fourrages*, **217**, 47–56.
- Novak S., Chargelègue F., Emile J.-C., 2018a. An agroecological dairy cattle system to graze all year round 27th EGF General Meeting on "Sustainable Meat and Milk Production from Grasslands", 17-21 June 2018, Cork, Ireland.
- Novak S., Audebert G., Chargelègue F., Emile J.-C., 2018b. Sécuriser un système laitier avec des fourrages économes en eau et en énergie fossile. *Fourrages*, **233**, 27–34.
- OECD, 2010. *Eco-Innovation in Industry: Enabling Green Growth*. OECD Publishing, 276 pp.
- Ollivier G., Magda D., Maze A., Plumecocq G., Lamine C., 2018. Agroecological transitions: What can sustainability transition frameworks teach us? An ontological and empirical analysis. *Ecol. Soc.*, **23**, 5.
- Plumecocq G., Duru M., Debril T., Magrini M.-B., Therond O., Sarthou J.-P., 2018. The plurality of values in sustainable agriculture models: diverse lock-in and co-evolution patterns. *Ecol. Soc.*, **23**, 21.
- 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. Engin. Design*, **28**, 119–129.
- Ricci P., Bui S., Lamine C., 2011. *Repenser la protection des cultures: Innovations et transitions*. Editions Quae, 250 pp.
- Therond O., Duru M., Roger-Estrade J., Richard G., 2017. A new analytical framework of agriculture model and farming system diversities to identify knowledge gaps in agronomy research: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, **37**, 21.
- Trouche L., Aubin S., Soullignac V., Guichard L., 2017. Construction d'un modèle sémantique pour organiser les connaissances dédiées à l'agroécologie. Le cas d'Agro-PEPS/GECO. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, **6**, 141–150.
- van der Ploeg J.D., Laurent C., Blondeau F., Bonnafous P., 2009. Farm diversity, classification schemes and multifunctionality. *J. Environ. Mgmt*, **90**, 124–131.
- Vanloqueren G., Baret P.V., 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Res. Pol.*, **38**, 971–983.
- Weiner J., 2017. Applying plant ecological knowledge to increase agricultural sustainability. *J. Ecol.*, **105**, 865–870.
- Wilber K., 2001. *A Theory of Everything: An Integral Vision for Business, Politics, Science and Spirituality*. Shambhala publications, 189 pp.

Valoriser les processus écologiques, hydrologiques et biogéochimiques dans des paysages multifonctionnels

- Albers H.J., Busby G.M., Hamaide B., Ando A.W., Polasky S., 2016. Spatially-correlated risk in nature reserve site selection. *PLoS One*, **11**, e0146023
- Alexander H.M., Mauck K.E., Whitfield A.E., Garrett K.A., Malmstrom C.M., 2014. Plant-virus interactions and the agro-ecological interface. *Eur. J. Plant Pathol.*, **138**, 529–547.
- Alignier A., Aviron S., 2017. Time-lagged response of carabid diversity to past management practices and landscape context of field margins. *J. Environ. Mgmt*, **204**, 282–290.
- Allan E., Manning P., Alt F., Binkenstein J., Blaser S., Blüthgen N., Böhm S., Grassein F., Hölzel N., Klaus V.H., Kleinebecker T., Morris E.K., Oelmann Y., Prati D., Renner S.C., Rillig M.C., Schaefer M., Schlöter M., Schmitt B., Schöning I., Schrumpf M., Solly E., Sorkau E., Steckel J., Steffen-Dewenter I., Stempfhuber B., Tschapka M., Weiner C.N., Weisser W.W., Werner M., Westphal C., Wilcke W., Fischer M., 2015. Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition. *Ecol. Lett.*, **18**, 834–843.
- Baguette M., Stevens V.M., Clobert J., 2014. The pros and cons of applying the movement ecology paradigm for studying animal dispersal. *Mov. Ecol.*, **2**, 13.
- Barbaro L., Rusch A., Muiruri E.W., Gravelier B., Thiery D., Castagnérol B., 2016. Avian pest control in vineyards is driven by interactions between bird functional diversity and landscape heterogeneity. *J. Appl. Ecol.*, **54**, 500–508.
- Bateman I.J., Harwood A.R., Abson D.J., Andrews B., Crowe A., Dugdale S., Fezzi C., Foden J., Hadley D., Haines-Young R., Hulme M., Kontoleon A., Munday P., Pascual U., Paterson J., Perino G., Sen A., Siriwardena G., Termansen M., 2014. Economic analysis for the UK national ecosystem assessment: synthesis and scenario valuation of changes in ecosystem services. *Environ. Resour. Econom.*, **57**, 273–297.
- Bateman I.J., Harwood A.R., Mace G.M., Watson R.T., Abson D.J., Andrews B., Binner A., Crowe A., Day B.H., Dugdale S., Fezzi C., Foden J., Hadley D., Haines-Young R., Hulme M., Kontoleon A., Lovett A.A., Munday P., Pascual U., Paterson J., Perino

