



INRAE



Science pour les élevages de demain

Prospective scientifique interdisciplinaire



Rapport de synthèse

Juin 2020

**Prospective scientifique
interdisciplinaire
« Science pour les
élevages de demain »**

Juin 2020

Pour citer ce rapport :

Peyraud J.L. (Coord.), Aubin J., Barbier M., Baumont R., Berri C., Bidanel J.P., Citti Ch., Cotinot C., Ducrot C., Dupraz P., Faverdin P., Friggens N., Houot S., Nozières-Petit M.O., Rogel-Gaillard C., Santé-Lhoutellier V., 2019. Atelier de Réflexion Prospective interdisciplinaire Science pour les élevages de demain. Rapport de synthèse. 53 pp. (<https://hal.inrae.fr/hal-02899978>)

DOI : [10.15454/x83c-0674](https://doi.org/10.15454/x83c-0674)

Résumé

L'ambition de la Prospective scientifique interdisciplinaire sur l'élevage a été de repenser la place, les rôles de l'élevage et en quoi il doit se transformer pour contribuer pleinement au développement de systèmes agri-alimentaires plus durables ainsi que d'identifier des thématiques de recherches interdisciplinaires permettant d'explorer des fronts de science ou méthodologiques porteurs d'avenir pour lever les verrous de connaissances. La réflexion a été animée par un groupe de 15 chercheurs et a mobilisé une centaine de chercheurs. A partir d'une analyse du contexte et des drivers d'évolution des systèmes nous proposons un nouveau cadre conceptuel et des voies de progrès pour penser l'élevage de demain. L'élevage doit s'inscrire dans le cadre de systèmes agri-alimentaires circulaires dans lesquels il doit contribuer, au-delà d'une efficacité accrue des moyens de production, à la préservation de la qualité des ressources et à la production d'une alimentation à un prix abordable. Il faut repenser les systèmes pour qu'ils soient climato-intelligents et répondent aux enjeux de santé et du bien-être des animaux et des hommes ; repenser les liens entre élevage, production végétale et territoire pour maximiser les recyclages et repenser les liens entre élevage, transformation et consommation de ces produits de l'élevage. Les innovations doivent être basées sur les principes de l'agro-écologie complétés par ceux de l'économie circulaire et par la mobilisation des leviers des (bio)technologies et de l'innovation organisationnelle. Le texte décrit quatre grandes priorités scientifiques avec leurs enjeux de recherche et produit des recommandations pour un plan d'action.

The ambition of the Foresight was to rethink the place, the roles of livestock and how it should be transformed to fully contribute to the development of more sustainable agri-food systems. It is also to identify cross-disciplinary research themes that explore promising fronts of science or methodologies to solve knowledge locks. The foresight was managed by a group of 15 researchers and mobilized a hundred researchers. Based on an analysis of the context and the drivers for the evolution of the systems, we propose a new conceptual framework to think about innovations. Livestock farming must be part of circular agri-food systems in which it must contribute, beyond an increased efficiency of production factors, to the preservation of the quality of the resources and to the production of a food at an affordable price. Systems need to be rethought to be climate-smart and to respond to the health and welfare challenges of animals and people, rethink the linkages between livestock, crop production and territories to maximize recycling and rethink livestock linkages, processing and consumption of these livestock products. Innovations should be based on the principles of agro-ecology supplemented by those of the circular economy and mobilizing levers of (bio) technologies and organizational innovation. The text describes 4 major scientific priorities with their research issues and produces recommendations for an action plan

Table des matières

1. Présentation générale de la prospective	6
1.1. Ambition de la prospective	6
1.1.1. Rappel de la commande	6
1.1.2. Ambition pour les recherches à l'INRAE	6
1.2. Le périmètre de la réflexion	7
1.2.1. Une réflexion centrée sur l'élevage français et Européen	7
1.2.2. Mais avec un emboîtement d'échelle vers le niveau mondial	8
1.2.3. Une réflexion dédiée à l'élevage d'animaux terrestres et de poissons	9
1.3. Organisation générale et conduite de la prospective	10
1.3.1. Pilotage et animation générale de la prospective	10
1.3.2. Mobilisation de groupes thématiques	10
1.3.3. Mobilisation des groupes filières de l'INRAE	10
1.3.4. Organisation de séminaires ouverts	11
1.3.5. Chantiers transversaux	11
2. Les enjeux autour de l'élevage et les moteurs des évolutions	11
2.1. Un constat mitigé sur l'élevage aujourd'hui	11
2.2. Des opportunités sont à saisir pour un élevage plus durable	16
3. La vision INRAE pour l'élevage de demain et les recherches à conduire	17
3.1. Une nouvelle ambition pour l'élevage	17
3.2. Un nouveau paradigme pour construire le futur de l'élevage	18
3.3. Repenser les voies de progrès pour l'élevage	20
3.3.1. Repenser l'amélioration des systèmes d'élevage et des animaux	20
3.3.2. Repenser les liens entre élevage, production végétale et territoire	22
3.3.3. Repenser les liens entre élevage, transformation et consommation de produits animaux	23
3.4. Le cadre conceptuel pour développer les innovations nécessaires	24
3.4.1. Le levier de l'agro-écologie et de l'économie circulaire	24
3.4.2. Le levier de l'innovation technologique	26
3.4.3. Le levier de l'innovation organisationnelle	27
4. Les priorités scientifiques et nouveaux fronts de science	28
4.1. Présentation synoptiques des priorités de recherches en élevage	28
4.2. Fronts de sciences des 4 priorités	30
4.2.1. Développer des élevages créateurs de valeurs et répondant aux attentes sociétales	31

4.2.2. Mieux utiliser l'aptitude des animaux à valoriser des biomasses variées pour Une agriculture bouclant les cycles de nutriments	34
4.2.3. Adapter les animaux et proposer des conduites d'élevage plus durables	36
4.2.4. Faire entrer l'élevage dans l'ère du numérique	39
4.3. Des fronts technologiques	41
4.3.1. Développement technologique pour l'acquisition de connaissance sur la biologie de l'animal	41
4.3.2. Acquisition, gestion et utilisation des données	42
5. Recommandations pour un plan d'action	43
5.1. Développer les synergies les synergies entre Elevage et productions végétales pour accroître l'autonomie en azote et en protéines des systèmes alimentaires	43
5.2. Des compétences à acquérir/renforcer et à mettre en synergie	46
5.2.1. Besoin en compétences nouvelles	46
5.2.2. Renforcer les approches interdisciplinaires	47
5.3. Des évolutions du dispositifs d'acquisition des données	47
5.4. Le développement des partenariats	48
5.4.1. Partenariat scientifique internationaux	48
5.4.2. Partenariats socio-professionnels	48
5.5. Valorisation de la prospective	49
6. Conclusion	52

1. Présentation générale de la prospective

1.1. Ambition de la prospective

1.1.1. Rappel de la commande

Dans un contexte où l'élevage est en difficulté mais où des éléments positifs sont aussi à considérer, la commande exprimée dans la lettre de mission était de construire une réflexion scientifique prospective intégrant les différentes filières, les tendances de la consommation et les différents piliers de la durabilité. Cette réflexion devait explorer les futurs possibles en acceptant de réelles ruptures et aboutir à la fourniture d'éléments permettant d'éclairer l'institut sur les actions à mettre en œuvre pour développer une recherche ambitieuse sur et pour l'élevage de demain permettant de favoriser et accompagner les changements. Elle devait aussi identifier les fronts de sciences et de technologies, analyser notre positionnement à l'international, les collaborations à construire.

1.1.2. Ambition pour les recherches à l'INRAE

En lien avec le contexte de l'élevage rappelé dans la lettre de mission et face aux nombreux enjeux qu'il faut relever notre ambition a été triple :

- Repenser la place, les rôles de l'élevage et en quoi il doit se transformer pour contribuer pleinement au développement de systèmes agri-alimentaires plus durables c'est-à-dire réduisant leurs impacts environnementaux, améliorant la nutrition (et luttant contre la faim au niveau planétaire) et contribuant au développement économique des territoires ;
- Identifier et promouvoir des thématiques de recherches interdisciplinaires permettant d'explorer des fronts de science ou méthodologiques porteurs d'avenir ou donnant de nouvelles perspectives aux travaux déjà engagés afin de (i) lever les verrous de connaissance et méthodologiques (voire réglementaires) identifiés et développer les innovations permettant de faire progresser l'élevage et (ii) développer les recherches permettant de renforcer l'excellence scientifique de l'INRAE et affirmer une position de leader pour une recherche ambitieuse sur l'élevage au sein des systèmes agri-alimentaires et du développement des territoires en affichant quelques thématiques « phares » ;
- Analyser notre dispositif au regard de ces nouvelles ambitions et faire des propositions d'évolution que ce soit en terme de moyens d'investigation (expérimentation, analytiques, données, modélisation, suivi de réseaux) ou de partenariat scientifique et socio-professionnel et de nouvelles compétences à acquérir ou de nouvelles organisations.

L'ambition était forte tant au niveau du positionnement scientifique que des finalités des recherches.

- La posture a été de considérer que de nouveaux fronts de science se situaient à l'interface entre les disciplines et que seule l'approche interdisciplinaire permettait (i) de penser la complexité des systèmes biologiques, agronomiques et alimentaires en renouvelant les questions scientifiques ; (ii) d'aborder les grands enjeux de l'élevage, et au-delà de réinventer sa place et ses contributions au développement d'une agriculture circulaire ne reposant (presque) plus sur les ressources fossiles et/ou peu renouvelables et productrice de services pour la société ;
- L'objectif a été de travailler les fronts de science nécessitant de renforcer les interactions entre communautés scientifiques travaillant sur des disciplines, thématiques et fenêtres de temps différentes. Les départements sont les garants des approches disciplinaires d'excellence et les

sujets ne relevant principalement que d'un seul département ou de collaborations déjà bien établies entre départements ne sont pas incluses (où à la marge) dans la réflexion de la prospective qui de ce fait n'a pas vocation à représenter toutes les activités de l'institut dans le secteur de l'élevage. Il s'agit par exemple, et sans vouloir être exhaustif, des travaux sur la caractérisation, l'étude de la dynamique évolutive et l'annotation fonctionnelle des génomes animaux, l'étude fine de l'architecture génétique des caractères, l'étude approfondie des cellules souches, les travaux sur la biologie des vecteurs de parasites et des interactions entre hôtes et agents pathogènes pour identifier de possibles solutions thérapeutiques ou vaccinales, les travaux sur la surveillance des maladies et les agents pathogènes émergents et l'identification des agents pathogènes et des toxiques. Il s'agit aussi des développements méthodologiques comme par exemple les ontologies, la combinaison de la génétique quantitative et de la génétique des populations, l'intégration des données génétiques, épigénétiques, métagénomiques, le développement de modèles pour la sélection génomique intégrative ou encore l'utilisation de l'intelligence artificielle pour découvrir de nouveaux biomarqueurs. Pour autant ces recherches se positionnent aisément au sein des grands objectifs définis (voir figure 3). Certains fronts de science identifiés doivent pouvoir alimenter le contenu des futurs métaprogrammes.

- L'INRAE a beaucoup d'atouts, voire est le seul organisme de recherche en Europe, pouvant afficher une telle ambition compte tenu de sa taille et de la diversité des compétences à condition de pouvoir développer de travaux inter-départementaux, y compris en impliquant des départements non dédiés à l'élevage.

L'ensemble des travaux engagés et à venir doivent contribuer par ailleurs à produire des connaissances permettant d'éclairer le débat public à partir d'une argumentation basée sur des faits scientifiques et l'évaluation de scénarii. En interne, ils pourraient permettre de (re)donner parfois plus de sens à nos recherches à un moment où l'élevage est au cœur de nombreuses controverses.

1.2. Le périmètre de la réflexion

1.2.1. Une réflexion centrée sur l'élevage français et Européen

La réflexion a été centrée prioritairement sur le niveau France/Europe. Les systèmes européens partagent globalement les mêmes enjeux, certains spécifiques, voire en décalage avec le reste du monde. De ce point de vue, l'élevage européen peut d'ailleurs dans une certaine mesure avoir un rôle précurseur annonciateur d'évolutions qui pourraient avoir lieu aussi à terme dans d'autres régions du monde et éclairer des voies de progrès pouvant bénéficier aux pays tiers, notamment :

- Une consommation de produits animaux élevée par habitant et qui tend à diminuer alors que la consommation augmente dans d'autres parties du monde en lien avec l'urbanisation, l'amélioration du niveau de vie (Chine, Sud Est Asiatique) ou devrait s'accroître pour réduire les problèmes nutritionnels dans d'autres régions (Afrique de l'Ouest et de l'Est) ou l'anémie reste un fléau du fait du manque de viande ;
- Des attentes sociétales en Europe plus fortes que partout ailleurs. L'évolution des préférences et des attentes des consommateurs est plus forte et plus rapide en Europe que dans de nombreux pays qui pourtant sont confrontés aux mêmes enjeux de pollution locale, de gestion des territoires et de bien-être animal que les pays européens ;
- Des conditions de l'élevage européen restent différentes de celles d'autres régions du monde telles que les méga-fermes chinoises, ou les grands troupeaux du continent Américain ou

d'Océanie et, à l'autre extrémité, les petites exploitations familiales de pays en voie de développement qui ne posent pas les mêmes questions.

Pour autant l'élevage français se caractérise par une diversité de systèmes du fait de la diversité des territoires et de l'engagement des consommateurs pour une variété de produits. Etudier et travailler cette diversité est très propice au développement de l'agro-écologie doit être une spécificité de l'INRAE en comparaison à de nombreux partenaires (Irlande, Danemark, Pays Bas) qui revendiquent plutôt une vision de système idéal vers lequel tout le monde doit tendre. Cette diversité nous impose de travailler l'articulation entre des recherches génériques et les adaptations des connaissances aux besoins locaux et dans l'autre sens de la montée en généralité des études de cas. Elle impose aussi d'élargir les approches souvent limitées à l'animal au niveau des systèmes et au-delà des territoires, qui est un niveau où nous avons peu de compétences.

1.2.2. Mais avec un emboîtement d'échelle vers le niveau mondial

Il n'est pas possible d'examiner la situation en Europe sans considérer le niveau mondial où l'élevage joue et doit continuer à jouer un rôle essentiel pour éradiquer la faim et la pauvreté, la malnutrition et les déficiences en micronutriments¹. L'échelle mondiale est envisagée à différents titres.

- Sur les plans environnementaux et des marchés, il y a nécessité d'inclure les effets environnementaux délocalisés de l'élevage européen au premier rang desquels on peut citer la contribution au réchauffement climatique et des effets induits par les importations de soja. Par ailleurs, l'élevage européen est dans un marché ouvert, une bonne vision des évolutions de la demande en produits animaux, en aliments du bétail, des dynamiques de productions dans d'autres parties du monde est nécessaire pour éviter une déstabilisation des marchés intérieurs par des importations massives de produits animaux fabriqués de manière non durable et loin des standards de qualité européens et à l'inverse analyser les marchés porteurs pour des productions européennes.
- Sur le plan des opportunités pour nos recherches, sortir du cadre européen en élargissant au niveau mondial des thématiques où nous sommes reconnus (Agro-écologie, génomique...) aurait des intérêts car force est de constater que (i) *L'élevage est souvent le parent pauvre des approches globales* en particulier du fait que les systèmes d'élevage sont complexes, difficiles à représenter de façon réaliste en modélisation, en tout cas beaucoup plus que les systèmes de culture ; (ii) *l'INRAE n'est pas présent dans les rapports internationaux* concernant l'élevage faute de travaux conduits à cette échelle mondiale et pourtant (ii) *l'INRAE peut faire valoir une approche générique*. Une des originalités de l'INRAE à ce niveau serait de pouvoir apporter de la généralité par rapport aux travaux du CIRAD qui sont globalement plus sur l'étude de cas et par là, contribuer à améliorer les systèmes locaux. L'accès à ces terrains d'étude permettrait en retour de challenger nos idées, concepts et modèles. Le LIA "Genetic Improvement of Indian Cattle and buffaloes"² est une bonne illustration des apports possibles de l'INRAE.