- G., Sen A., Siriwardena G., van Soest D., Termansen M., 2013. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom. *Science*, **341**, 45–50.
- Begg G.S., Cook S.M., Dye R., Ferrante M., Franck P., Lavigne C., Lövei G.L., Mansion-Vaquerie A., Pell J.K., Petit S., Quesada N., Ricci B., Wratten S.D., Birch A.N.E., 2017. A functional overview of conservation biological control. *Crop Prot.*, **97**, 145–158.
- Berthet E.T.A., Barnaud C., Girard N., Labatut J., Martin G., 2016. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *J. Environ. Plan. Manage.*, **59**, 280–301.
- Binder C.R., Hinkel J., Bots P.W.G., Pahl-Wostl C., 2013. Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. *Ecol. Soc.*, **18**, 26.
- Bohan D.A., Raybould A., Mulder C., Woodward G., Tamaddoni-Nezhad A., Bluthgen N., Pocock M., Muggleton S., Evans D.M., Astegiano J., Massol F., Loeuille N., Petit S., Macfadyen S., 2013. Networking agroecology. *Adv. Ecol. Res.*, **49**, 2–67.
- Bouadi T., Coedrier M.-O., Moreau P., Quiniou R., Salmon-Monviola J., Gascuel-Oudoux C., 2017. A data warehouse to explore multidimensional simulated data from a spatially distributed agro-hydrological model to improve catchment nitrogen management. *Environ. Model. Softw.*, **97**, 229–242.
- Bretagnolle V., Berthet E., Gross N., Gauffre B., Plumejeaud C., Houte S., Badenhassler I., Monceau K., Allier F., Monestiez P., 2018. Towards sustainable and multifunctional agriculture in farmland landscapes: Lessons from the integrative approach of a French LTSER platform. *Sci. Total Environ.*, **627**, 822–834.
- Burdon J.J., Zhan J.S., Barrett L.G., Papaix J., Thrall P.H., 2016. Addressing the challenges of pathogen evolution on the world's arable crop. *Phytopathology*, **106**, 1117–1127.
- Carpentier F., Martin O., 2017. Package SIland, Spatial Influence of Landscape Type. R package version 1.0.
- Ehrmann S., Liira J., Gartner S., Hansen K., Brunet J., Cousins S.A.O., Deconchat M., Decocq G., De Frenne P., De Smedt P., Diekmann M., Gallet-Moron E., Kolb A., Lenoir J., Lindgren J., Naaf T., Paal T., Valdes A., Verheyen K., Wulf M., Scherer-Lorenzen M., 2017. Environmental drivers of *Ixodes ricinus* abundance in forest fragments of rural European landscapes. *BMC Ecol.*, **17**, 31.
- Garnett T., Appleby M.C., Balmford A., Bateman I.J., Benton T.G., Bloomer P., Burlingame B., Dawkins M., Dolan L., Fraser D., Herrero M., Hoffmann I., Smith P., Thornton P.K., Toulmin C., Vermeulen S.J., Godfray H.C., 2013. Sustainable intensification in agriculture: Premises and policies. *Science*, **341**, 33–34.
- Gascuel C., Ruiz L., Vertès F. (Eds), 2015. Comment réconcilier agriculture et littoral? Vers une agroécologie des territoires. Quae Editions, 152 pp.
- González-Varo J.P., Vilà M., 2017. Spillover of managed honeybees from mass-flowering crops into natural habitats. *Biol. Conserv.*, **212**, 376–382.
- Henckel L., Börger L., Meiss H., Gaba S., Bretagnolle V., 2015. Organic fields sustain weed metacommunity dynamics in farmland landscapes. *P. Roy. Soc. B*, **282**, 20150002.
- Henry M., Cerrutti N., Aupinel P., Decourtye A., Gayrard M., Oudoux J.-F., Pissard A., Rüger C., Bretagnolle V., 2015. Reconciling laboratory and field assessments of neonicotinoid toxicity to honeybees. *P. Roy. Soc. B*, **282**, 20152110.
- Karp D.S., Chaplin-Kramer R., Meehan T.D., Martin E.A., DeClerck F., Grab H., Gratton C., Hunt L., Larsen A.E., Martínez-Salinas A., O'Rourke M.E., Rusch A., Poveda K., Jonsson M., Rosenheim J.A., Schellhorn N.A., Tscharnkte T., Wratten S.D., Zhang W., Iverson A.L., Adler L.S., Albrecht M., Alignier A., Angelella G.M., Anjum M.Z., Avelino J., Batáry P., Baveco J.M., Bianchi F.J.J.A., Birkhofer K., Bohnenblust E.W., Bommarco R., Brewer M.J., Caballero-López B., Carrière Y., Carvalheiro L.G., Cayuela L., Centrella M., Četković A., Henri D.C., Chabert A., Costamagna A.C., De la Mora A., de Kraker J., Desneux N., Diehl E., Diekötter T., Dormann C.F., Eckberg J.O., Entling M.H., Fiedler D., Franck P., van Veen F.J.F., Frank T., Gagic V., Garratt M.P.D., Getachew A., Gonthier D.J., Goodell P.B., Graziosi I., Groves R.L., Gurr G.M., Hajian-Forooshani Z., Heimpel G.E., Herrmann J.D., Huseeth A.S., Inclán D.J., Ingrao A.J., Iv P., Jacot K., Johnson G.A., Jones L., Kaiser M., Kaser J.M., Keasar T., Kim T.N., Kishinevsky M., Landis D.A., Lavandero B., Lavigne C., Le Ralec A., Lemessa D., Letourneau D.K., Liere H., Lu Y., Lubin Y., Luttermoser T., Maas B., Mace K., Madeira F., Mader V., Cortesero A.-M., Marini L., Martinez E., Martinson H.M., Menozzi P., Mitchell M.G.E., Miyashita T., Molina G.A.R., Molina-Montenegro M.A., O'Neal M.E., Opatovsky I., Ortiz-Martinez S., Nash M., Östman Ö., Ouin A., Pak D., Paredes D., Parsa S., Parry H., Perez-Alvarez R., Perović D.J., Peterson J.A., Petit S., Philpott S.M., Plantegenest M., Plečáček M., Pluess T., Pons X., Potts S.G., Pywell R.F., Ragsdale D.W., Rand T.A., Raymond L., Ricci B., Sargent C., Sarthou J.-P., Saulais J., Schäckermann J., Schmidt N.P., Schneider G., Schüepp C., Sivakoff F.S., Smith H.G., Stack W.K., Stutz S., Szendrei Z., Takada M.B., Taki H., Tamburini G., Thomson L.J., Tricault Y., Tsafack N., Tschumi M., Valantin-Morison M., Van Trinh M., van der Werf W., Vierling K.T., Werling B.P., Wickens J.B., Wickens V.J., Woodcock B.A., Wyckhuys K., Xiao H., Yasuda M., Yoshioka A., Zou Y., 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **115**, 7863–7870.

- Le Féon V., Burel F., Chifflet R., Henry M., Ricroch A., Vaissière B.E., Baudry J., 2013. Solitary bee abundance and species richness in dynamic agricultural landscapes. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **166**, 94–101.
- Marrec R., Badenhausser I., Bretagnolle V., Börger L., Roncoroni M., Guillon N., Gauffre B., 2015. Crop succession and habitat preferences drive the distribution and abundance of carabid beetles in an agricultural landscape. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **199**, 282–289.
- McGinnis M.D., Ostrom E., 2014. Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecol. Soc.*, **19**, 30.
- Miguet P., Fahrig L., Lavigne C., 2017. How to quantify a distance-dependent landscape effect on a biological response. *Methods Ecol. Evol.* **8**, 1717–1724.
- Moreau P., Ruiz L., Vertès F., Baratte C., Delaby L., Faverdin P., Gascuel-Odoux C., Piquemal B., Ramat E., Salmon-Monviola J., Durand P., 2013. CASIMOD’N: An agro-hydrological distributed model of catchment-scale nitrogen dynamics integrating farming system decisions. *Agricult. Syst.*, **118**, 41–51.
- Nicholls C.I., Altieri M.A., 2013. Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, **33**, 257–274.
- Odoux J.-F., Aupinel P., Gateff S., Requier F., Henry M., Bretagnolle V., 2014. ECOBEE: a tool for long-term honey bee colony monitoring at the landscape scale in West European intensive agroecosystems. *J. Apicult. Res.*, **53**, 57–66.
- Ostrom E., 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, **325**, 419–422.
- Papaïx J., Burdon J.J., Zhan J.S., Thrall P.H., 2015. Crop pathogen emergence and evolution in agro-ecological landscapes. *Evol. Appl.*, **8**, 385–402.
- Papaïx J., Rimbaud L., Burdon J.J., Zhan J., Thrall P.H., 2018. Differential impact of landscape-scale strategies for crop cultivar deployment on disease dynamics, resistance durability and long-term evolutionary control. *Evol. Appl.*, **11**, 705–717.
- Perez G., Bastian S., Agoulon A., Bouju A., Durand A., Faille F., Lebert I., Rantier Y., Plantard O., Butet A., 2016. Effect of landscape features on the relationship between *Ixodes ricinus* ticks and their small mammal hosts. *Parasite Vector*, **9**, 18.
- Petit S., Trichard A., Biju-Duval L., McLaughlin O., Bohan D., 2017. Interactions between conservation agricultural practice and landscape composition promote weed seed predation by invertebrates. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **240**, 45–53.
- Poggi S., Papaïx J., Lavigne C., Angevin F., Le Ber F., Parisey N., Ricci B., Vinatier F., Wohlfahrt J., 2018. Issues and challenges in landscape models for agriculture: from the representation of agroecosystems to the design of management strategies. *Landscape Ecol.*, **33**, 1679–1690.
- Puech C., Baudry J., Joannon A., Poggi S., Aviron S., 2014. Organic vs. conventional farming dichotomy: Does it make sense for natural enemies? *Agr. Ecosyst. Environ.*, **194**, 48–57.
- Ranjard L., Dequiedt S., Chemidlin Prévost-Bouré N., Thioulouse J., Saby N.P., Lelievre M., Maron P.A., Morin F.E., Bispo A., Jolivet C., Arrouays D., Lemanceau P., 2013. Turnover of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity. *Nat. Commun.*, **4**, 1434.
- Requier F., Odoux J.-F., Tamic T., Moreau N., Henry M., Decourtye A., Bretagnolle V., 2015. Honey bee diet in intensive farmland habitats reveals an unexpectedly high flower richness and a major role of weeds. *Ecol. Appl.*, **25**, 881–890.
- Requier F., Odoux J.F., Henry M., Bretagnolle V., 2017. The carry-over effects of pollen shortage decrease the survival of honeybee colonies in farmlands. *J. Appl. Ecol.*, **54**, 1161–1170.
- Ricci B., Lavigne C., Alignier A., Aviron S., Biju-Duval L., Bouvier J.C., Choisis J.P., Franck P., Joannon A., Ladet S., Mezerette F., Plantegenest M., Roger J.L., Savary G., Thomas C., Vialatte A., Petit S. (soumis) Local pesticide use intensity conditions landscape effects on biological pest control. *P. Roy. Soc. B*.
- Rimbaud L., Papaïx J., Rey J.-F., Barrett L.G., Thrall P.H., 2018. Assessing the durability and efficiency of landscape-based strategies to deploy plant resistance to pathogens. *PLoS Comput. Biol.*, **14**, e1006067.
- Rissman A.R., Gillon S., 2017. Where are ecology and biodiversity in social–ecological systems research? A review of research methods and applied recommendations. *Conserv. Lett.*, **10**, 86–93.
- Robert M., Thomas A., Sekhar M., Badiger S., Ruiz L., Willaume M., Leenhardt D., Bergez J.-E., 2017a. Farm typology in the Berambadi watershed (India): farming systems are determined by farm size and access to groundwater. *Water*, **9**, 51.
- Robert M., Thomas A., Sekhar M., Badiger S., Ruiz L., Raynal H., Bergez J.-E., 2017b. Adaptive and dynamic decision-making processes: A conceptual model of production systems on Indian farms. *Agricult. Syst.*, **157**, 279–291.
- Robert M., Thomas A., Bergez J.-E., 2018. A stochastic dynamic programming approach to analyze adaptation to climate change – Application to groundwater irrigation in India. *Eur. J. Operat. Res.*, **265**, 1033–1045.