¹ Ce qui correspond aux objectifs du développement durable des Nations Unies ODD1 (No poverty), ODD2 (zero hunger) et ODD 3 (good health and well-being)

² Le LIA GIMIC : ce Laboratoire International Associé créé en 2018 permet à un groupe de généticiens de l'unité GABI d'étendre l'expertise en matière de sélection génomique à l'amélioration génétique de nouvelles populations (croisés taurins x zébus, zébus purs et buffles). Le projet allie recherches fondamentales et appliquées et vise à démontrer la faisabilité de la mise en place des programmes de sélection durables en bovins et buffles en conditions tropicales caractérisées par des systèmes d'élevage des troupeaux de très petite taille aux ressources très limitées, en prenant en compte les interactions génotype-milieu à l'échelle nationale. Il bénéficie par ailleurs d'un accès à des données de terrain uniques au monde, collectées en particulier à travers un gros projet de génotypage et phénotypage financé par la Bill and Melinda Gates Foundation

1.2.3. Une réflexion dédiée à l'élevage d'animaux terrestres et de poissons

LA PROSPECTIVE concerne toutes les filières animales dont l'aquaculture, y compris des modèles intégralement circulaires comme l'aquaponie associant la culture de végétaux hors sol et l'élevage urbain (poissons, pastoralisme urbain avec les espaces verts animalisés). Les élevages des territoires ruraux, périurbains et urbain sont considérés. Concernant les substituts à la viande (viande in vitro, protéines d'insectes, produits 3D-Surimi, algues) nous avons considéré que :

- Les recherches sur les techniques de production de la viande in vitro n'entrent pas dans le périmètre de la prospective mais le développement potentiel de ce substitut doit être intégré comme un élément de contexte dans les réflexions. En effet, il serait illusoire de vouloir concurrencer des travaux qui disposent de financements considérables et cette production souffre par ailleurs de nombreuses limites qui font douter de sa pertinence³ ;
- La production des insectes peut être incluse dans le cadre de la bioéconomie de transformation des biomasses. Toutefois celle-ci n'est pas apparue comme une thématique prioritaire dans la mesure où des PME innovantes disposent de moyens importants, les possibilités de production (1,5 million de tonnes et au maximum 5 millions de tonnes au niveau européen dans le scénario le plus optimiste⁴) ne changeront pas les équilibres des biomasses utilisées en élevage (plus de 110 Mt en élevage)⁵, même si localement quelques élevages de volaille ou poissons pourraient bénéficier de protéines d'insectes, les performances environnementales sont pour le moins mitigées⁶ et le WUR a pris de l'avance en recherche. Il reste des questions sur l'aptitude des insectes à recycler en aliment du bétail des déchets. Cela pourrait être traité dans le cadre de thèses pour maintenir une veille sur ce secteur. Les vers qui sont plus à même de valoriser des sous-produits ou déchets (lombri-compost), plus faciles à produire que les insectes et bien valorisés par la volaille ou les porcs mériteraient au moins une étude préliminaire.
- L'évaluation globale de ces filières reste par contre un enjeu pour nos recherches. Il faut pouvoir évaluer par des approches globales les impacts environnementaux et l'acceptabilité des produits par le consommateur (Est-on prêts à manger des insectes en Europe ? quelle saveur des produits ?), l'intérêt économique de ces filières par rapport à la production de viande blanche ou à d'autres substituts basés sur des protéines végétales transformées. La question du cortège microbien accompagnant la production d'insecte reste une question majeure.

Les effets sur la santé humaine des émissions de l'élevage, des mécanismes de l'antibiorésistance et de sa diffusion bien qu'intimement liée à l'étude des microbiotes n'est pas intégrée dans les réflexions, cette question étant par ailleurs abordées dans la prospective Nexus santé. LA PROSPECTIVE élevage a travaillé sur les leviers pour réduire les émissions vers l'environnement et intègre les effets de l'élevage sur les écosystèmes à travers l'analyse des services (et disservices) rendus par l'élevage.

³ Hocquette J.F., Mainsant P., Daudin J.D., Cassar-Malek I., Rémond D., Doreau M., Sans P., Bauchart D., Agabriel J., Verbeke W., Picard B. 2013. La viande du futur sera-t-elle produite in vitro ? INRA Prod. Anim., 26 (4), 363-374

⁴ International Platform of Insects for Food and Feed, 2019; <http://ipiff.org/publications-position-papers/>

⁵ Dronne Yves., 2018. Les matières premières agricoles pour l'alimentation humaine et animale : l'UE et la France. In: Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 181-200.

⁶ Thevenot A., Rivera J.L., Wilfart A., Maillard F., Hassouna M., Senga-Kiesse T., Le Feon S., Aubin J. 2018. Mealworm meal for animal feed: Environmental assessment and sensitivity analysis to guide future prospects. *J. Cleaner Prod.*, 170: 1260-1267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.054>

1.3. Organisation générale et conduite de la prospective

1.3.1. Pilotage et animation générale de la prospective

La prospective a été animée par un groupe de 15 chercheurs⁷ appartenant à plusieurs départements et couvrant les principales filières animales et domaines de compétences. Le groupe s'est réuni formellement à 3 reprises et a fonctionné par réunions téléphoniques aussi souvent que nécessaire. Un comité de pilotage composé des CD les plus concernés (GA, Phase, SA, SAD, SAE2 et EA) et directeurs de métaprogrammes en cours lors du démarrage du chantier (Glofoods, Ecoserv, Gisa, Selgen), du DS Agriculture et de Ph Chemineau (DARESE) s'est réuni à deux reprises durant la première moitié du chantier pour aider à cadrer le dispositif.

1.3.2. Mobilisation de Groupes thématiques :

Le groupe d'animation a identifié dix thèmes de travail en réponse à des enjeux cognitifs et finalisés stratégiques pour l'INRAE et ayant vocation à promouvoir des approches systémiques et interdisciplinaires et, pour certains d'entre eux au moins, à affirmer un leadership de l'INRAE au plan international. Ces thèmes ont été approfondis par 10 groupes de chercheurs issus de différents départements ce qui a mobilisé 104 chercheurs, principalement de l'ex-INRA mais aussi de IRSTEA. Ces groupes, animés par un chercheur (ou un tandem) ont analysé les gaps de connaissance, les enjeux de recherche, les questions scientifiques émergentes, les verrous méthodologiques et réalisé une analyse critique de notre dispositif (moyen, partenariats) en regard de leur thématique. Ils ont fonctionné à la convenance des animateurs mais le plus souvent avec une ou deux réunions en présentiel et/ou par visioconférence, des réunions entre animateurs et quelques experts. Plusieurs GT ont mis en place des sous-groupes pour traiter des questions particulières.

- GT1 : Compréhension des enjeux sociétaux et économiques qui se jouent autour de l'élevage (P. Dupraz (SAE2))
- GT2 : Elaboration précoce des phénotypes des animaux et des caractères de production (C Cotinot (PHASE), Cl Rogel-Gaillard (GA))
- GT3 : Compréhension des régulations chez l'animal en production (N Friggens (PHASE))
- GT4 : Gestion intégrée de la santé et du Bien-être animal (V. Ducrot (SA), C. Citti (SA))
- GT5 : L'élevage pour valoriser des ressources alimentaires variées dans un contexte de changement climatique (R. Baumont (PHASE), J.L. Peyraud (DSA-Agri))
- GT6 : Gestion des effluents de l'élevage (S. Houot (EA))
- GT 7 : Qualité des produits et des coproduits animaux (C. Berry (PHASE))
- GT 8 : Les bouquets de services de l'élevage (J. Aubin (PHASE), P. Dupraz (SAE2))
- GT 9 : Valorisation de la diversité à différents niveaux d'organisation (M.O. Nozière (SAD))
- GT 10 : L'élevage à l'ère du numérique (P. Faverdin (PHASE), L. Bossard (PHASE))

1.3.3. Mobilisation des groupes filières de l'INRAE

Les groupes filières animales ont été mobilisés au début de la prospective pour faire remonter en priorisant les besoins et questions de recherches avec une entrée par les grands challenges socio-économiques relever. Ils ont travaillé en dédiant une de leur réunion à cette réflexion et produit un document court.

⁷ Joel Aubin (Phase), Marc Barbier (SAD), René Baumont (Phase), Cécile Berri (Phase), Jean Pierre Bidanel (GA), Christine Citti (SA), Corinne Cotinot (Phase), Christian Ducrot (SA), Pierre Dupraz (SAE2), Nicolas Friggens (Phase), Philippe Faverdin (Phase), Sabine Houot (EA), Marie-Odile Nozières-Petit (SAD), Claire Rogel Gaillard (GA), Véronique Santé Lhoutellier (CEPIA)

1.3.4. Organisation de séminaires ouverts

Deux séminaires ouverts à nos partenaires des Instituts techniques ont été programmés en début 2018 pour éclairer le contexte socio-économique de l'élevage et faire émerger des questions de recherche.

- Le séminaire « où va l'élevage ? Contexte sociétal » (15/01/2018) a été organisé pour échanger sur les controverses concernant l'élevage, en construire une vision partagée, analyser les moteurs des controverses et les attentes des citoyens consommateurs, les motivations de la diversification des choix d'alimentation et échanger autour des avenir qui peuvent se dessiner selon les évolutions possibles des controverses⁸.
- Le séminaire « où va l'élevage ? Contexte économique » (7 Mars 2018), co-organisé avec le chantier sur la PAC (H Guyomard), a concerné la dichotomie entre une demande quantitative pour les produits animaux qui s'accroît hors Europe alors qu'elle stagne/baisse sur le marché intérieur européen qui semble s'orienter vers une demande de montée en gamme de la qualité. Les échanges ont aidé à dessiner un avenir économique pour les filières d'élevage et mettre en avant les questions de recherche à aborder afin de fournir des éléments permettant d'argumenter les choix à effectuer.

1.3.5. Chantiers transversaux :

Deux chantiers transversaux aux réflexions des GT, ont été conduits. Ils ont concerné :

- Le partenariat agricole dans l'objectif de mieux le structurer, de partager avec nos partenaires les enjeux et fronts de science avec l'ambition de « tirer » l'ensemble du dispositif en partageant des objectifs communs et de couvrir une large gamme de TRL jusqu'à l'innovation terrain. Deux opérations majeures ont été conduites : la création du GIS Avenir Elevage et le montage du LIT « OUSTEREL ».
- La modélisation en élevage en mobilisant le collectif AtmoPhase au démarrage de la prospective dans l'objectif d'analyser notre dispositif et les nouveaux besoins en modélisation compte tenu des évolutions des fronts de science dans le domaine de l'élevage. Suite à un travail d'enquête qui a permis de faire l'état des lieux et l'organisation d'une journée de brainstorming (document joint en annexe), la réflexion a ensuite été conduite conjointement avec la prospective « Biologie Prédictive » où la modélisation des systèmes biologiques était une question centrale (des experts ont participé simultanément aux 2 ARP). Nous avons poursuivi les réflexions sur le besoin d'élaboration de scénarii prospectifs sur la place et des rôles de l'élevage et des exercices de modélisation à conduire pour éclairer cette question.

2. Les enjeux autour de l'élevage et les moteurs des évolutions

2.1. Un constat mitigé sur l'élevage aujourd'hui

L'élevage est une activité économique importante en Europe. Il contribue à la sécurité alimentaire et nutritionnelle des populations. C'est une composante clé de la vitalité de nombreux territoires en étant présent dans presque toutes les régions avec une grande diversité de systèmes de production (ESCO

⁸ Les 5 scénarios imaginés par le Casdar Accept ont été envisagés : « la viande est le nouveau tabac », « l'élevage suit le modèle viticole », la « junk food se généralise », « une agriculture européenne productive pour faire face aux dérèglements frappant une partie du monde » et « la co construction de démarche de progrès » (scénario tendanciel).

RISEP)⁹. Le secteur contribue de manière substantielle à l'économie, l'évaluation étant de 165 milliards d'euros par an en 2015, ce qui représente 45% du chiffre d'affaire du secteur agricole (29,5 M€ et 37% respectivement en France). L'UE-28 est généralement autosuffisante en produits d'origine animale et exporte sur les marchés mondiaux, le solde du commerce international ayant d'ailleurs doublé depuis 2000 pour atteindre 33,7 milliard en 2019¹⁰.

L'élevage a connu des gains de productivité considérables. La révolution verte a eu pour objectif d'accroître la productivité de l'agriculture et a apporté des gains d'efficience. Par exemple, par rapport à 1944, la production d'un milliard de kg de lait en 2007 nécessite cinq fois moins d'animaux, trois fois moins d'eau, dix fois moins de terre et l'empreinte C du lait a été divisée par 2,5¹¹. L'indice de consommation des poulets est passé de 2,2 dans les années 60 à 1,6 aujourd'hui¹². La productivité numérique des truies est passée de 16,4 à 20,6 porcelets sevrés entre 1970 et 2016 tandis que l'indice de consommation des porcs a diminué de 3,80 à 2,37¹³. Entre 1969 et 2017, la production française de porc a réduit son empreinte Carbone de 40% soit une épargne de 2,2 millions de tonnes d'eq CO₂ (ou encore l'équivalent de 20 milliard de km de voiture) et d'autant la surface nécessaire par porc (soit 480 000 ha de SAU)¹⁴.

L'élevage est un utilisateur majeur de la Surface agricole et des biomasses végétales produites. En France, l'élevage consomme 73% de la biomasse produite sur le territoire (la totalité des fourrages et pas loin de la moitié des COP) et 71% des protéines produites (celles des fourrages et la moitié de celles des cultures). Ces ordres de grandeurs se retrouvent au niveau européen⁵. L'alimentation animale joue en fait un rôle économique et de tampon majeur pour les grandes filières végétales (céréales, colza) en valorisant les écarts entre l'offre de grains et la demande des marchés pour la consommation humaine interne et l'export de manière structurelle mais aussi lorsque des déséquilibres de marchés apparaissent. Il valorise aussi les surfaces en prairies permanentes (un peu moins de 10 million d'ha)¹⁵ en France qui seraient très difficiles voire impossibles à valoriser sans les ruminants et les chevaux. Ces quelques chiffres illustrent le potentiel de l'élevage à valoriser des surfaces pour produire des aliments et en même temps la concurrence qu'il peut y avoir entre alimentation humaine et alimentation animale. Toutefois, une large partie des aliments valorisés par les élevages, de 60 à 90% selon les systèmes de production (plus pour les ruminants), n'est pas consommable par l'homme (fourrages, coproduits...). L'élevage est recycleur par nature et l'efficience alimentaire des productions animales, généralement considérée comme faible, s'améliore grandement si on prend en compte cette capacité de recyclage et des systèmes de production peuvent être des producteurs nets de protéines consommables pour l'homme¹⁶.

⁹ Dumont B. (coord), Dupraz P. (coord.), Aubin J., Benoit M., Bouamra-Mechemache Z., Chatellier V., Delaby L., Delfosse C. Dourmad J.Y., Duru M., Frappier L., Friant-Perrot M., Gagné C., Girard A., Guichet J.L., Havlik P., Hostiou N., Huguenin-Elie O., Klumpp K., Langlais A., Lemauiel-Lavenant S., Le Perchec S., Lepiller O., Méda B., Ryschawy J., Sabatier R., Veissier I., Verrier E., Vollet D., Savini I., Hercule J., Donnars C., 2016, Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Synthèse de l'expertise scientifique collective, INRA (France), 133 pages.

¹⁰ Chatellier V., Dupraz P. 2019. Les performances économiques de l'élevage européen : de la « compétitivité coût » à la « compétitivité hors coût ». *INRA Prod Anim.*, 32, 171-188.

¹¹ Capper J.L., Cady R.A., Bauman D.E., 2009. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *J. Anim. Sci.*, 87, 2160-2167. Il faut toutefois noter que ce bilan apparemment très positif doit être pondéré par le fait qu'il s'est développé des troupeaux allaitants pour produire la viande qui ne l'était plus avec le troupeau laitier.

¹² Tallentire C.W., Leinonen I., Kyriazakis I. 2016. Breeding for efficiency in the broiler chicken. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36: 66. doi:10.1007/s13593-016-0398-2.

¹³ Knap P.W., Wang L. 2012. Pig breeding for improved feed efficiency. In: Feed efficiency in swine. Patience J.F. (Ed). Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 167-181

¹⁴ Dourmad J.Y., Bossard .2018. Présentation lors des journées de la Recherche Porcine, Paris, 2018.