- Rollin O., Bretagnolle V., Fortel L., Guilbaud L., Henry M., 2015. Habitat, spatial and temporal drivers of diversity patterns in a wild bee assemblage. *Biodivers. Conserv.*, **24**, 1195–1214.
- Rusch A., Chaplin-Kramer R., Gardiner M.M., Hawro V., Holland J., Landis D., Thies C., Tscharntke T., Weisser W.W., Winqvist C., Woltz M., Bommarco R., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **221**, 198–204.
- Schlüter M., Baeza A., Dressler G., Frank K., Groeneveld J., Jager W., Janssen M.A., McAllister R.R.J., Müller B., Oracha K., Schwarz N., Wijermans N., 2017. A framework for mapping and comparing behavioural theories in models of social-ecological systems. *Ecol. Econ.*, **131**, 21–35.
- Trépos R., Masson V., Cordier M.O., Gascuel-Odoux C., Salmon-Monviola J., 2012. Mining simulation data by rule induction to determine critical source areas of stream water pollution by herbicides. *Comput. Electron. Agr.*, **86**, 75–88.
- Tuck S.L., Winqvist C., Mota F., Ahnstrom J., Turnbull L.A., Bengtsson J., 2014. Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *J. Appl. Ecol.*, **51**, 746–755.
- Vasseur C., Joannon A., Aviron S., Burel F., Meynard J.-M., Baudry J., 2013. The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agr. Ecosyst. Environ.*, **166**, 3–14.
- Veres A., Petit S., Conord C., Lavigne C., 2013. Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **166**, 110–117.
- 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 landscape models. *Front. Environ. Sci.*, **4**, 6.
- Werling B.P., Dickson T.L., Isaacs R., Gaines H., Gratton C., Gross K.L., Liere H., Malmstrom C.M., Meehan T.D., Ruan L.L., Robertson B.A., Robertson G.P., Schmidt T.M., Schrotenboer A.C., Teal T.K., Wilson J.K., Landis D.A., 2014. Perennial grasslands enhance biodiversity and multiple ecosystem services in bioenergy landscapes. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **111**, 1652–1657.
- White C., Costello C., Kendall B.E., Brown C.J., 2012. The value of coordinated management of interacting ecosystem services. *Ecol. Lett.*, **15**, 509–519.