¹⁵ Source Agreste

¹⁶ Ertl P., Klocker H., Hörtenhuber S., Knaus W., Zollitsch W., 2015. The net contribution of dairy production to human food supply: the case of Austrian dairy farms. *Agric. Systems*, 137, 119-125

L'élevage est par ailleurs confronté à une crise de légitimité, environnementale et sociétale sans précédent et il doit évoluer en profondeur. Les menaces et incertitudes poussant au changement sont nombreuses, variables selon les filières et selon les pays en Europe. Les principaux drivers de l'évolution concernent

- Les enjeux environnementaux. Des déséquilibres écologiques majeurs liés à l'intensification des systèmes d'élevage, leur spécialisation et à leur concentrations sur certains territoires en Europe sont apparus dès les années 80 avec la question du Nitrate¹⁷. Par la suite, il y a eu une prise de conscience d'effets plus globaux de l'élevage sur le changement climatique (principalement les ruminants) et la perte de biodiversité avec le rapport « Livestock Long Shadow »¹⁸ et l'utilisation importante de ressources naturelles¹⁹ dans la perspective de nourrir 10 milliard d'êtres humains. Rappelons en particulier qu'en 2017, le secteur agricole de l'UE-28 a généré 10% des émissions totales de GES de la région²⁰ dont près de la moitié provient de la fermentation entérique et de la gestion des effluents d'élevage. Une fois les émissions liées à la production, au transport et à la transformation des aliments pour animaux incluses, le secteur de l'élevage est responsable de 81 à 86%²¹ des émissions de GES agricoles en Europe. Le rôle de l'élevage européen dans la déforestation pour l'importation de soja est vivement débattu pour ses effets sur la biodiversité. L'Europe est structurellement déficitaire en protéines et importe 17 million de tonnes de protéines de soja par an. Les importations de commodités en Europe (huile de palme, tourteau de soja, viande, bois, caoutchouc) représentent 10% de la déforestation mondiale²². L'élevage est aussi questionné pour ses émissions d'ammoniac et de particules fines affectant la qualité de l'air, les risques de pollution chimique et biologique des écosystèmes par dissémination de pathogènes, de résidus médicamenteux et de gènes de résistance aux antibiotiques par les effluents sont apparus comme autant de nouveaux défis. De nombreuses publications et rapports mettant en avant les impacts de l'élevage, alertent sur les conséquences d'un accroissement de la production mondiale de produits animaux et sur l'intérêt de régimes moins riches en viande qui seraient

Wilkinson J.M., 2011. Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal*, 5, 1014-1022

Laisse S., Baumont R., Dusart L., Gaudré D., Rouillé B., Benoit M., Veyssat P., Rémond D., Peyraud J.-L., 2018. L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. In : Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage. Baumont R. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 31, 269-288

¹⁷ Hénin S.C., 1980. Activités agricoles et qualité des eaux. Rapport du groupe de travail. Paris, France, Ministère de l'agriculture ; Ministère de l'environnement.

Peyraud J.L., Cellier P., Donnars C., Vertes F., 2014. Réduire les pertes d'azote dans l'élevage. Expertise scientifique collective. Éditions Quæ Collection *Matière à débattre et décider*. 168 pp (Expertise Scientifique collective)

¹⁸ FAO: Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C. 2006. Livestock's long shadow. FAO, Rome

¹⁹ Godfray H.C.J., Beddington J.R., Crute I.R., Haddad L., Lawrence D., Muir J.F., Toulmin C., 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>

Foley J.A., Ramankutty N., Brauman K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., Mueller N.D., O'Connell C., Ray D.K., West P.C., Balzer C., Bennett E.M., Carpenter S.R., Hill J., Monfreda C., Polasky S., Rockstrom J., Sheehan J., Siebert S., Tilman D. and Zaks D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478, 337-342

²⁰ European Environment Agency, 2019. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2017 and inventory report 2019. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, 27 May 2019, EEA/PUBL/2019/051, 962 p.

²¹ Leip A., Weiss F., Wassenaar T., Perez I., Fellmann T., Loudjani P., Tubiello F., Grandgirard D., Monni S., Biala K. 2010. Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS) final report: European Commission, Joint Research Centre, 323

²² European Commission 2019. Stepping up EU Action to Protect and Restore the World's Forests. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, 22p.

plus durables²³. Au final, de nombreuses publications²⁴, toutes basées sur la même méthodologie et l'évaluation des mêmes impacts montrent que les impacts des produits animaux sont toujours plus élevés que les impacts des produits végétaux et que la viande de ruminant a de loin les impacts les plus élevés, du moins pour les métriques utilisées.

- Les enjeux de santé publique. Il est établi qu'une forte consommation de viande rouge et de viandes transformées est associée à un risque accru de cancer colorectal²⁵. Ces effets négatifs potentiels d'une surconsommation ne doit toutefois pas faire oublier les bénéfices nutritionnels et sur le développement des fonctions cognitives des produits animaux²⁶. L'OMS recommande un équilibre 50/50 entre protéines animales et végétales pour une alimentation saine alors que les pays d'Europe de l'Ouest sont plutôt proches d'un ratio 65/35 et avec un apport protéique globalement excédentaire. Une diminution modérée de la consommation de viande (de produits animaux plus généralement) est souhaitable d'un point de vue nutritionnel. Les maladies animales peuvent causer de graves dommages sociaux, économiques et environnementaux et, dans certains cas, menacer la santé humaine. On estime que 60% des maladies infectieuses émergentes chez l'homme sont d'origine animale (grippe H1N1, H5N1, VIH, Ebola, syndrome respiratoire aigu soudain (SRAS), virus du Nil occidental, COVID19, etc.) et 70 % d'entre eux sont dus à des agents pathogènes qui circulent dans la faune sauvage qui leur sert de réservoir²⁷. L'expansion rapide et la propagation de nouveaux gènes de résistance aux antibiotiques constitue une autre forme d'émergence dans laquelle l'élevage joue un rôle. Au début des années 2000, on estimait que la résistance aux antimicrobiens était responsable d'environ 25 000 décès européens par an²⁸
- Les enjeux sociétaux et la consommation de viande. D'autres sujets sont venus alimenter les controverses sur l'élevage notamment la question du bien-être animal (en particulier pour les monogastriques), celle du modèle d'élevage dits « intensif » qui concentrerait tous les maux et la question de l'éthique animale²⁹. Ces controverses varient selon les pays, avec une attention particulière sur la résistance aux antibiotiques au Danemark, des controverses très fortes autour du bien-être animal en Allemagne, aux Pays Bas, au Royaume Uni, dans les Pays Scandinaves et plus récemment en France alors que les pays du Sud sont moins sensibles à ces

²³ Heller, M.C., Keoleia G.A., Willett W.C., 2013. Toward a life cycle-based, diet-level framework for food environmental impact and nutritional quality assessment: a critical review. *Environ. Sci. Technol.* 47 (22), 12632e12647.

Meier T., Christen O., 2012. Gender as a factor in an environmental assessment of the consumption of animal and plant-based foods in Germany. *Int. J. LCA* 17 (5), 550e564.

Henk Westhoek H., Lesschen J.P., Rood T., Wagner S., De Marco A., Murphy-Bokern D., Leip A., van Grinsven H., Sutton M.A., Oenema O. 2014. Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change*, 26, 196-205.

²⁴ de Vries M., de Boer I.J.M. 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments *Livestock Sci.*, 128 (2010) 1–11

Poore J., Nemecek T., 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers *Science* 360(6392):987-992

²⁵ Bouvard V., Loomis D., Guyton K.Z., Grosse Y., Ghissassi F.E., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Mattock H., Straif K., 2015. International agency for research on cancer monograph working group. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *Lancet Oncology*, 16, 1599-1600

²⁶ Leroy F., Cofnans N. 2019. Should dietary guidelines recommend low red meat intake?, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, DOI: 10.1080/10408398.2019.1657063

Balehgn M., Mekuriaw Z., Miller L., McKune S., Adesogan T., 2019. Animal sourced foods for improved cognitive development. *Animal Frontier*, 9, 51-57.

²⁷ Blancou J.B., Chomel B., Belotto A., Meslin F.X. 2005. Emerging or re-emerging bacterial zoonosis: factors of emergence, surveillance and control. *Vet Res.*, 36, 507-522.

²⁸ <http://www.euro.who.int/fr/health-topics/disease-prevention/antimicrobial-resistance/antibiotic-resistance>

O'Neill J., 2016. Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations. Report for the UK government, 84p

²⁹ Delanoue E., Roguet C., 2015. Acceptabilité sociale de l'élevage en France : recensement et analyse des principales controverses à partir des regards croisés de différents acteurs. *INRA Prod. Anim.*, 28, 39-50

questions (pour le moment du moins). En France la taille des élevages fait débat³⁰ alors que ce n'est pas un sujet de préoccupation dans d'autres pays. Le développement économique du secteur de l'élevage a longtemps été tiré par un accroissement de la demande européenne. Ce n'est plus le cas aujourd'hui où la population ne s'accroît plus et vieillit et si le consommateur européen reste attaché aux produits animaux, la consommation de viande (voire de produits laitiers dans certains pays) par habitant tend à diminuer³¹ en réponse aux différents enjeux évoqués ci-dessus et aux modifications de modes de vie avec toutefois des différences entre viandes, celle de bœuf chutant plus fortement alors que les viandes de volailles et de poissons progressent. L'apparition de nouveaux aliments technologiques alternatives à la viande peut également contribuer à déplacer les équilibres même si leur impact réel est aujourd'hui incertain³².

- Les enjeux interne aux filières. Celle-ci sont verrouillées rendant difficile la recherche de nouveaux équilibres, certaines d'entre elles n'ont pas connu d'innovations technologiques majeures sur les produits à l'exception notable de la filière lait, du steak haché (seule innovation mais d'importance majeure en filière viande)³³ et la découpe des volailles, elles doivent faire face à une instabilité croissante des prix, des marchés et des revenus pénalisant in fine l'attractivité des métiers³⁴. Les filières doivent aussi faire face à une pyramide des âges défavorable, à la question du renouvellement des générations et de fait à l'attractivité des métiers dans un contexte d'exploitations qui s'agrandissent. Les structures de plus grande taille rendent plus difficile l'optimisation des pratiques agro-écologiques et vont à l'encontre de la vision de la société mais peuvent permettre des économies d'échelle. Dans ce contexte déjà difficile, les filières françaises ont perdu en compétitivité face à la concurrence Européenne et mondiale³⁵ ce qui s'explique par une restructuration insuffisante des outils de production et de mise en œuvre stratégies volontaristes de pays voisins ayant opté pour la massification de l'offre (porc en Allemagne et Espagne, volaille en Pologne) avec des normes sociales et fiscales parfois plus avantageuses et à une incapacité en France à prendre du recul pour définir des stratégies face à la pression du court terme. La reconquête pour l'élevage français des parts de marchés interne doit être instruite (i) face à des concurrents très compétitifs comme c'est le cas en volaille où 70% de la consommation hors foyer provient de l'importation et (ii) dans un contexte où la consommation baisse (viande rouge) où au mieux stagne (volaille) et où la production ne correspondant pas toujours à la demande nationale ce qui implique des évolutions majeures.

³⁰ Voir par exemple les débats emblématiques autour de la ferme des 1000 vaches

³¹ Tavoularis G., Sauvage E., 2018. CREDOC, Consommation et modes de vies, n°300, ISSN 0295-9976.

³² Tubbs R., Seba C. 2019. Rethinking Food and Agriculture 2020-2030. The Second Domestication of Plants and Animals, the Disruption of the Cow, and the Collapse of Industrial Livestock Farming. A Rethink Sector Disruption Report

³³ Alors que les achats en volume de viande de boucherie, notamment de bœuf régressent depuis plusieurs années, la consommation de viande hachée continue de croître (Agreste Panorama, Mars 2017). Le steak haché représente désormais plus de la moitié de la viande bovine vendue dans les supermarchés et le volume de hamburger dans la restauration a été multiplié par 14 en 10 ans (Le Monde, 23/2/19).

³⁴ Nozieres-Petit, M. O., Baritoux, V., Couzy, C., Derville, M., Perrot, C., Sans, P., & You, G. (2018). Transformations des filières françaises de produits carnés et laitiers : la place des éleveurs en question. INRA Productions Animales, 31(1), 69-82

³⁵ Turolla S., Bouamra-Mechemache Z., Chatelier V., Cheptea A., Dakpo H., Desjeux Y., Duvaleix-Tréguer S., Caigné C., Huchet M., Jeanneaux Ph., Latouche K., Latruffe L., 2018. Compétitivité des filières animales française (projet COMPANII). Rapport pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 67p

SENAT, 2019. Rapport coordonné par M. Duplomb. Rapport d'information du Sénat sur la place de l'agriculture française sur les marchés mondiaux, rapport n°528, 32p.

2.2. Des opportunités sont à saisir pour un élevage plus durable

Ces opportunités relèvent de divers aspects

- Le rôle de l'élevage est reconnu comme essentiel pour boucler les cycles de nutriments dans le cadre d'approches agro-écologiques reposant sur les ressources naturelles, les services écosystémiques, les processus écologiques et le recyclage des éléments nutritifs en privilégiant les engrais organiques plutôt que synthétiques³⁶ et en exploitant la capacité des animaux à valoriser les biomasses non directement utilisables en alimentation humaine¹⁶. Il y a donc aussi, à côté des démarches visant la réduction des impacts, des opportunités à saisir pour développer un élevage plus durable et dont les rôles et services sont reconnus et appréciés par la société.
- Les ambitions de la grande distribution et des transformateurs³⁷, leur souhait de diversifier les produits dès l'amont de la filière et l'évolution des demandes d'une partie des consommateurs de plus en plus soucieux de leur alimentation vers des qualités premium³⁸, relayées en France par les États généraux de l'alimentation (EGA, atelier 11) où toutes les filières ont proposé une montée en gamme de leur production, va forcer les évolutions vers des productions plus durables et un accroissement (sans doute modéré) des productions sous SIQO.
- Les orientations de la PAC sont un levier fort pour l'évolution des systèmes. La mise en place de paiement pour services environnementaux pourraient aider à soutenir la prairie entretenue par les ruminants et les éléments associés (haies) au double titre qu'elles stockent du Carbone même si le niveau de séquestration (intensité, durée) fait toujours débat³⁹ et de leur rôle essentiel pour la biodiversité : détermination de la distribution et de l'abondance des organismes de différents niveaux trophiques, y compris les plantes, les insectes, les petits mammifères et les oiseaux⁴⁰ (autant de performances non intégrées dans les méthodes actuelles d'évaluation). La mise en œuvre de taxes (par exemple sur les émissions de GES agricole : élevage et engrais minéraux) pourraient inciter à accélérer les progrès engagés sur la mitigation des GES.

³⁶ HLPE, 2016. Sustainable agricultural development for food security and nutrition: what roles for livestock? A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-i5795e.pdf>

HLPE, 2019. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. A report by The High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition. Rome, Italy.

Mottet A., de Haan C., Falcucci A., Tempio G., Opio C., Gerber P., 2017. Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Sec.*, 14: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>

de Boer I.J.M., van Ittersum M.K., 2018. Circularity in agricultural production. Wageningen, Netherlands, Wageningen University & Research. https://www.wur.nl/upload_mm/7/5/5/14119893-7258-45e6-b4d0-e514a8b6316a_Circularity-in-agricultural-production-20122018.pdf

³⁷ Par ex : Danone vise une neutralité C de tous ses produits pour 2050 ; plusieurs entreprises laitières (Allemagne, Espagne, France, Pays Bas, Portugal) commercialisent du « lait de pâturage » ; la Cooperl en France commercialise du jambon issu de porc n'ayant jamais reçu d'antibiotique ; la grande distribution prend de plus en plus d'initiatives sur les produits animaux.

³⁸ Selon l'Observatoire du rapport des Français à la qualité dans l'alimentaire, en 2016, ils étaient 82% à déclarer avoir le sentiment d'être plus attentifs qu'il y a cinq ans à leur alimentation. Et trois sur cinq à affirmer privilégier la qualité, quitte à payer plus cher. Selon l'Agence française pour le développement et la promotion de l'agriculture biologique, 16% des français consomment du bio quotidiennement en 2016 contre 10% en 2015 et 57% des Français consomment du bio au moins une fois par mois

³⁹ Soussana J.F., Tallec T., Blanford V., 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animals* 4, 334-350.

Smith, P., 2014. Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? *Global Change Biology*, 20 (9): 2708-2711. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12561>

⁴⁰ Bretagnolle V., Gauffre B., Meiss H., Badenhauer I. 2012. The role of grassland areas within arable cropping systems for the conservation of biodiversity at the regional level. In *Grassland productivity and ecosystem services*. In Lemaire G., Hodgson H., Chabbi A. (Edts), CAB International, 251-260.

Soussana J., Duru M. 2007. Grassland science in Europe facing new challenges: biodiversity and global environmental change. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 272: 1-11

- La forte demande mondiale peut offrir des opportunités. Même si avec 6% de la SAU mondiale et la nécessité de protéger son environnement l'Europe ne peut pas rivaliser avec d'autres grands pays exportateurs sur les marchés de masse, elle peut viser des marchés rémunérateurs, par ex vers une classe moyenne des pays émergents en recherche de produits différenciés, car les produits d'élevage européen ont des atouts à y faire valoir. Ils se caractérisent par des empreintes environnementales faibles et un niveau relatif de santé et de bien-être des animaux plus élevés que pour les autres pays exportateurs (voir ESCO RISEP) et, notamment les produits français, avec l'image de gastronomie qui les caractérise ;
- La meilleure connaissance de l'ensemble des services rendus par l'élevage, tels qu'analysés dans l'ESCO RISEP, conduit à une vision plus équilibrée des effets du secteur que ce qui est souvent rapporté dans la littérature et surtout ouvre des voies de progrès adaptées aux différents types de systèmes qu'il faut explorer ;
- Le déploiement de technologies de rupture, tels que la sélection génomique⁴¹ et le numérique peuvent être mises au service de pratiques respectueuses de l'environnement (voir aussi le thème 6 de la prospective Agro-écologie) et des animaux,

3. La vision INRAE pour l'élevage de demain et les recherches à conduire

3.1. Une nouvelle ambition pour l'élevage

L'élevage doit s'inscrire dans le cadre d'une transition alimentaire visant à rééquilibrer la part des protéines d'origine animale et végétale dans nos régimes de 65/35 à 50/50 comme le préconise l'OMS et le PNNS. Même si une réduction du volume de production de certains produits animaux ne doit pas être écartée par principe, il faut aussi penser l'équilibre entre la demande locale une demande mondiale de produits animaux en hausse et recherchant des commodités garantissant une qualité sanitaire irréprochable. Il faut aussi veiller à éviter des effets négatifs involontaires sur d'autres aspects de la durabilité engendrés par les choix. Par exemple l'érosion continue de l'élevage (manque d'attractivité de métiers, demandes sociétales, effets manifestes sur l'environnement, etc.) au profit des grandes cultures peut conduire à une uniformisation et un appauvrissement des paysages. Au-delà des oppositions souvent évoquées entre plante et animal ou entre extensif et intensif, il s'agit de promouvoir des systèmes bien adaptés à la diversité des contextes en France et en Europe et chercher à maximiser les synergies entre les secteurs pour une agriculture plus durable. L'élevage a un rôle indispensable en recyclant les biomasses, il est aussi bien plus que la seule production d'aliment et il contribue, sous ces différentes formes, à de nombreux objectifs de développement durable⁴². Nous devons renforcer ces rôles et mieux définir les conditions dans lesquelles l'élevage y apporte une contribution essentielle. La question est de savoir « Comment pouvons-nous augmenter le bénéfice social net de l'élevage, tout en garantissant une répartition équitable des coûts ? ».

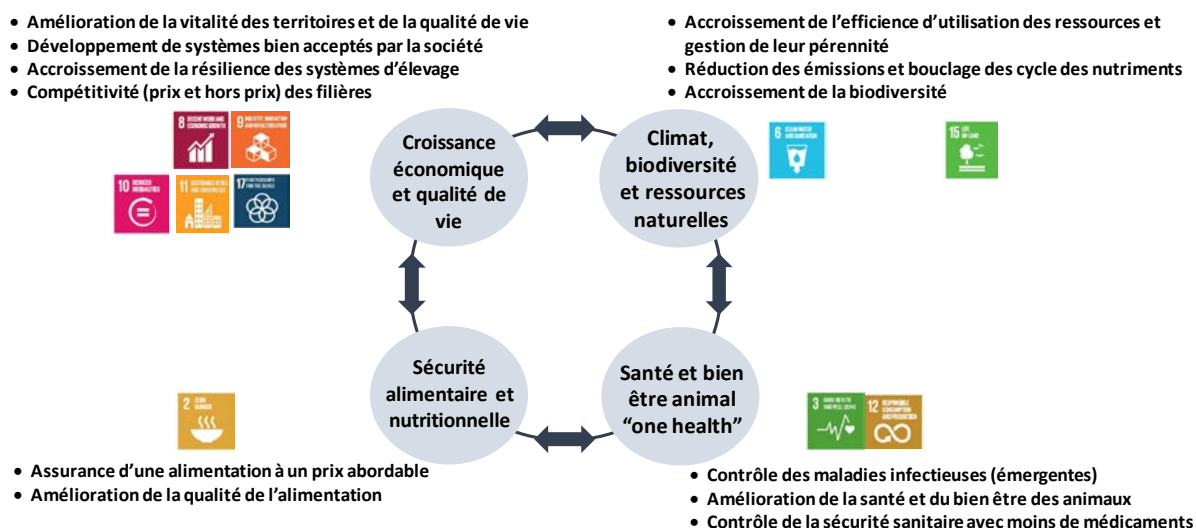
Pour remplir ses rôles, les systèmes d'élevage doivent fournir une gamme de biens et de services, plutôt que d'être guidés par le seul objectif de production de commodités. Les principaux défis

⁴¹ Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Frappat B., Gonzalez-Garcia E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C.R., Tixier-Boichard M., Brochard M. 2017. Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques. INRA Prod. Anim. 30 (1), 31-46

⁴² FAO 2018. World Livestock: transforming the livestock sector through the Sustainable Development Goals. Rome. 222 pp. Licence CC BY-NC-SA 3.0 IGO

auxquels l'élevage est confronté peuvent être présentés en quatre domaines de durabilité qui sont interdépendants (Figure 1).

Figure 1. Les quatre domaines de durabilité auxquels l'élevage français et européen peut et doit contribuer (adapté du Forum mondial sur l'agriculture de 2018⁴³).



3.2. Un nouveau paradigme pour construire le futur de l'élevage

Des progrès significatifs ont été accomplis depuis le début des années 1980 sur la réduction des émissions par unité de produit, grâce à la recherche d'une efficacité accrue des facteurs de production. Mais les travaux conduits ont principalement cherché à optimiser le fonctionnement des systèmes dans une logique de progrès incrémentiel, d'approche linéaire supposant les ressources non limitées et en pensant l'optimisation de la production élément par élément sans considérer les effets secondaires et les autres maillons des systèmes agri-alimentaires⁴⁴. Dans un monde aux ressources finies et avec des écosystèmes parfois fortement dégradés, les adaptations à accomplir sont majeures et interrogent sur la place et le rôle que doit tenir l'élevage au sein de systèmes agri-alimentaires qui ne doivent pas dépasser les possibilités de la planète⁴⁵. Si la recherche d'efficacité accrue d'utilisation des ressources reste une priorité qui permet de réduire les flux physiques entrant et sortant du système de production, elle n'est pas suffisante car elle ne garantit pas la résilience des systèmes de production face aux aléas climatiques et sanitaires et elle ne traduit pas l'aptitude des systèmes d'élevage à restaurer la qualité des écosystèmes et à sécuriser les ressources. C'est pourquoi au-delà de la recherche d'une efficacité accrue, il faut aussi capter l'aptitude des pratiques à maintenir, voire « régénérer » la qualité des écosystèmes et des ressources (HLPE, 2019) par le développement d'une agriculture et d'un élevage agro-écologique⁴⁶.

⁴³ <https://www.gffa-berlin.de/en/gffa-kommunique-2018/>

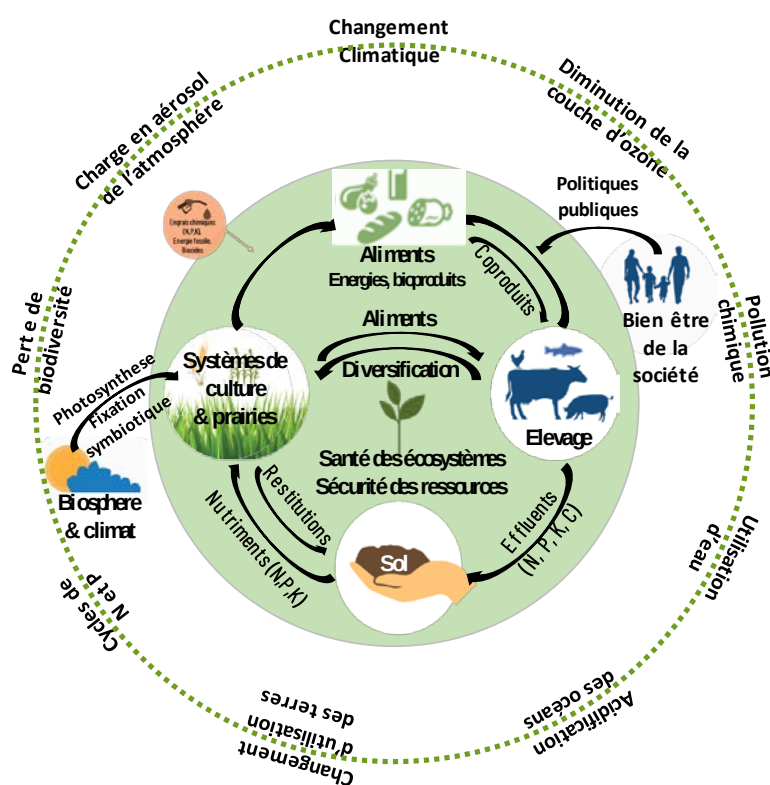
⁴⁴ Par exemple en raisonnant le seul maillon de l'élevage, la recherche de productivité a conduit à sélectionner des animaux de plus en plus productifs mais aussi à les alimenter avec des rations de qualité de plus en plus élevée pour exprimer leur potentiel, accroissant par là même la compétition avec l'alimentation humaine.

⁴⁵ Rockstrom J., Steffen W., Noone K., Persson A., Chapin F. S., Lambin E., Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H., Nykvist B., De Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sorlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R. W., Fabry V. J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32. [online]URL:<http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>.

⁴⁶ INRA, 2012. Rapport du chantier Agro-écologie, 107pp.

L'enjeu est de (re)positionner l'élevage et de le faire évoluer pour qu'il contribue pleinement à une **bioéconomie⁴⁷ circulaire (et territorialisée)** intégrant une agriculture économe en ressources non (ou peu) renouvelables, qui élimine les pertes et gaspillages en recyclant les biomasses, qui produit une alimentation saine et irréprochable d'un point de vue sanitaire et à un prix abordable ainsi que d'autres biens et services reconnus par la société (stockage de carbone, préservation de la biodiversité, et entretien des paysages, production d'énergie, etc.) (Figure 2). L'élevage joue un rôle central en valorisant des flux de biomasses végétales non consommable, en produisant à partir d'elles des aliments à haute valeur nutritionnelle et en entretenant le sol par les effluents.

Figure 2. Représentation des rôles de l'élevage au sein de systèmes agri-alimentaires circulaires et durables qui s'inscrivent dans les limites à ne pas dépasser pour la planète.



Cette approche circulaire doit contribuer à (i) réduire l'impact environnemental de l'élevage, et plus globalement du secteur agricole en substituant le plus possible le C fossile et l'azote minéral par des ressources renouvelables (photosynthèse, fixation symbiotique, effluents d'élevage), (ii) repenser l'usage des sols et des ressources pour les besoins de la production d'aliments, la gestion de la biodiversité et la production d'énergie et de biomatériaux, (iii) inciter à la relocalisation de l'élevage, (iv) contribuer à la transition énergétique par la production d'énergie renouvelable et (v) diversifier les sources de revenus des éleveurs et renouer des liens entre éleveurs et autres acteurs des territoires, dont les consommateurs. La circularité peut se définir à différentes échelles de l'exploitation agricole au monde mais la dimension territoriale (échelles inter exploitation, bassin de production, bassin de vie) est déterminante pour la connaissance et la mobilisation des ressources disponibles. Elle l'est aussi

⁴⁷ La commission européenne a adopté une stratégie pour la bioéconomie en 2012. La stratégie nationale française sur la bioéconomie date de 2017 et intègre toutes les sources de biomasses (filières agricoles, forestières, marines et aquacoles) les usages alimentaires et non alimentaires.

pour le développement de projets alimentaires territoriaux (PAT)⁴⁸. Elle pose la question de la diversité des territoires (il n'y a pas de solution unique applicable partout), celles de la valorisation de la diversité des systèmes d'élevage et celle de la gouvernance pour la mise en œuvre de tels systèmes.

3.3. Repenser les voies de progrès pour l'élevage

La prise en compte d'un périmètre plus large considérant l'élevage comme un des éléments d'une bioéconomie circulaire ouvre de nouvelles perspectives de progrès en complément des pistes déjà explorées et qui doivent continuer de l'être.

3.3.1. Repenser l'amélioration des systèmes d'élevage et des animaux

Le développement de système agri-alimentaires circulaires et durables ne peut s'envisager sans un élevage lui-même multiperformant, apportant des réponses aux enjeux définis dans la figure 1. Dans cet objectif, les recherches conduites à l'INRAE et que nous priorisons dans le cadre de la prospective⁴⁹ doivent avoir pour ambition de :

- Développer un élevage « climato intelligent » et assurant la pérennité des ressources. L'élevage est mis sous tension par ses émissions de GES et l'usage des ressources et en même temps il est victime du réchauffement climatique. Dans ce contexte il faut se donner l'ambition d'aller vers un élevage efficient, peu impactant sur le climat (voire carbone neutre), résilient au changement climatique et assurant la pérennité des ressources par la limitation des émissions (ammoniac, nitrate) et en participant à la restauration des milieux et de la fertilité des sols. La recherche doit permettre de desserrer cet étau en travaillant les aspects au niveau de l'animal, des systèmes, des filières et des outils de politiques publiques tout en contribuant à réduire simultanément les. Dans le cas des ruminants, le développement des pratiques de mitigation ne suffira pas du fait de la difficulté à réduire fortement le méthane entérique qui représente la moitié des émissions du secteur et il faudra développer et évaluer des pratiques de stockage de C (prairies, agroforesterie, cultures intercalaires) et pour tous les élevage la production d'énergie à partir des effluents reste une voie à explorer.
- Mette le bien-être et la santé des animaux et de l'homme au cœur des préoccupations pour la conception de systèmes d'élevage respectant les animaux et les hommes⁵⁰, améliorant la qualité de vie des éleveurs et réduisant le risque de développement de résistance aux antibiotiques⁵¹ dans un monde où santé animale et santé humaine sont liées⁵² et où l'homme et l'animal partagent une même pharmacopée en terme d'antibiotiques. Pour cela, il faut dépasser l'approche classique qui considèrerait la santé et le bien être à la marge du système d'élevage pour considérer santé et bien-être comme une performance clé dans la conception de système d'élevage durables sans oublier l'exigence d'efficience globale. L'amélioration des conditions de vie des animaux et la prévention des maladies plutôt que leur traitement devient la priorité. Ces enjeux doivent être travaillés aux échelle de l'animal, des écosystèmes microbiens, des systèmes de production et de la filière. Un des enjeux sera de gérer les

⁴⁸ L'article 39 de la loi d'avenir pour l'agriculture (13/10/14), l'alimentation et la forêt introduit la notion de projet alimentaire territorial

⁴⁹ Rappelons que la prospective n'a pas vocation à couvrir toutes les recherches conduites en élevage à INRAE

⁵⁰ En Mai 2017, le concept « Un seul bien-être » (One Welfare) a été lancé pour souligner les liens entre bien-être animal et bien-être humain et reconnaître que tous deux dépendent d'un bon état écologique de l'environnement.

⁵¹ O'Neill J et al. 2016. Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations. Report for the UK government, 84 p

⁵² En 2015, l'OMS a adopté un plan pour combattre la résistance aux antibiotiques sous le concept de « one world, one Health ». En Juin 2017 la commission Européenne a adopté un nouveau plan d'action contre l'antibiorésistance et la France a lancé le plan Ecoantibio 1 puis 2.

tensions qui peuvent apparaître entre amélioration du bien-être des animaux et impact environnemental des systèmes.