Valoriser la diversité génétique en sélection végétale et animale

- Alemu S.W., Calus M.P.L., Muir W.M., Peeters K., Vereijken A., Bijma P., 2016. Genomic prediction of survival time in a population of brown laying hens showing cannibalistic behaviour. *Genet. Sel. Evol.*, **48**, 68.
- Barbillon P., Thomas M., Goldringer I., Hospital F., Robin S., 2015. Network impact on persistence in a finite population dynamic diffusion model: application to an emergent seed exchange network. *J. Theor. Biol.*, **365**, 365–376.
- Barot S., Allard V., Cantarel A., Enjalbert J., Gauffreteau A., Goldringer I., Lata J. C., Le Roux X., Niboyet A., Porcher E., 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, **37**, 20.
- Bergsma R., Kanis E., Knol E.F., Bijma P., 2008. The contribution of social effects to heritable variation in finishing traits of domestic pigs (*Sus scrofa*). *Genetics*, **178**, 1559–1570.
- Blanc F., Ollion E., Puillet L., Delaby L., Ingrand S., Tichit M., Friggens N.C., 2013. Evaluation quantitative de la robustesse des animaux et du troupeau : quels principes retenir ? *Renc. Rech. Ruminants*, **20**, 265–272.
- Demeulenaere E., Rivière P., Hyacinthe A., Baltassat R., Baltazar S., Gascuel J.-S., Lacanette J., Montaz H., Pin S., Ranke O., Serpolay-Besson E., Thomas M., Van Frank G., Vanoverschelde M., Vindras-Fouillet C., Goldringer I., 2017. La sélection participative à l'épreuve du changement d'échelle. À propos d'une collaboration entre paysans sélectionneurs et généticiens de terrain. *Nat. Sci. Soc.*, **25**, 336–346.
- Demeulenaere E., Goldringer I., 2017. Semences et transition agroécologique : initiatives paysannes et sélection participative comme innovations de rupture. *Nat. Sci. Soc.*, **25**, S55–S59.
- Isbell F., Adler P.R., Eisenhauer N., Fornara D., Kimmel K., Kremen C., Letourneau D.K., Liebman M., Polley H.W., Quijas S., Scherer-Lorenzen M., 2017. Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *J. Ecol.*, **105**, 871–879.
- Jones J.D., Dangl J.L., 2006. The plant immune system. *Nature*, **444**, 323–329.
- Litraco I., Violle C., 2015. Diversity in plant breeding: A new conceptual framework. *Trends Plant Sci.*, **20**, 604–613.
- Louarn G., Faverjon L., 2018. A generic individual-based model to simulate morphogenesis, C-N acquisition and population dynamics in contrasting forage legumes. *Ann. Bot.*, **121**, 875–896.
- Meilhac J., Durand J.L., Beguier V., Litraco I., 2018. Increasing the benefits of species diversity in multi-species temporary grasslands by increasing within-species diversity. *Ann. Bot.* DOI: 10.1093/aob/mcy227.

- Meilhac J., Maire V., Deschamps L., Flajoulot S., Litrico I., (in review). Species differentiation in grassland canopy is mediated by selection and plasticity. *Nature Plants*.
- Meuwissen T.H., Hayes B.J., Goddard M.E., 2001. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics*, **157**, 1819–1829.
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Gonzales-Garcia E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C.R., Tixier-Boichard M., Brochard M., 2016a. Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes. I. Selection goals and criteria. *Animal*, **10**, 1749–1759.
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Gonzales-Garcia E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C.R., Tixier-Boichard M., Brochard M., 2016b. Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes. II. Breeding strategies. *Animal*, **10**, 1766–1776.
- Nozières-Petit M.-O., Lauvie A., 2018. Diversité des contributions des systèmes d'élevage de races locales. Les points de vue des éleveurs de trois races ovines méditerranéennes. *Cahiers Agricultures*, **27**, 65003.
- Prieto I., Violle C., Barre P., Durand J.L., Ghesquiere M., Litrico I., 2015. Complementary effects of species and genetic diversity on productivity and stability of sown grasslands. *Nature Plants*, **1**, 15033 .
- Rivière P., Dawson J.C., Goldringer I., David O., 2015a. Hierarchical bayesian modeling for flexible experiments in decentralized participatory plant breeding. *Crop Sci.*, **55**, 1053–1067.
- Rivière P., Goldringer I., Berthelot J.F., Galic N., Pin S., De Kochko P., Dawson J.C., 2015b. Response to farmer mass selection in early generation progeny of bread wheat landrace crosses. *Renew. Agr. Food. Syst.*, **30**, 190–201.
- Sampoux J.-P., Giraud H., Litrico I., (in review). Which recurrent selection scheme to improve mixtures of plant species? Theoretical expectations. *Theor. Appl. Genet.*
- Schöb C., Kerle S., Karley A.J., Morcillo L., Pakeman R.J., Newton A.C., Brooker R.W., 2015. Intraspecific genetic diversity and composition modify species-level diversity–productivity relationships. *New Phytol.*, **205**, 720–730.
- Thomas M., Thepot S., Galic N., Jouanne-Pin S., Remoue C., Goldringer I., 2015. Diversifying mechanisms in the on-farm evolution of crop mixtures. *Mol. Ecol.*, **24**, 2937–2954.
- Van Moorsel S.J., Hahl T., Wagg C., De Deyn G.B., Flynn D.F.B., Zuppinger-Dingley D., Schmid B., 2018. Community evolution increases plant productivity at low diversity. *Ecol. Lett.*, **21**, 128–137.
- Vindras-Fouillet C., Ranke O., Anglade J.P., Taupier-Letage B., Chable V., Goldringer I., 2014. Sensory analyses and nutritional qualities of hand-made breads with organic grown wheat bread populations. *Food Nutr. Sci.*, **5**, 1860–1874.
- Wright A.J., 1985. Selection for improved yield in inter-species mixtures or intercrops. *Theor. Appl. Genet.*, **69**, 399–407.
- Zhu Y., Chen H., Fan J., Wang Y., Li Y., Chen J., Fan J., Yang S., Hu L., Leung H., Mew T.W., Teng P.S., Wang Z., Mundt C.C., 2000. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, **406**, 718–722.
- Zuppinger-Dingley D., Schmid B., Petermann J.S., Varuna Y., de Deyn G.B., Flynn D.F.B., 2014. Selection for niche differentiation in plant communities increases biodiversity effects. *Nature*, **515**, 108–111.