- Etudier et valoriser la diversité à différents niveaux d'organisation. L'élevage recouvre une diversité systèmes de production en Europe et tout particulièrement en France⁵³ pour les ruminants du fait de l'importance de la SAU nationale, de la diversité des territoires, de choix d'éleveurs et de l'engagement des consommateurs pour une variété de produits. La question de la diversité n'a été que partiellement abordée (sauf à GA et SAD) et doit devenir un objet d'étude central dans le cadre de l'Agro-écologie pour aborder les questions traitant de la durabilité et résilience des systèmes de production et des filières, de la fourniture de services au côté de biens alimentaires et des compromis entre toutes ces fonctions. Ceci conduit à une évolution du paradigme de la recherche dans toutes les disciplines pour comprendre les intérêts et les limites de la diversité/diversification et aider à son pilotage (phénotypes animaux, itinéraires techniques, comportements). Par ailleurs, les prix souvent bas et variables des produits animaux et les crises sanitaires invitent à revenir sur la question des modèles de production et lien avec celle de l'organisation des filières et des marchés pour éclairer la question des économies de taille, de gamme et des effets d'agglomération et analyser comment se saisir des préférences des consommateurs pour mieux orienter la construction de la qualité des produits de l'élevage au sein des filières et en ciblant au mieux leurs débouchés.
- Repenser l'évaluation des systèmes d'élevage. Bien que l'ACV soit une approche analytique reconnue et utile, elle présente certaines faiblesses lorsqu'elle est appliquée aux systèmes alimentaires. Basée sur la réduction d'impacts par unité de produit, elle conduit à une perspective étriquée des systèmes agricoles et favorise les systèmes intensifs au détriment de systèmes plus agro-écologiques. Elle ne reflète pas certains aspects essentiels à la production alimentaire durable à long terme tels que la fertilité des sols, leur érosion, les impacts sur la biodiversité (par ex le rôle des prairies humides), etc.⁵⁴ et elle ne capture pas certaines propriétés importantes qui émergent au niveau du paysage. La spatialisation de l'ACV reste aussi un enjeu méthodologique. Le concept de bouquet de service appliqué à l'élevage⁵⁵ permet de réarticuler l'ensemble des performances, de pointer des synergies et des antagonismes et au final de gérer les compromis en rendant visibles les arbitrages. Les bouquets intègrent les services environnementaux (flux de matière, changement climatique, biodiversité, qualité des sols, des habitats et des milieux) mais aussi les contributions de l'élevage à la santé humaine et animale, à l'emploi et aux valeurs patrimoniales (savoir-faire, paysages, tourisme, souffrance animale, etc.) couvrant ainsi les objectifs de la figure 1. Il faut analyser simultanée tous ces effets de l'élevage qu'ils soient positifs ou négatifs (disservices), qu'ils relèvent de processus écosystémiques, biogéochimiques ou sociaux et qu'ils affectent l'état de la nature ou de la société, sur place et immédiatement ou à plus ou moins longue distance dans le temps et dans l'espace. L'évaluation des services et de leur évolution se

⁵³ Détang-Dessendré C., Georget M., Guyomard H., Huyghe C., Peyraud J. L., Reboud X., ... Théron O., 2018. Diversité des agricultures : des recherches pour des agricultures diverses et/ou une question pour la recherche. *Innovations Agronomiques*, 68(10/2018), 1-17

⁵⁴ van der Werf H.M.G., Knudsen M.T., Cederberg C. 2020. Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. *Nat Sustain* <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0489-6>

Notarnicola B., Sala S., Anton A., McLaren S.J., Saouter E., Sonesson U. 2017. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *J. Cleaner Prod.* 140. 399-409.

⁵⁵ Ryschawy, J., Disenhaus, C., Bertrand, S., Allaire, G., Aznar, O., Plantureux, S., Josien, E., Guinot, C., Lasseur, J., Perrot, C. and Tchakerian, E., 2017. Assessing multiple goods and services derived from livestock farming on a nation-wide gradient. *animal*, 11(10), pp.1861-1872

J. Ryschawy J., Dumont B., Therond O., Donnars C., Hendrickson J., Benoit M., Duru M., 2019. Review: An integrated graphical tool for analysing impacts and services provided by livestock farming. *Animal*, 1-13 doi:10.1017/S1751731119000351

confronte à la distinction entre services marchands et non marchands, qui est essentielle pour l'analyse économique et la définition de politiques publiques⁵⁶.

3.3.2. Repenser les liens entre élevage, production végétale et territoires

L'élevage est un nœud dans le recyclage des nutriments et des biomasses dans une vision agro-écologique et d'économie circulaire. La reconnexion des productions végétales et de l'élevage au sein d'exploitation (polyculture élevage) mais aussi, au-delà de l'exploitation, au sein des territoires et même entre territoires est une option à priori prometteuse pour surmonter les déséquilibres agronomiques et écologiques apparus avec l'intensification et la spécialisation des systèmes et de territoires entiers. L'élevage a un rôle majeur à jour dans le cadre d'une agriculture circulaire qui vise à réduire les pertes

De nouvelles opportunités pour la place de l'élevage dans une agriculture plus agro-écologique

- Re-coupler l'élevage et la production végétale est essentiel pour l'amplification des approches agro-écologiques. Ce re-couplage doit contribuer à une agriculture assurant le recyclage des éléments nutritifs, plus efficiente globalement et moins consommatrice d'énergie fossile et de produits chimiques, plus autonome en protéines, assurant la fertilité des sols, entretenant la biodiversité, valorisant les paysages et offrant des opportunités de développement de circuits alimentaires locaux. Ce re-couplage concerne la valorisation optimisée des effluents pour réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse et entretenir le stock de matière organique du sol (initiative 4p1000). Il concerne aussi l'utilisation de l'aptitude bien plus grande des animaux que celle des hommes à valoriser une grande diversité de biomasses (fourrages, cultures intermédiaires et pérennes, résidus de cultures, etc.) pour diversifier les rotations et les assolements avec des bénéfices escomptés sur la rupture des cycles de développement des ravageurs et des espèces invasives limitant ainsi l'usage des pesticides. L'usage des pesticides est ainsi plus faible et diminue plus rapidement dans les fermes Ecophyto en polyculture élevage (avec des ruminants) que celles spécialisées en cultures⁵⁷. Cette diversification contribue aussi à l'accroissement de la biodiversité cultivée, à la limitation des cultures dédiées à l'alimentation animale et plus généralement à l'amplification des approches agro-écologiques. L'échelle et les modalités du re-couplage peuvent être très variables depuis le niveau de l'exploitation, d'échanges entre exploitations voisines jusqu'aux échanges entre territoires (par ex le transfert d'effluents d'élevage hygiénisés, désodorisés et séchés entre territoires d'élevages et de zones céréalières). De manière plus disruptive, la réintroduction de l'élevage dans des territoires où il a disparu, voire l'utilisation de l'élevage comme outil d'entretien de couverts herbacés et de lutte contre les parasites sous vignes et vergers sont à considérer. Le re-couplage présente un intérêt tout particulier dans le cadre du développement de l'agriculture biologique où l'élevage fournit des engrais organiques et où il peut bénéficier en retour d'aliments locaux certifiés bio à prix intéressant.
- Considérer expressément les services rendus par l'élevage. Les fonctions de l'élevage au sein des territoires vont bien au-delà des échanges cultures-élevage. Hormis le recyclage des éléments, l'élevage produit de nombreux autres services tels que la gestion de paysages, des services culturels et offre des opportunités de développement de circuits alimentaires locaux, par exemple dans le cadre de l'agriculture périurbaine. Cette reconnexion élevage-culture-

⁵⁶ Sommerville, M.M., Milner-Gulland, E.J., Jones, J.P.G., 2011. The challenge of monitoring biodiversity in payment for environmental service interventions. *Biological Conservation*. 144, 2832-2841

⁵⁷ Chartier N., Tresch P., Munier-Jolain N., Mischler P. 2015. Utilisation des Produits Phytosanitaires dans les systèmes de Polyculture-élevage et de Grandes Cultures : analyse des données du réseau DEPHY ECOPHYTO. *Renc. Rech. Rum.*, 22, 57-60.

territoire présente un intérêt tout particulier dans le cadre du développement de l'agriculture biologique⁵⁸ où, pour les agriculteurs, elle leur fournit des engrais biologiques bon marché et leur offre la possibilité de diversifier leurs systèmes de culture afin de réduire les problèmes de ravageurs; et pour les éleveurs, elle leur fournit des aliments locaux habituellement meilleur marché que ceux fournis par les fournisseurs traditionnels en associant production biologique et production territorialisée qui sont deux signes de qualité recherchés par les consommateurs.

3.3.3. Repenser les liens entre élevage, transformation et consommation des produits animaux

La reconnexion entre élevage, filière et consommateur au sein de systèmes agri-alimentaires plus durables nécessite un changement de paradigme pour les recherches sur la qualité des produits animaux afin de créer de la valeur en réponse aux attentes sociétales ; ce qui concerne non seulement la qualité intrinsèque des produits (nutrition, saveur, sanitaire, aptitudes pour la transformation) mais aussi leur qualité extrinsèque (liées aux modes de production) auxquelles les consommateurs sont de plus en plus sensibles. Les aliments sont porteurs de valeurs. S'il y a toujours nécessité de mieux comprendre les processus biologiques et moléculaires d'élaboration de la qualité intrinsèque des produits afin de la maîtriser, la prédire ou l'améliorer en interaction avec la technologie de transformation, les recherches doivent s'inscrire dans des approches plus globales et avoir pour ambition de

- Renforcer la maîtrise de la composition du produit final par une gestion intégrée de l'ensemble de la chaîne alimentaire. Cela recouvre la gestion des microbiotes et la compréhension des trajectoires de la colonisation des produits depuis le sol, à l'aliment pour animal, les bâtiments, l'animal et son produit et les étapes après la sortie de ferme. Cette connaissance permettrait de limiter le risque de présence d'une microflore indésirable, les risques pouvant s'accroître avec de nouvelles pratiques d'élevage où les animaux ont accès à l'extérieur, de développer les flores utiles pour éviter des traitements thermiques trop poussés pouvant dégrader des composés présents dans le produit natif (cas du lait notamment). Cela concerne aussi la manière dont les (micro)-nutriments circulent dans la chaîne alimentaire pour enrichir naturellement les produits de l'élevage.
- Evaluer l'effet des systèmes de production plus agro-écologiques sur la qualité des produits et sa variabilité dans ces différentes dimensions ce qui pose la question des conséquences pour la transformation, celle de l'acceptabilité par le consommateur⁵⁹, des synergies ou trade-offs entre les critères de qualité, des conditions d'adoption par les différents acteurs de la chaîne alimentaire de ces systèmes et des outils d'authentification des conditions d'élevage.
- Approfondir l'évaluation de la durabilité de régimes un peu moins riches en produits animaux. Les études sur l'alimentation durable dans les pays développés, quelles qu'elles soient, concluent au besoin de réduire, parfois drastiquement, la consommation de produits animaux, notamment de viande. Mais de nouvelles dimensions de cette durabilité apparaissent et sont d'autant plus importantes à considérer que la consommation de viande serait plus modérée. Elles concernent les apports des autres nutriments clés dont les produits animaux sont les vecteurs exclusifs ou majeurs pour assurer une alimentation nutritionnellement adéquate,

⁵⁸ Programme Ambition Bio 2022.

⁵⁹ Par exemple aujourd'hui l'élevage de l'agneau à l'herbe plutôt qu'au céréales, bien que souhaitable d'un point de vue environnemental, aboutit à des carcasses mal valorisées car ne correspondant pas à l'attente du marché ou des industriels. La production de lait en système herbage conduit à une forte saisonnalité de la production qui ne convient pas à la transformation, notamment pour la production de produits frais.

l'effet rassasiant des protéines animales, la prise en compte d'une vision plus large des services de l'élevage et la variabilité de l'ensemble de ces paramètres selon les modes de production, sans oublier le volet culturel de l'alimentation qui est rarement abordé dans les études.

3.4. Le cadre conceptuel pour développer les innovations nécessaires

Afin de développer de nouvelles manières de produire, nous proposons un cadre de réflexion basé autour principalement des principes de **l'agro-écologie** (dans ses dimensions scientifique et pratique et non sociale) déclinés dans le cadre de l'élevage et qui sont renforcés par ceux de **l'économie circulaire** qui sont complémentaires pour produire avec moins d'intrants⁶⁰ ; par les progrès permis par les nouvelles **(bio)technologies et les outils numériques** qui viennent en appui aux démarches précédentes et enfin par **gouvernance du secteur** et la participation des acteurs qui est un facteur clé pour le développement des approches agro-écologiques et de circularité.

3.4.1. Le levier de l'agro-écologie et de l'économie circulaire

Le développement de systèmes d'élevage basés sur les principes de l'agro-écologie s'appuie sur la recherche et le renforcement des synergies entre les composantes du système, dont l'animal lui-même, ainsi que sur l'organisation spatiotemporelle des cycles biologiques favorisant une utilisation plus efficiente des ressources. Il s'agit d'utiliser de manière intensive les processus biologiques, leurs interactions et la biodiversité domestique à tous les niveaux d'organisation (animaux, troupeaux, sols, systèmes de production, bassin de production) en visant une utilisation optimale des possibilités offertes par les agrosystèmes en substitution aux intrants chimiques⁶¹. L'économie circulaire explore quant à elle les possibilités de bouclage des cycles de matière et d'énergie dans une démarche souvent trans-sectorielle et des systèmes se composant d'unités de production très contrôlées⁶². L'économie circulaire se distingue de l'agro-écologie par un lien au sol beaucoup plus faible et c'est cette intensité du lien au sol qui détermine le niveau d'articulation entre les leviers de l'économie circulaire et ceux de l'agroécologie⁶³. L'Agro-écologie et l'économie circulaire sont complémentaires pour produire avec moins d'intrants⁶⁴

Le lien au sol est un point central pour l'élevage en agro-écologie et de fait le pâturage des herbivores paraît en première approche une pratique plus en accord avec l'agro-écologie que l'élevage dit « hors-sol ». Mais les questions agro-écologiques posées par les différents types d'élevage (hors sol, semi plein air, pâturage, monogastriques, ruminants) sont de même nature (par ex recherche d'animaux plus robustes) même si des aspects techniques les distinguent (la robustesse ne revêt pas les mêmes attributs en production de volaille ou en lait) clairement et d'ailleurs un cycle d'élevage peut associer différents types de conduite. Par exemple en élevage bovins viande, la finition des veaux à l'engraissement se fait souvent en bâtiment alors que les vaches allaitantes et leurs jeunes veaux sont

⁶⁰ Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M., Tichit M. 2013. Prospects from agro-ecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal* 7:6,1028–1043

⁶¹ INRA, 2012. Rapport du chantier Agro-écologie, 107pp

INRA, 2019. Rapport de la prospective Agroécologie

⁶² Froesch R.A., Gallopoulos N.E., 1989. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261, 144-152

⁶³ De fait les acteurs des filières de monogastriques se reconnaissent souvent plus dans des démarches d'économie circulaire que d'agro-écologie.

⁶⁴ Thomas M., Fortun-Lamotte L., Jouvin M., Tichit M., Gonzales-Garcia E., Dourmad J.Y., Dumont B., 2014. Agro-écologie et écologie industrielle : deux alternatives complémentaires pour les systèmes d'élevage de demain. In : Numéro spécial, Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ? Ingrand S., Baumont R. (Eds). INRA Prod. Anim., 27, 89-100

au pâturage ; en aviculture (oie fermière, canard gras, poulet de Bresse, ...), une phase de finition courte en bâtiment succède souvent à l'élevage en prairie.

La mise en œuvre de pratiques agro-écologiques et d'économie circulaire renouvellent en profondeur les questions de recherche. L'agro-écologie amène à (i) Considérer le temps long en privilégiant les capacités d'adaptation des animaux au cours de la carrière et non plus la production maximale à court terme ce qui était souvent l'objectif des recherches par le passé ; (ii) modifier la relation au risque et à penser la diversification des productions (potentielles économies de gamme) et des systèmes au sein d'un territoire et la mobilisation de leviers de nature structurelle (par ex association culture-élevage...) pour faire face à l'accroissement de la dépendance aux conditions du milieu et à la sensibilité aux aléas (climatiques et sanitaires) par rapport aux systèmes conventionnels qui cherchaient à contrôler les fluctuations environnementales ; (iii) aborder la question des bouquets de services/disservices rendus par l'élevage au développement durable des territoires et des filières et (iv) développer de nouveaux outils et indicateurs d'état pour gérer des systèmes plus complexes et pour gérer les phases de transition mais aussi développer de nouveaux dispositifs de formation et de conseil. Le développement de l'économie circulaire permet pour sa part (i) de réexaminer la capacité des animaux à recycler, dans la chaîne alimentaire, les biomasses non directement comestibles par l'Homme ; (ii) à reconsidérer les différents usages des effluents d'élevage et des coproduits des animaux et (iii) à emboîter des approches à différentes échelles spatiales interne dans des exploitations ayant plusieurs ateliers de production, entre exploitations voisines, entre territoires voisins, entre bassins de production (ex : entre zones d'élevage et de cultures annuelles), voire entre pays.

Les approches agro-écologiques en élevage se rapportent à trois domaines principaux :

- La recherche d'animaux plus efficaces et capables de faire face à des conditions de productions variables sans nuire à la qualité des produits ce qui implique une nouvelle approche en biologie animale en passant d'une vision à court terme de l'animal à l'intégration des fenêtres temporelles sur le même individu et entre générations (**GT2, 3**). Cela permettra de pouvoir évaluer et comprendre la capacité de l'animal à gérer les perturbations (réaction et récupération voire évolution), d'étudier l'allocation des ressources et la flexibilité de cette allocation pour acquérir un mécanisme de résilience et maximiser l'efficacité au cours de la vie. À l'aide de ces connaissances, les objectifs de sélection animale doivent prendre en compte à l'avenir les interactions génotype-environnement dans la prévision des valeurs de reproduction des individus, ce qui constitue un défi de taille.
- L'optimisation du « métabolisme » des agro-écosystèmes associant l'élevage. Cela comprend notamment à (i) la gestion intégrée de la santé et du bien-être des animaux, également liés à la santé et au bien-être de l'homme et à la santé de l'écosystème (**GT2, 3, 4**) ; (ii) la recherche d'une plus grande autonomie alimentaire, la réduction des émissions (principalement des GES) et l'optimisation du recyclage des éléments nutritifs (N, P, C) (**GT5, 6**) ainsi que la contribution accrue de l'élevage à la fourniture de services environnementaux (**GT 8**) ; (iii) la gestion des microbiomes tout au long de la chaîne de production du sol au produit animal pour la maîtrise de la santé et de la qualité des produits (**GT4, 7**), et (iv) la coexistence de différents systèmes d'élevage et d'alimentation sur un territoire et l'organisation spatiale et temporelle de la mosaïque paysagère (**GT9**). L'évaluation environnementale de ces systèmes nécessite un examen des méthodes d'évaluation multicritère dont l'ACV (**GT8**).
- La gestion, utilisation et préservation de la biodiversité. Cela qui concerne (i) l'utilisation et la gestion appropriée des ressources génétiques animales et la mobilisation des connaissances sur les interactions génotype x conduite x environnement (**GT3, 9**) ; (ii) la valorisation de plantes présentant des caractères d'intérêt dont les légumineuses contribuant à l'autonomie

en azote et en protéines et susceptibles de contribuer à la santé animale grâce à certains de leurs métaboliques secondaires (**GT4, 5**) ; (iii) la préservation de la biodiversité végétale et des habitats par des pratiques d'élevage adaptées (**GT5**) afin de maintenir des services de régulation (pollinisation...) ou culturels et sociaux et la valorisation de la biodiversité sauvage pour l'élaboration de produits typés et (iv) la gestion spatio-temporelle de la diversité des ressources (végétales et animales) pour renforcer la résilience des systèmes (**GT9**).

Les approches d'économie circulaire en élevage se rapportent à deux domaines principaux :

- Utilisation de l'aptitude des animaux à valoriser des biomasses variées. La pleine exploitation de la capacité des animaux à valoriser une grande diversité de biomasses non directement comestibles par l'homme et qui vont se développer dans le cadre de la diversification des rotations ou par la valorisation de résidus (insectes, vers de terre) ou des ressources aquatiques (algues) ou encore demain de nouveaux coproduits issus des biotechnologies vertes présente un potentiel important pour accroître l'efficacité globale de la production agricole, produire des services environnementaux et limiter l'utilisation des ressources (**GT5**). Ces utilisations renouvellent les questions sur l'alimentation des troupeaux, et posent la question de l'évaluation environnementale (**GT8**) et sanitaire de ces nouvelles filières, de leur gouvernance (**GT1**), et du volet juridique qui sont autant de freins à analyser.
- Valorisation des coproduits de l'élevage et valorisation non alimentaire des produits animaux. Si la gestion des effluents par retour au sol direct relève de l'agro-écologie, d'autres utilisations relèvent de l'économie circulaire. C'est le cas de la (i) production de biogaz ou de l'extraction de molécules d'intérêt pour l'industrie chimique à partir des lisiers mais qui pose la question de la valorisation des coproduits et du retour du C et de l'azote au sol, (ii) la production de compost pouvant être transféré des territoires d'élevage vers des zones de grande culture ou encore (iii) le développement de nouvelles technologies pour réutiliser l'azote et le phosphore sous forme d'engrais normalisés après extraction (**GT6**). De nouveaux développements (extractions de protéines avec diverses propriétés biologiques et fonctionnelles) sont aussi possibles pour dégager de la valeur ajoutée à partir du cinquième quartier des carcasses (**GT7**) ou pour la production de molécules d'intérêt thérapeutique à partir des œufs ou du lait.

3.4.2. Le levier de l'innovation technologique

Les innovations technologiques dans les domaines des biotechnologies, du numérique et des procédés industriels peuvent et doivent contribuer aux approches agroécologiques et d'économie circulaire⁶⁵ et à l'économie circulaire. L'utilisation combinée de ces diverses approches biologiques et technologiques est innovante et est de nature à contribuer à produire de nouvelles connaissances et de nouveaux moyens de pilotage des systèmes.

- Les avancées des biotechnologies doivent permettre des progrès pour disposer d'animaux plus robustes, plus adaptables et efficaces et des produits aux qualités améliorées. Les connaissances sur le génome et les approches de phénotypage à haut débit⁶⁶ (**GT10**) doivent permettre une sélection plus précise sur des caractères d'intérêt socio-économique mais complexes à phénotyper (**GT3**). La maîtrise des microbiomes et des épigénomes d'animaux via la mise en œuvre d'une programmation précoce des individus (in utero, in ovo, pendant la

⁶⁵ Voir notamment le thème 6 de la prospective Agro-écologie à propos des agro-équipements et du numérique

⁶⁶ Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Frappat B., Gonzalez-Garcia E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C.R., Tixier-Boichard M., Brochard M., 2017., Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques. INRA Prod. Anim., 30, 31-46.

période périnatale) devrait permettre de moduler l'expression du génome de manière ciblée pour programmer les phénotypes (**GT2, 3, 4, 7**). La compréhension du rôle des communautés microbiennes et leur gestion doit permettre d'améliorer la santé et le bien être par des approches plus préventives et moins curatives (**GT4**). Conjointement aux techniques classiques, l'édition du génome⁶⁷ pourrait demain accélérer le processus d'introgression (en incorporant des allèles d'intérêt d'une race à une autre. Cette technologie doit être abordée au niveau de la recherche.

- Les nouvelles technologies du numérique (capteurs, robotique, Internet des objets, block-chain) fournissent des outils et concepts innovants pour la gestion de l'élevage grâce à la surveillance continue, automatisée et en temps réel d'un nombre croissant de paramètres sur l'animal (alimentation, reproduction, santé et bien-être...) et son environnement (ambiance, agents pathogènes...). Au-delà de l'exploitation, l'acquisition à grande échelle de données sur les phénotypes d'intérêt combinées à la sélection génomique, doit permettre d'améliorer la précision de la sélection (**GT10, 3, 4**) et le traitement en continu et automatique d'une énorme quantité de données offre de nouvelles possibilités de gestion de la qualité des produits et fournit une base pour la certification et une transparence accrue des relations entre entreprises, ainsi que pour les consommateurs (**GT9, 10**). L'efficacité de ces dispositifs, les conséquences sur les métiers et la rentabilité des investissements doivent être évaluées.
- L'innovation dans les procédés technologiques aideront au développement de la bioéconomie circulaire. Cela comprend le traitement des effluents pour mieux réutiliser l'azote et du phosphore, produire de l'énergie ou des molécules d'intérêt (**GT4**), les procédés permettant d'améliorer la digestibilité d'une grande diversité de biomasse d'origine végétale. Cela comprend aussi des utilisations innovantes de cultures pérennes desquelles on peut extraire des protéines pour nourrir des monogastriques et disposer d'un tourteau valorisable par les ruminants ou la production d'énergie (**GT5**).

3.4.3. Le levier de l'innovation organisationnelle

Les politiques publiques mais aussi la gouvernance et la coopération entre les parties prenantes, les attentes et comportements des consommateurs et la réalité des marchés européens et internationaux sont des éléments essentiels pour orienter les pratiques et mettre en œuvre de systèmes agro-alimentaires plus durables. La transition vers ces nouveaux systèmes nécessite que les nouvelles perspectives soient partagées et que de nouveaux partenariats, nouveaux modèles économiques et nouvelles organisations sociales soient mises en œuvre. Les parties prenantes doivent être impliquées dans les processus d'innovation et contribuer à la prise de décision⁶⁸.

Les principaux enjeux de recherche concernent surtout le **GT1**:

- La place des produits animaux dans nos régimes. Une meilleure connaissance des différentes trajectoire de consommation de produits animaux en France et dans le monde et les dynamiques motivations qui les sous-tendent doivent permettre d'affiner les modèles globaux des systèmes agricoles, ainsi que des modèles plus localisés, nécessaires à l'évaluation ex-ante de politiques européennes, nationales ou régionales⁶⁹. Ces travaux sont à l'interface entre la

⁶⁷ Elle est aujourd'hui interdite en Europe. Elle n'est donc mentionnée que pour mémoire.

⁶⁸ L'association de ce levier avec le premier sur les pratiques agro-écologiques peut être considérée comme une représentation de ce qu'il est parfois appelé « strong agro-écologie »

⁶⁹ . Les modèles globaux de long terme visent à explorer différents scénarios démographiques et climatiques sur la disponibilité alimentaire comme condition nécessaire de la sécurité alimentaire globale et par grandes régions du monde. Les modèles de plus court terme globaux ou régionaux incorporent les comportements des producteurs des consommateurs et des Etats en fonction des prix et des politiques. Ils

prospective Elevage et la prospective « Nexus santé ». Les effets nutritionnels et sur l'environnement de nos régimes restent également à mieux préciser en développant des approches intégrées.

- L'analyse des controverses et des politiques publiques favorisant la prise en compte des enjeux environnementaux et sanitaires liés à l'élevage et aidant à la transition agro-écologique. Les questions de recherche concernent la manière dont le débat public se structure autour de l'élevage, la compréhension des processus de décisions et l'analyse des effets des dispositifs et instruments de régulation mis en œuvre (paiement pour services environnementaux, autres incitations, taxes et réglementations) sont des priorités pour les recherches
- La question des modèles d'élevage et des systèmes agri-alimentaires. Les prix bas et variables des produits animaux à la ferme et les crises sanitaires invitent à revenir sur la question des modèles de production et lien avec celle de l'organisation des filières et des marchés. La compréhension de la structuration des filières, de la répartition de la valeur (économie de taille, de gamme, d'agglomération, de segmentation à partir d'une meilleure connaissance des débouchés), la compréhension des stratégies des acteurs économiques et la coexistence et hybridation entre systèmes dominants et systèmes alternatifs pour répondre à différentes demandes des consommateurs, sont des questions qui deviennent centrales. La taille des exploitations s'agrandit ce qui ne facilite pas la mise en œuvre de pratiques agro-écologiques sauf à repenser les collectifs de travail et l'organisation des parcellaires.
- La coordination entre les acteurs au sein des territoires est centrale pour le développement de pratiques agro-écologiques, de la circularité avec de nouvelles chaînes de valeur, pour la meilleure répartition de l'élevage dans les territoires, sa réintroduction là où il a disparu et l'organisation des échanges. La coopération, à l'échelle du territoire, entre les acteurs économiques, les intervenants en élevage et les autres parties prenantes (riverains, élus locaux, associations) sont autant de questions essentielles à l'intégration de l'élevage dans la bioéconomie circulaire territoriale.

4. Les priorités scientifiques et nouveaux fronts de science et technologiques

4.1. Présentation synoptique des priorités de recherche en élevage

Pour répondre aux enjeux de l'élevage, quatre priorités scientifiques ont été définies (à partir des réflexions des 10 groupes thématiques (GT) (tableau 1). Ces priorités sont interdépendantes. Elles mettent en avant les ruptures thématiques et méthodologiques à envisager et les nouveaux fronts de science à développer pour contribuer à inscrire l'élevage comme contributeur au développement de systèmes agri-alimentaires durables. On peut noter que bon nombre de travaux conduits dans les départements de sciences animales de l'INRA, trouvent naturellement leur place dans cette vision, notamment au sein de la priorité 3.

La priorité 1 représente en quelque sorte la finalité qui consiste à créer de la valeur et à l'évaluer en réponses aux différentes attentes des filières et sociétales ce qui nécessite de bien gérer les biomasses

visent à approcher la sécurité alimentaire et nutritionnelle réelle en fonction par exemple des inégalités de revenu et de la qualité des institutions.

(priorité 2) et d'adapter les animaux et les systèmes d'élevage pour qu'ils deviennent multiperformants (priorité 3). Le numérique est central dans la démarche de progrès et doit irriguer les autres priorités

Tableau 1. Les quatre priorités scientifiques et les enjeux de recherche associées issus des réflexions des 10 groupes thématiques.

Priorité scientifique	Enjeu des recherches	GT
1. Développer des élevages créateurs de valeurs et répondant aux attentes sociétales	Comprendre les enjeux qui se nouent autour de l'élevage et dans quelle mesure les différents modes d'élevage peuvent contribuer à rendre une diversité de services pour la société (économique, environnementaux, alimentaires, culturels, patrimoniaux) en fonction des territoires et de leur spécificité ⁷⁰	1, 7, 8, 9
2. Utiliser l'aptitude des animaux à valoriser des biomasses diverses pour développer une agriculture agro-écologique bouclant les cycles de nutriments	Accroître l'efficacité d'utilisation des biomasses végétales, particulièrement celles non consommées par l'Homme, tout en limitant les pertes, en améliorant la qualité des sols et en réduisant les intrants et l'usage des ressources non renouvelables	5, 6
3. Améliorer les aptitudes des animaux et proposer des systèmes d'élevage durables	Disposer de systèmes d'élevage conçus autour du bien-être et de la santé des animaux, climato intelligents et réduisant au minimum (quasi suppression) l'usage des intrants médicamenteux, et disposer d'une diversité d'animaux plus efficaces et robustes, adaptés à des conditions d'élevage variées et produisant des produits adaptés à la demande	2, 3, 4, 5, 7
4. Faire entrer l'élevage dans l'ère du numérique	Étudier comment des évolutions (techniques, organisationnelles) permises par l'émergence du numérique et de la massification des données permettent de mieux répondre aux attentes des éleveurs, des consommateurs et des citoyens vis-à-vis des trois premières priorités	10

GT1 : Compréhension des enjeux sociétaux et économiques qui se jouent autour de l'élevage ; GT2 : Elaboration précoce des phénotypes des animaux et des caractères de production ; GT3 : Compréhension des régulations chez l'animal en production ; GT4 : Gestion intégrée de la santé et du Bien-être animal ; GT5 : L'élevage pour valoriser des ressources alimentaires variées dans un contexte de changement climatique ; GT6 : Gestion des effluents de l'élevage ; GT7 : Qualité des produits et des coproduits animaux ; GT8 : Les bouquets de services de l'élevage ; GT9 : Valorisation de la diversité à différents niveaux d'organisation ; GT10 : L'élevage à l'ère du numérique

- La priorité 1 ouvre sur les SHS et sur la place de l'élevage et des produits animaux dans l'alimentation et concerne la caractérisation des enjeux autour de l'élevage, l'élaboration de scénarii d'évolution de l'élevage, la production de services et les rôles de la diversité et diversification des modes d'élevage et des produits. Elle est liée à la priorité 2 car la gestion des biomasses végétales et d'effluents concourt à la production de services et à la réduction des disservices. Elle est liée à la priorité 3 car les services dépendront des performances des systèmes d'élevage et en retour ces systèmes évoluent sous l'effet des signaux qualifiés par la priorité 1. La qualité des produits (GT7) est un des services de l'élevage et la diversité des animaux (GT9) est le matériel de base pour l'amélioration génétique.
- La priorité 2 ouvre vers les sciences du végétal et de l'environnement (notamment le département EA) et est entrée sur l'efficacité d'utilisation des biomasses végétales et des effluents. Elle est liée à la priorité 3 car pour boucler les cycles et réduire les émissions il faut

⁷⁰ La question des transitions vers les systèmes d'élevage agro-écologiques a été abordée dans la prospective Agro-écologie et le croisement était assuré par P Dupraz qui a participé aux GT concernés des 2ARP.

disposer d'animaux efficients et de conduites d'élevage adaptées. Elle participe aussi directement à la priorité 1 (voir ci-dessus).

- La priorité 3 correspond à des thèmes classiquement abordés par les départements animaux mais en élargissant les approches vers la dimension « one health » et la prise en compte plus explicite du changement climatique. LA PROSPECTIVE privilégie les approches interdisciplinaires larges mais les autres travaux conduits dans les départements animaux trouvent naturellement leur place dans cette priorité. Elle est très liée à la priorité 2 pour l'élaboration de systèmes climato-intelligents, réduisant leur impact environnemental local et la gestion optimisée des biomasses renvoie à des questions de conduites d'élevage adaptées. La gestion intégrée de la santé et du bien-être (GT4) requiert des animaux adaptés (GT2, 3) et l'élaboration de la qualité des produits dépend des animaux et de leur conduite (GT2, 3, 4).
- La priorité 4 fournit de nouveaux outils de phénotypage et de gestion des systèmes d'élevage (priorité 3), de gestion des flux (priorité 2) et le développement d'outils numériques pour la traçabilité sera de nature à répondre aux attentes du consommateur citoyen (priorité 1).

4.2. Fronts de science des 4 priorités

La prospective a cherché à mettre en lumière les ruptures thématiques et méthodologiques à envisager et les nouveaux fronts de sciences à développer pour contribuer à inscrire l'élevage comme contributeur au développement de systèmes agri-alimentaires durables. Nous insistons ici sur les points saillants, le détail du contexte, des enjeux de recherche et des priorités de recherches est donné dans les rapports détaillés des 10 groupes de travail. Le tableau 2 résume les principales questions de recherches.