Modélisation des interactions biotiques, en lien avec des dynamiques abiotiques et socio-économiques, pour une vision et une gestion agroécologique des agroécosystèmes

- Colbach N., Cordeau S., Garrido A., Granger S., Laughlin D., Ricci B., Thomson F., Messéan A., 2017. Landsharing vs landsparing: how to reconcile crop production and biodiversity? A simulation study focusing on weed impacts. *Agr. Ecosyst. Environ.*, **251**, 203–217.
- Dufour-Kowalski S., Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C., de Coligny F., 2012. Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. *Ann. Forest Sci.*, **69**, 221–233.
- Fess T.L., Benedito V.A., 2018. Organic versus conventional cropping sustainability: A comparative system analysis. *Sustainability*, **10**, 272.
- Garcia F., Gascuel-Odoux C., Soussana J.-F. (eds), 2014. *Colloque sur les nouveaux défis de la modélisation : l'agro-écologie – Synthèse*. Inra, 49 pp.
- Iqbal A., Garnier P., Lashermes G., Recous S., 2014. A new equation to simulate the contact between soil and maize residues of different sizes during their decomposition. *Biol. Fert. Soils*, **50**, 645–655.

- Knapp S., van der Heijden M.G.A., 2018. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture. *Nat. Commun.*, **9**, 3632.
- Monod H., Gascuel-Oudou C., Lescourret F., Roques L., Bohan D., Costes E., Courtois P., Fabre F., Faverdin P., Franc A., Hoch T., Phocas F., Steyer J.P., Tchamitchian M., 2018. Modèles en agroécologie : état et perspectives à l'Inra. Modélisation des interactions biotiques, en lien avec des dynamiques abiotiques, sociales et économiques : contribution à la représentation de la cascade pratiques agricoles - biodiversité - fonctions et services écosystémiques des agroécosystèmes, 51 pp.
- Moorhead D.L., Lashermes G., Sinsabaugh R.L., 2012. A theoretical model of C- and N-acquiring exoenzyme activities, which balances microbial demands during decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, **53**, 133–141.
- Moorhead D., Lashermes G., Recous S., Bertrand I., 2014. Interacting microbe and litter quality controls on litter decomposition: A modeling analysis. *PLoS One*, **9**, e108769.
- Picault S., Huang Y.-L., Sicard V., Beaudeau F., Ezanno P., 2017. A multi-level multi-agent simulation framework in animal epidemiology. In Demazeau Y., Davidsson P., Bajo J., Vale Z. (eds), 15th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS'2017), Jun 2017, Porto, Portugal. *Advances in Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems: The PAAMS Collection*, Springer, 209–221.
- Roques L., Bonnefon O., 2016. Modelling population dynamics in realistic landscapes with linear elements: a mechanistic-statistical reaction-diffusion approach. *PLoS One*, **11**, e0151217.
- Schrama M., de Haan J.J., Kroonen M., Verstegen H., Van der Putten W.H., 2018. Crop yield gap and stability in organic and conventional farming systems. *Agricult. Ecosyst. Environ.*, **256**, 123–130.

Quelle contribution des agroéquipements à l'agroécologie ?

- Andrew M.E., Wulder M.A., Nelson T.A., Coops N.C., 2015. Spatial data, analysis approaches, and information needs for spatial ecosystem service assessments: a review. *GISci. Remote Sens.*, **52**, 344–373.
- Badenko V., Terleev V., Arefiev N., Volkova J., Nikonova O., 2015. Agroecosystem model AGROTOOL coupled with GIS for simulation of the spatial variability of the soil hydrophysical properties. In *Proceedings of the AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (IEA 2015)*. Book Series: AER-Advances in Engineering Research, Vol. 2, pp. 452–455.
- Bardgett R.D., McAlister E., 1999. The measurement of soil fungal:bacterial biomass ratios as an indicator of ecosystem self-regulation in temperate meadow grasslands. *Biol. Fert. Soils*, **29**, 282–290.
- Baveye P.C., Baveye J., Gowdy J., 2016. Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Front. Env. Sci.*, **4**, 41.
- Bellon-Maurel V., Huyghe C., 2017. Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *OCL*, **24**, D307.
- Beringer T., Lucht W., Schaphoff S., 2011. Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *GCB Bioenergy*, **3**, 299–312.
- Blossfeld S., Schreiber C.M., Liebsch G., Kuhn A.J., Hinsinger P., 2013. Quantitative imaging of rhizosphere pH and CO₂ dynamics with planar optodes. *Ann. Bot.*, **112**, 267–276.
- Bournigal J.-M., 2014. Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements. *Rapport de la mission agroéquipements, Irstea*.
- Bournigal J.-M., Houllier F., Lecouvey P., Pringuet P., 2015. Agriculture & Innovation 2025 : 30 projets pour une agriculture compétitive & respectueuse de l'environnement. *Rapport aux Ministres en charge de l'agriculture et en charge de la recherche*.
- Burkhard B., Kroll F., Nedkov S., Müller F., 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecol. Indic.*, **21**, 17–29.
- Carlsson G., Mårtensson L.-M., Prade T., Svensson S.-E., Jensen E.S., 2017. Perennial species mixtures for multifunctional production of biomass on marginal land. *GCB Bioenergy*, **9**, 191–201.
- Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., Hussain S.A., 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *J. Hydrol.*, **458**, 110–117.
- Finney D.M., White C.M., Kaye J.P., 2016. Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. *Agron. J.*, **108**, 39–52.
- Haberl H., Geissler S., 2000. Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. *Ecol. Eng.*, **16**, 111–121.

- Landuyt D., Van der Biest K., Broekx S., Staes J., Meire P., Goethals P.L., 2015. A GIS plug-in for Bayesian belief networks: towards a transparent software framework to assess and visualise uncertainties in ecosystem service mapping. *Environ. Modell. Softw.*, **71**, 30–38.
- Machenaud G., Klein P., Terrien F., Pasco E., 2014. Agroéquipements et triple performance. Freins et leviers pour la transition agroécologique. ABSO Conseil, 137 pp.
- Mira M., Olioso A., Gallego-Elvira B., Courault D., Garrigues S., Marloie O., Hagolle O., Guillevic P., Boulet G., 2016. Uncertainty assessment of surface net radiation derived from Landsat images. *Remote Sens. Environ.*, **175**, 251–270.
- Musilova L., Ridl J., Polivkova M., Macek T., Uhlik O., 2016. Effects of secondary plant metabolites on microbial populations: Changes in community structure and metabolic activity in contaminated environments. *Int. J. Mol. Sci.*, **17**, 1205.
- Ravier C. 2017. Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation. Thèse de doctorat, AgroParisTech, 203 pp.
- Sivakumar M.V.K., Gomme R., Baier W., 2000. Agrometeorology and sustainable agriculture. *Agr. Forest Meteorol.*, **103**, 11–26.
- Tilman D., Hill J., Lehman C., 2006. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, **314**, 1598–1600.
- Van Zanten B.T., Verburg P.H., Espinosa M., Gomez-y-Paloma S., Galimberti G., Kantelhardt J., Kapfer M., Lefebvre M., Manrique R., Piore A., Raggi M., Schaller L., Targetti S., Zasada I., Viaggi D., 2014. European agricultural landscapes, common agricultural policy and ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, **34**, 309–325.
- Wells D.M., Laplace L., Bennett M.J., Vernoux T., 2013. Biosensors for phytohormone quantification: challenges, solutions, and opportunities. *Trends Plant Sci.*, **18**, 244–249.

Annexe 1 – Lettre de mission



147 rue de l'Université
75 338 Paris Cedex 07 - France
Tel. : + 33 1 (0)1 42 75 90 00
www.inra.fr



Le Président

M Jean-François SOUSSANA
Vice-Président en charge de la politique internationale

Jean-Francois.Soussana@inra.fr

Objet : Lettre de mission / plan d'action #INRA2025 « Prospective scientifique interdisciplinaire » - Agroécologie

Paris, le 13 mars 2017

Cc : Collège de Direction, Chefs de Départements, Présidents de Centres

Monsieur le Vice-Président, cher collègue,

L'Inra a récemment actualisé ses orientations stratégiques à l'horizon 2025 (#INRA2025). Cinq domaines thématiques prioritaires et trois grandes orientations de politique générale ont été définis ; cinq plans d'action opérationnels transversaux soutiendront ces orientations. Parmi ces derniers, j'ai souhaité qu'une prospective scientifique interdisciplinaire soit engagée pour éclairer les futurs fronts de science, enrichir nos orientations, développer des actions incitatives, favoriser des partenariats scientifiques, économiques et de formation.