Tableau 2. Objectifs des recherches* au sein des quatre priorités scientifiques

Priorité scientifique	Objectifs des recherche, fronts de sciences et technologiques
1. Développer des élevages créateurs de valeurs et répondant aux attentes sociétales	a. Comprendre les enjeux sociétaux et économiques qui se nouent autour de l'élevage b. Eclairer le débat économique et sociétal sur l'élevage par l'élaboration et l'évaluation de scénarii contrastés c. Evaluer les systèmes d'élevage pour les faire progresser d. Valoriser la diversité pour développer un élevage multiperformants
2. Utiliser l'aptitude des animaux à valoriser des biomasses diverses pour développer une agriculture agro-écologique bouclant les cycles de nutriments	a. Mobiliser par l'élevage des gisements de biomasse et de protéines non comestibles par l'Homme b. Gérer les effluents d'élevage pour boucler les cycles de nutriments et produire des services c. Réduire les émissions de méthane des ruminants
3. Améliorer les aptitudes des animaux et proposer des systèmes d'élevage durables	a. Développer les capacités d'adaptation des animaux b. Développer des systèmes d'élevage autour du bien-être, de la santé et climato-intelligents c. Améliorer la qualité des (co)-produits animaux et innover dans leur valorisation
4. Faire entrer l'élevage dans l'ère du numérique	a. Utiliser les technologies du numérique en élevage b. Utiliser les technologies du numérique pour acquérir des connaissances

* : Les fronts de sciences et les fronts méthodologiques sont détaillés dans le texte à suivre

4.2.1. Développer des élevages créateurs de valeurs et répondant aux attentes sociétales

Quatre domaines de recherche ont été identifiés.

a. Comprendre les enjeux sociétaux et économiques qui se nouent autour de l'élevage

Les divergences fortes entre les attentes sociétales et les déterminants de la rentabilité des élevages d'une part, et entre le soutien public à l'élevage et ses effets environnementaux et sociaux d'autre part, posent des questions de recherche nouvelles.

- Analyser les conséquences d'un alignement des politiques publiques avec les objectifs de santé publique. L'application des principes d'économie publique à l'élevage et aux produits animaux conduiraient à des politiques très éloignées de celles qui sont actuellement en place telles que la taxation des émissions de GES (donc des élevages, notamment de ruminants et des engrais minéraux) plutôt qu'aides publiques aux ruminants, soutien aux prairies permanentes plutôt qu'aux terres arables, taxation des pesticides plutôt que soutiens à l'agriculture biologique, etc... Il s'agit ici d'explorer comment les systèmes de production et leur localisation peuvent s'adapter à la demande de biens publics globaux et locaux.
- Repenser la place de l'élevage dans la chaîne de valeur Il s'agit de revenir sur les déterminants des revenus des éleveurs en examinant comment ils se saisissent des dérogations au droit à la concurrence (liés à la PAC) en contribuant à la construction de la qualité (intrinsèque et extrinsèque) des produits issus de l'élevage et en ciblant au mieux leurs débouchés. Il s'agit aussi d'analyser le maintien de l'emploi en élevage, l'attractivité des métiers dans les zones rurales et les modes de coopération et de contractualisation entre les différents acteurs concernés pouvant créer de la valeur et des carrières attrayantes et contribuer à la transition vers des modèles d'élevage innovants.
- Connaitre les marchés pour mieux orienter les filières animales. Pour orienter les filières animales il faut mieux connaître les marchés ce qui nécessite de disposer (i) d'une meilleure compréhension et modélisation des demandes en fonction des croissances démographique et économique dans les diverses parties du monde et (ii) une meilleure connaissance des développements possibles des filières animales étrangères et de leur capacité à répondre en quantité et en qualité à ces demandes aussi bien dans leur territoire d'origine qu'au sein de l'UE. La complémentarité entre les agro-carburants et les aliments du bétail reste une question peu intégrée dans les analyses.
- Analyser les déterminants des évolutions structurelles des entreprises (exploitations, industries) et leurs conséquences sur les performances de l'élevage pour éclairer les possibilités d'évolution des systèmes, leur répartition territoriale et leur compétitivité. Il s'agit de revisiter les questions d'économie de taille, de gamme et les effets d'agglomération, l'analyse du rôle de la qualité des produits, de la traçabilité et l'influence des normes privées (e.g., grande distribution) et publiques (mesures non tarifaires, SICO) sur la capacité à conquérir de nouveaux marchés. Il s'agit aussi d'appréhender les implications économiques des différents modes de coordinations verticales et horizontales (intégration, contractualisation, coopératives et organisations de producteurs) en termes de création de valeur et de partage de celle-ci et analyser l'influence des politiques publiques (fiscalité, normes et paiements sanitaires, sociaux et environnementaux) sur l'investissement, la gestion du risque et l'innovation de procédé.

b. Eclairer le débat économique et sociétal sur l'élevage par l'élaboration et l'évaluation de scénarii contrastés

La place des produits animaux dans la diète est une question centrale qui fait l'objet de controverses et il importe d'éclairer le débat sociétal avec des approches holistiques considérant les différentes dimensions.

- Améliorer les modèles d'équilibre globaux qui explorent par grandes régions différents scénarios démographiques et climatiques. L'INRAE doit intensifier ses efforts sur ce type de modélisation car nous sommes absents/pas suffisamment reconnus sur ce niveau d'approche et nous ne sommes pas cosignataires des grandes publications internationales concernant la place de l'élevage dans la sécurité alimentaire mondiale. Les progrès consistent à une prise en compte plus explicite de l'élevage comme cela a été initié dans l'étude récente Agriculture Européenne à l'Horizon 2050⁷¹ ainsi qu'à une meilleure connaissance et utilisation des trajectoires de consommation de produits animaux dans les différentes parties du monde.
- Développer des modèles localisés de métabolisme territorial pour évaluer ex-ante des scénarios d'évolution de l'agriculture en intégrant les effets des pratiques. Ce type de modèle est encore très peu développé à l'INRAE alors qu'il est de nature à éclairer des pistes d'avenir. Cette approche doit permettre la recherche d'optimum à l'échelle d'un territoire (exploitation, une petite région agricole, bassin de production ou région administrative) en entrant par la recherche de nouvelles modalités pour optimiser la production d'un territoire comme par exemple la recherche (i) de valeur ajoutée par passage en agriculture bio, (ii) d'une efficacité maximale dans l'objectif d'une production valorisable à l'export en acceptant un plafond d'impacts environnementaux à ne pas dépasser, (iii) d'organisations territoriales repensées à l'aulne de la circularité entre cultures et élevage (y compris la réintroduction d'élevage) pour mieux répondre aux objectifs que des organisations par filières et quels types de systèmes d'élevage sont alors à privilégier ou (iv) de comparaison entre la valorisation par l'élevage, ou par retour au sol direct ou par la chimie verte de cultures de diversification (dont la prairie) pour perturber les cycles des parasites et des adventices. Ces études doivent prendre en compte (i) la place respective des ruminants et des monogastriques car leurs performances environnementales sont contrastées et ils peuvent être complémentaires ou en compétition selon les territoires et les objectifs et (ii) diversité des territoires en distinguant *a minima* le Grand Ouest fourrager, le Centre spécialisé en céréaliculture, les zones de montagnes humides et les territoires de polyculture élevage.

c. Evaluer les systèmes d'élevage pour les faire progresser

L'enjeu est majeur à un moment où l'élevage est au cœur de nombreuses controverses alimentées par des visions souvent partielles qu'il faut dépasser pour développer des visions plus équilibrées.

- Utiliser les services comme cadre pour la recherche en élevage. L'approche de l'élevage par les bouquets de services, dans leur diversité spatiale et leur évolution vise à décrire ses performances économiques, sociales et environnementales, à comprendre leurs déterminants biologiques, techniques, culturels et économiques et analyser les synergies et les antagonismes entre les performances. Cette approche permettra d'aborder des questions concernant l'évolution des compromis entre les services et dis-services, les relations entre services et résilience des systèmes, l'évaluation de l'élevage dans les approches circulaires territorialisées, l'évaluation des interactions entre élevage et biodiversité à différentes

⁷¹ Agricultures européennes à l'horizon 2050 entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale.
<https://colloque.inra.fr/agriculture-europeenne-2050/inscription2>

échelles et la question de la valorisation de services marchands et non marchands. Toutefois, l'approche par bouquets de service est nouvelle est imparfaitement stabilisée et des apports méthodologiques sont nécessaires concernant (i) l'extension de la notion de services écosystémiques à des notions de dynamisme économique et de bien-être des populations ; (ii) la délimitation du système étudié et des services (diversité des bénéficiaires, réalité des processus, centres de décision économiques et politiques, structure de gouvernance...) afin d'appréhender correctement les interactions entre éléments du système et celles du système avec son environnement et (ii) la construction d'indicateurs et de systèmes d'indicateurs.

- Améliorer l'analyse multicritère par ACV. L'ACV est orientée produit et présente l'avantage de comparer des modes de production en prenant en compte tous le cycle du produit, mais, en ne considérant que les flux entrant et sortant, elle comporte des limites importantes pour prendre en compte les fortes interactions entre produits et activités lorsque l'on veut l'appliquer à des systèmes et à des territoires et prendre en compte des démarches agro-écologiques qui sont toujours en tension entre les impacts globaux qui leur sont peu favorables et les impacts locaux, plus favorables, mais pour lesquels on ne dispose pas toujours d'indicateurs performants. Elle doit progresser sur la prise en compte des dynamiques temporelles et de la spatialisation des effets ainsi que la régionalisation des approches ; (ii) la mobilisation de modèles plus précis pour les phénomènes se déroulant sur un temps long comme la dynamique du C des sols ou la biologie de sols ; (iii) l'inclusion d'indicateurs complémentaires permettant de prendre en compte les services (biodiversité, emplois, culturels, etc.), la qualité nutritionnelle des produits et l'économie. Les approches par les ACV conséquentielles sont riches de perspectives, mais encore insuffisamment développées.

d. Valoriser la diversité pour développer un élevage multiperformant

La diversité des systèmes d'élevage et des produits qui en sont issus sont une caractéristique de notre agriculture qui n'a que très peu été considérée comme un objet de recherche. Dans une logique de développement de système agro-écologique elle devient un objet central. Elle peut s'étudier à différents niveaux mais nous considérons ici la diversité des systèmes, des animaux et des produits.

- Prendre en compte la diversité (et la diversification) des systèmes ouvre de nouveaux fronts de recherche. Ils concernent la caractérisation de la diversité au regard des fonctions attendues, la mise en évidence de ses intérêts et la définition des conditions d'expression de cet intérêt en tant que source d'adaptabilité/de résilience à l'échelle des exploitations, des filières et des territoires et comme source d'efficience et de constance de la production, pour élaborer des services par l'élevage (voir ci-dessous). Ils concernent aussi le pilotage de la diversité en comprenant mieux l'organisation de l'action collective pour ce pilotage, les objectifs et outils de gouvernance, d'action publique pour appuyer et gérer cette diversité. La réintroduction de l'élevage au sein de territoires où il a disparu est une question à fort enjeu. Il est enfin nécessaire de comprendre le rôle de la diversité dans la construction de la transitions agro-écologique en comprenant comment et pourquoi des exploitations ont engagés des modes de gestions valorisant les potentialités écologiques, économiques et sociale d'un territoire.
- Utiliser la diversité des animaux et des produits. Cela concerne l'évolution des schémas de sélection animale pour répondre à une diversité de systèmes, de filières et de territoires ; l'analyse de l'intérêt (complémentarités fonctionnelles) et des limites (concurrence entre types d'animaux) d'une diversité d'animaux au sein des troupeaux en regard de la diversité croissante des ressources. La seconde question concerne l'intérêt et les limites d'une

diversification amont des produits⁷² compte tenu de la connaissance des préférences des consommateurs pour s'en saisir et mieux orienter la construction de la qualité. La compréhension des stratégies des opérateurs des filières face à la diversification de l'offre reste à faire sachant que le verrous financiers, technologiques, logistiques... semblent très importants.

4.2.2. Mieux utiliser l'aptitude des animaux à valoriser des biomasses variées pour une agriculture bouclant les cycles de nutriments.

La question de l'alimentation des animaux et de la gestion des effluents sont des éléments clés pour la recherche d'une éco-efficience accrue des systèmes agri-alimentaires, pour une moindre dépendance aux engrais minéraux et aux protéines importées, pour le développement d'une alimentation locale et sans OGM. Les nouveaux fronts de science concernent trois domaines

a. Mobiliser par l'élevage des gisements de biomasse et de protéines non comestibles par l'Homme

L'élevage peut permettre de valoriser des biomasses produites par la diversification des rotations rendue nécessaire pour limiter l'usage des pesticides et de nouveaux gisements de coproduits peuvent aussi être identifiés⁷³ mais ces nouvelles ressources (nouvelles cultures, co produits industriels, écarts de fruits, nouvelles sources de protéines) seront souvent très variables dans l'espace, dans le temps et en qualité ce qui pose des questions spécifiques.

- *Evaluer les gisements de biomasses végétales valorisables par l'élevage et l'intérêt de leur utilisation.* L'utilisation raisonnée de ces biomasses nécessite le développement de systèmes d'information basés sur des simulateurs permettant d'évaluer la disponibilité et les prix, en tenant compte des compétitions d'usage, des contextes locaux (agronomique, économique, moyens de transports, organisations entre acteurs...) et de la gestion de la sécurité sanitaire. Une seconde question concerne l'évaluation de l'intérêt agronomique et environnemental de la valorisation par l'animal de ces ressources plutôt qu'une utilisation par retour direct au sol ou par d'autres voies (méthanisation, compostage) en particulier dans le cas des inter-cultures et des cultures dérobées selon qu'elles sont exploitées en pâturage ou en stock.
- *Evaluer et améliorer l'aptitude des animaux à valoriser ces biomasses.* Il s'agit de comprendre l'origine des variations interindividuelles d'efficacité (comportement alimentaire, digestion, microbiote) qui seront exacerbées avec ces ressources souvent de moindre qualité, de prédire les performances des troupeaux (production, rejet, santé) en réponse aux variations fréquentes de l'offre alimentaire ce qui est un changement de paradigme par rapport aux approches classiques de nutrition qui visaient à calculer une ration pour un objectif de production donné. Il s'agit aussi de développer de procédés technologiques pour améliorer leur valeur nutritionnelle et sanitaire des biomasses ou diversifier les utilisations (par ex fractionnement des légumineuses fourragères pour leur utilisation en alimentation des porcs).
- *Valoriser de nouvelles sources de protéines en élevage.* La valorisation de protéines d'invertébrés (insectes mais aussi vers de terre – lombricompost) produits par recyclage de biomasses de déchets alimentaires humains ou d'effluents ou de protéines d'origine aquatique (algues) pose la question de l'efficacité globale du recyclage, de la valorisation par l'animal de ces protéines en substitution du soja (notamment en volaille), de la qualité nutritionnelle et

⁷² Un Champ thématique de LA PROSPECTIVE Agroécologie détaille cette question de la diversité et de l'hétérogénéité des produits issus de systèmes agro-écologiques

⁷³ Halmemies-Beauchet-Filleau A., Rinne M., Lamminen M., Mapato C., Ampapon T., Wanapat M., Vanhatalo A., 2018. Alternative and novel feeds for ruminants: nutritive value, product quality and environmental aspects. *Animal*, 12, S2, s295-s309

sanitaire des produits animaux et de l'acceptabilité de ces nouveaux modes d'alimentation des animaux. L'utilisation en tant que produits de biocontrôle pour la santé animale de certains composés des légumineuses ou des algues est un champ qui mérite d'être exploré

b. Gérer les effluents d'élevage pour boucler les cycles de nutriments et produire des services.

La gestion améliorée des effluents d'élevage, qui représentent (France), 25%, 54% et 71% du N, P et K épandus sur les cultures (hors restitutions sur prairie), est un moyen efficace pour réduire les besoins en N minéral et réduire les émissions du GES en agriculture.