Dans ce cadre, vous êtes chargé de conduire une prospective scientifique interdisciplinaire sur l'agro-écologie, afin d'éclairer les futurs fronts de science, les compétences et les infrastructures collectives nécessaires, enrichir nos orientations, développer des actions incitatives et favoriser des partenariats. Ce travail aboutira à la proposition d'un plan d'action pour favoriser le développement et le rayonnement international des recherches de l'Institut dans ce domaine.

L'agro-écologie est comprise ici comme un champ disciplinaire au croisement de l'écologie et des sciences agronomiques. En partenariat notamment avec le Cirad, l'Inra étudie les régulations biologiques et écologiques dans les agrosystèmes et le développement d'une ingénierie mobilisant ces régulations et les performances des systèmes agro-écologiques. Cette ingénierie s'appuie sur la valorisation de la biodiversité le bouclage des cycles biogéochimiques et la gestion des paysages au sein des territoires.

La démarche initiée par le rapport agro-écologie (Septembre 2012) sera poursuivie en approfondissant trois thèmes :

- La modélisation des interactions biotiques dans les agroécosystèmes du champ au paysage ;
- La valorisation de la diversité génétique et l'évolution des objectifs et des schémas de sélection pour les plantes et les animaux ;
- Le diagnostic et le pilotage de la qualité des sols et des eaux.

Vous élargirez cette démarche aux enjeux économiques et sociaux en considérant également :

- Les processus de la transition agro-écologique et l'apport de méthodes de co-conception de systèmes agricoles ;
- Les besoins en agro-équipements, (capteurs, machinisme), et en technologies avancées comme la télédétection ;
- Les modalités d'intégration de l'agro-écologie dans les filières et dans l'aval des systèmes alimentaires (transformation, consommation, nutrition), en lien avec la prospective scientifique Nexus santé-alimentation-agriculture-environnement.

Cette réflexion, qui associera les disciplines scientifiques concernées et les départements, portera aussi sur l'articulation avec les cinq priorités thématiques du document d'orientation 2025 en précisant les apports

[1]

possibles de l'agro-écologie pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle (#Global), la multi-performance des agricultures (#3Perf-1), les services des écosystèmes et l'adaptation au changement climatique (#Climat), ainsi que le rôle de l'agro-écologie pour des systèmes alimentaires sains et durables (#Food) et pour la diversification de bio-ressources aux usages complémentaires (#BioRes).

Plusieurs produits seront livrés par cette prospective scientifique interdisciplinaire sur l'agro-écologie, parmi lesquels sont attendus :

- A court-terme (mi-2017), une consolidation de l'inventaire des réflexions et des travaux des départements dans ce domaine, tant en termes de programmes et projets, d'infrastructures, de données et modèles disponibles, etc. La synthèse de ces éléments permettra d'affiner le positionnement institutionnel de l'Inra et son apport à l'expertise nationale et internationale sur l'agro-écologie ;
- A moyen terme (fin 2017), une analyse du paysage scientifique international sera proposée afin d'identifier les nouveaux fronts de recherche et les laboratoires et institutions d'excellence.

Ces travaux donneront également lieu à des synthèses scientifiques sur l'agro-écologie et ses intersections avec les priorités thématiques du document d'orientation INRA#2025.

La prospective scientifique que vous animerez permettra, en lien avec les autres plans d'action concernés, d'actualiser les recommandations du précédent rapport Inra (2012), notamment en ce qui concerne les compétences et moyens scientifiques et technologiques, les collaborations nationales et internationales et la programmation de la recherche.

Le chantier sera conduit par un groupe de scientifiques de compétences disciplinaires diverses et complémentaires. La connaissance des MP de l'Inra sera privilégiée, afin de potentialiser les acquis, d'éviter les redites et d'explorer les interfaces. Après un premier temps d'instruction, le groupe pourra décider d'élargir ses compétences en impliquant quelques scientifiques français et étrangers apportant un regard disciplinaire complémentaire. Un comité de pilotage et des discussions régulières avec l'assemblée des CD seront mis en place. De plus, un ou deux points intermédiaires sur le progrès de la réflexion seront proposés au collège de direction pour information et vérification de l'alignement stratégique. Par ailleurs, une consultation et une mise en discussion avec des porteurs d'enjeux seraient utiles lorsque la réflexion sera suffisamment mûre et avant la remise du plan d'action au collège de direction.

Bien cordialement,

Philippe Mauguin