- Mieux gérer le retour au sol des effluents d'élevage comme fertilisants (apport de nutriments aux plantes) et/ou amendements (apport de matière organique sur le long terme) constitue leur devenir majoritaire et demande encore des avancées. Les voies de progrès pour accroître l'efficacité agronomique concernent la prise en compte de l'ensemble des maillons des filières (de l'alimentation animale à l'épandage au champ) pour limiter les pertes vers l'eau et l'air et intégrer l'ensemble des processus liés aux cycles biogéochimiques de C, N et P. Les dynamiques de minéralisation des formes organiques de N et leurs effets sur les composantes de la fertilité des sols selon les formes d'effluents restent à préciser. L'effet de traitements comme la séparation de phase ou le compostage pour améliorer l'efficacité agronomique doivent être évalués. La mise en place de modes d'élevage et de gestion des effluents qui assurent l'innocuité sanitaire des effluents reste une priorité. À l'échelle des territoires, des démarches participatives doivent permettre de développer des dynamiques d'innovation pour reconquérir la qualité des eaux, substituer des engrais organiques aux minéraux, réaliser des transferts vers des territoires aux sols pauvres en matière organique
- Diversifier les débouchés des effluents d'élevage. La méthanisation qui contribue au développement des énergies renouvelables génère des questions sur l'efficacité du procédé, les équilibres à trouver entre production de biogaz, qualité des digestats pour la fertilisation et évolution du stock de carbone des sols, et sur ses effets sur le métabolisme territorial (évolution des cultures, interactions entre exploitations, compétitions éventuelles entre élevage et méthanisation pour l'accès aux ressources, flux accrus d'éléments). L'utilisation des effluents comme substrats pour l'extraction de molécules d'intérêt (acides organiques pour l'industrie chimique, composés lignocellulosiques pour la production de fibres, nutriments pour la production d'insectes, d'algues, de bioengrais) ou pour la production d'insecte doivent être abordés. Dans tous les cas, outre le développement des technologies, il faudra trouver l'équilibre entre valorisation et maintien du retour au sol et évaluer ces filières.

c. Réduire les émissions de méthane des ruminants

La réduction des émissions de méthane est essentielle car elle représente presque la moitié des émissions de GES de l'agriculture en Europe et sa réduction est d'autant plus pertinente qu'il s'agit d'un GES à durée de vie courte et que la réduction des émissions réduirait la concentration dans l'atmosphère, conduisant à un effet similaire à celui de l'élimination active du CO₂⁷⁴ ce qui n'est pas le cas du N₂O. Plusieurs voies sont à explorer simultanément.

⁷⁴ Allen M.R., Shine K.P., Fuglestad J.S., Millar R.J., Cain M., Frame D.J., Macey A.H. 2018. A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *npj Climate and Atmospheric Science* 1:16 ; www.nature.com/npjclimatsci doi:10.1038/s41612-018-0026-8

Fuglestad J., Rogelj J., Millar R.J., Allen M., Boucher O., Cain M., Forster P.M., Kriegler E., Shindell D. 2018. Implications of possible interpretations of 'greenhouse gas balance' in the Paris Agreement. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119), 20160445. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0445>

- Evaluer des scénarii de rupture. La réduction des effectifs de ruminants souvent évoquée pour réduire les émissions peut avoir des contre effets non analysés à ce jour. Les ruminants consomment de grandes quantités d'aliments sur la planète et la question du devenir de ces ressources souvent fibreuses face à des scénarios de réduction de l'élevage doit être évaluée car leur récolte mécanique ou leur décomposition pourraient être une source majeure de GES ainsi que le retournement des prairies. Seul le scénario « forêt à la place des surfaces utilisées par les ruminants » peut être positif du point de vue des émissions, mais avec des conséquences peu/pas quantifiées sur la biodiversité et de l'ensemble des services rendus par l'élevage. L'étude de scénarios alternatifs permettant de réduire les effectifs bovins nationaux tout en maintenant les niveaux de production actuels (engraissement d'animaux issus du troupeau laitier, baisse des effectifs allaitants et animaux plus précoces) sont à explorer.
- Comprendre les relations entre efficacité digestive et rejets de méthane, pour développer des programmes de sélection efficace. Ces deux performances apparaissant antagonistes. Il faut analyser les particularités digestives des animaux plus ou moins émetteurs et, en complément, analyser les productions de méthane d'animaux ayant des efficacités alimentaires contrastées. La modification de l'écosystème microbien du rumen lors de son implantation dans les premiers stades de la vie est une autre voie à explorer.
- Préciser les effets des additifs alimentaires dont certains sont efficaces mais dont les conséquences sur les performances à long terme des troupeaux, la qualité des produits (risque de présence de résidus), la santé animale ainsi que l'acceptabilité par les consommateurs et les conditions de rentabilité de leur utilisation restent mal connues. L'utilisation de fourrages riches en composés secondaire (saponine, tannins) est une voie prometteuse à explorer.

4.2.3. Adapter les animaux et proposer des conduites d'élevage plus durables

Cette priorité, très vaste, recouvre le cœur des compétences des départements des sciences animales de l'INRAE.

a. Développer les capacités d'adaptation des animaux

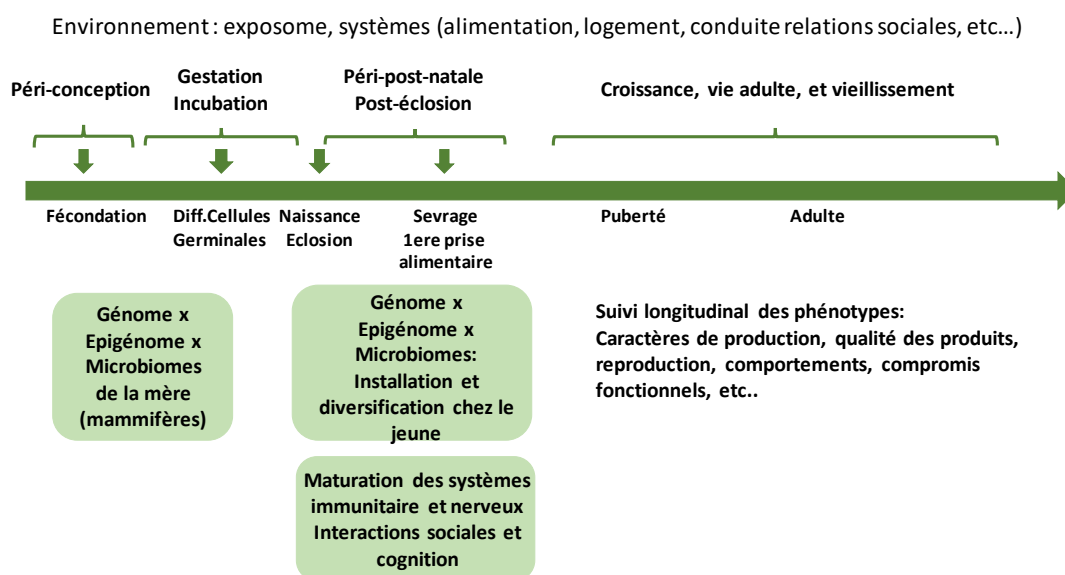
Le développement de systèmes d'élevages agro-écologiques renouvelle en profondeur les enjeux, les priorités scientifiques et les approches de la recherche sur les animaux. Il s'agit de

- Développer les capacités d'adaptation des animaux face à un environnement plus changeant, qu'elles soient de nature comportementale ou physiologique. Pour toutes les espèces, les premières phases de la vie constituent des étapes cruciales pour le phénotype ultérieur et ces phases précoces constituent des fenêtres d'action pendant lesquelles il va être possible d'appliquer différents stimuli pour moduler l'expression du génome et programmer les phénotypes et caractères d'intérêt et ceci, à très long terme, voire sur plusieurs générations.
- Répondre à la question de la qualité de vie des animaux, ce qui va nécessiter de mieux caractériser la perception qu'ils ont de leur milieu de vie et de leur propre état (bien-être/santé) et comprendre comment cette perception se construit durant le développement (in utero/in ovo, de la naissance à la fin de leur vie). Il est nécessaire de mieux comprendre les modes d'expression des besoins et de l'état de bien-être et de santé par les animaux.
- Développer une gestion préventive plutôt que curative de la santé pour réduire l'usage des antimicrobiens. La compréhension des fonctions des communautés microbiennes dans la préservation de la santé de l'animal et de l'homme (zoonose, sécurité des aliments) et de son environnement (faune sauvage, vecteurs, réservoirs, ...), doit permettre d'offrir de nouvelles

stratégies pour le contrôle de l'équilibre de l'écosystème microbien au bénéfice du bien-être et de la santé de l'animal, de l'environnement et de l'homme (cohabiter avec les organismes pathogènes plutôt que les éradiquer) et de proposer des outils/stratégies prophylactiques et thérapeutiques innovantes.

Pour répondre à ces priorités scientifiques, il faut passer d'une vision statique de l'animal à une vision dynamique et intégrée. La prise en compte de manière beaucoup plus intégrée que par le passé des différentes fenêtres temporelles au cours de la vie de l'animal et entre générations ainsi que l'ensemble de ses performances (production, robustesse, longévité, capacité d'adaptation au chaud, caractéristique de ses produits, etc.) doit permettre l'étude des effets à long terme des événements se déroulant dans des phases précoces et de caractériser l'aptitude des animaux à faire des compromis et à s'adapter à des environnements variables au cours de leur vie. Cela implique que les compétences multiples sur les différentes périodes de la vie et les différentes fonctions étudiées en phase de production soient décroisées et agrégées pour une vision intégrative de l'animal tout au long de sa vie (figure 3) et décroiser les disciplines et renforcer les collaborations entre biologistes, biostatisticiens et bioinformaticiens devient indispensable pour interpréter l'ensemble des données.

Figure 3. Elaboration précoce et étude des phénotypes : couplage santé, bien être, reproduction, production, longévité, adaptation au chaud, réduction des émissions de méthane, qualité des produits



Les thématiques identifiées au niveau animal concernent aussi les GT2, 3, 4, 7 et le GT5 pour les questions particulières des émissions de méthane ruminal et de l'adaptation des animaux au changement climatique.

- Comprendre l'élaboration précoce des phénotypes (phase périconceptionnelle, vie embryonnaire/fœtale, période néonatale jusqu'au sevrage. L'holonbionte est une échelle nouvelle à prendre en compte. Il s'agit d'analyser les interactions [Génome x Epigénomex x Microbiome] et Environnement ce qui recouvre notamment la compréhension des rôles multi acteurs des écosystèmes microbiens pour l'hôte et sa santé, la mise en évidence et compréhension de la transmission non génétique de certains caractères dans la variabilité des phénotypes ; l'analyse des mécanismes physiologiques et comportementaux du développement des

capacités sensorielles, cognitives et émotionnelles des animaux, et de leur état de conscience⁷⁵ ; la compréhension du développement des tissus et organes.

- Etudier les capacités d'adaptation chez l'animal en production : Il s'agit de déterminer si et comment des animaux sélectionnés dans un environnement favorable s'adaptent à un milieu plus changeant ; d'être capable de prédire les conséquences de la sélection d'un caractère sur les autres fonctions de l'animal ; de caractériser les états mentaux des animaux et leur robustesse comportementale, de comprendre les relations entre le bien-être animal et la santé et la conscience qu'un animal a de son état.
- Etudier les relations entre communautés microbiennes et santé : Il s'agit de comprendre les fonctions des communautés microbiennes (liens entre les différents microbiomes, assemblages microbiens les plus résilients/bénéfiques aux différentes étapes de la vie), d'analyser les modes de transmissions des agents pathogènes et d'évaluer les risques de transmission au regard des pratiques, développer des méthodes de pilotage.

L'ensemble de ces recherches doivent dépasser le seul cadre de la compréhension des phénomènes pour développer des méthodes d'intervention permettant de les maîtriser (levier des innovations technologiques dans la figure 2) et de prédire les effets.

b. Développer des systèmes d'élevage autour du bien-être, de la santé et climato-intelligents.

Les recherches doivent concerner différents niveaux d'intégration qui interagissent et être conduites souvent en partenariat (mais pas exclusivement) avec les acteurs de terrain pour la co-construction de solutions pérennes. Les travaux doivent aussi intégrer le changement climatique qui va challenger les animaux et les systèmes fourragers.

- Concevoir et mettre en œuvre un environnement adapté⁷⁶ au fonctionnement écologique et évolutif des espèces d'élevage et favoriser les processus « naturels » de régulation des agents pathogènes. Ils peuvent concerner les interactions antagonistes avec des espèces pathogènes, l'immunité naturelle et induite des animaux, des communautés d'espèces animales limitant la diffusion des agents pathogènes, l'automédication, les apprentissages des jeunes. Ces travaux s'appuieront sur une meilleure connaissance des états de conscience de l'animal, des Interactions écologie x épidémiologie. Les solutions devront être évaluées sur leur conséquences notamment en terme d'émissions vers l'environnement des animaux ou de leur milieu de vie (litières). A l'inverse des innovations visant à réduire les émissions en bâtiment devront être évaluées sur le bien-être et la santé.
- Concevoir des conduites de troupeaux et d'élevage réfléchies pour la multiperformance en s'appuyant sur les connaissances nouvelles sur le bien-être des animaux, sur la nécessité de limiter les périodes à risque et la pression infectieuse et les pratiques réduisant les émissions. La priorité sera l'arrêt des pratiques traumatisantes telles que castration, caudectomie, débecquage, dégriffage etc. et la recherche de l'expression naturelle des comportements, le développement d'alternatives aux antimicrobiens. Un point particulier sera l'analyse des synergies et trade-off entre les performances de bien-être animal et les impacts environnementaux⁷⁷ et avec le travail des intervenants en élevage. Les interactions entre

⁷⁵ Dans la suite de l'ESCO « Conscience animale »

⁷⁶ Un point de faiblesse est notre manque de compétences dans le domaine des bâtiments d'élevage et il faudra renforcer les liens avec le RMT s'y impliquant

⁷⁷ Par ex l'accès à l'extérieur des porcs et volailles peut accroître le risque de fuite de nitrate, le développement de litières paillées peut accroître les émissions vers l'air, le pâturage des ruminants peut contribuer au stockage de C, le développement de l'agroforesterie peut être positif à la fois pour le bien-être des animaux et le stockage de C, etc.

qualité des litières pour le bien-être et la santé et qualité des effluents produits pour leur usage agronomique est un autre point d'intérêt.

- Développer des systèmes de surveillance à l'échelle des filières et territoires, il s'agit de développer des systèmes de surveillance de nouvelle génération pour la circulation et la transmission des agents pathogènes, de réfléchir à de nouvelles organisations au sein des filières/territoires pour encourager la réduction des usages d'antibiotiques et plus généralement d'engager des démarches collectives vertueuses. Un point particulier concerne les filières bovines. La réduction des émissions de méthane pourrait conduire à réduire les effectifs et à accroître l'engraissement d'animaux issus du troupeau laitiers en veillant au bien-être de ces animaux. Il s'agira aussi de mieux documenter la variabilité des dynamiques de prise en compte du bien-être animal, de gestion de la santé, de la réduction des médicaments et de la prise en compte des enjeux environnementaux non encore régulés par la puissance publique car il apparaît clairement qu'il n'existe pas de solution unique mais au contraire que celles-ci doivent être adaptées aux contextes locaux.

c. Améliorer la qualité des (co)-produits animaux et innover dans leur valorisation

Au-delà des travaux sur l'élaboration de la qualité des produits animaux, de nouveaux fronts de science sont à considérer. Ils concernent

- Améliorer et prévoir la qualité des produits animaux. Il s'agit notamment d'étudier l'origine du microbiote des produits animaux afin d'en déduire les pratiques d'élevage qui permettraient de réduire les risques de présence de pathogènes dans des systèmes utilisant moins de médicaments. Dans le cas du lait et des produits laitiers au lait cru, il s'agit aussi de favoriser une diversité microbienne élevée favorable au développement des qualités gustatives des fromages. Dans le cas des viandes, il s'agit de développer des outils prédictifs peu ou pas invasifs de la qualité intrinsèque (sanitaire, nutritionnelle, sensorielle, technologique) afin d'évaluer le plus précocement possible sa variabilité qui peut être augmentée dans le cas de pratiques d'élevage plus agro-écologiques et plus diversifiées et faciliter ainsi sa gestion en élevage et/ou en orientant les produits vers différents segments de marchés.
- Diversifier la valorisation des produits et coproduits animaux ce qui concerne notamment l'étude exhaustive des fonctionnalités et bio activités ainsi que des procédés d'extraction des protéines fibreuses des carcasses (collagène, élastine, kératine) ou des produits animaux eux-mêmes (lait et œuf) pour des applications avancées dans le domaine de la biomédecine, des biomatériaux et de l'agro-alimentaire. La bio activité des résidus peptidiques issus de ces protéines ouvre notamment à la possibilité de remplacer des composants synthétiques largement utilisés par l'industrie alimentaire d'aujourd'hui. Les recherches de peptides à activité biologique ont démarré sur le lait (par exemple les complexes immuno-allergènes) et les œufs, et l'identification de telles molécules dans les viandes pourrait être un débouché pour certains bas morceaux non commercialisés ou à faible valeur marchande.

4.2.4. Faire entrer l'élevage dans l'ère du numérique

L'apport des nouvelles technologies réside dans la possibilité de disposer d'une meilleure connaissance de l'environnement, de la qualité des produits, du troupeau et de l'individu dans le troupeau. Ces technologies peuvent concerner tous les types d'élevages, même si pour le moment une majorité de technologies est dédiée à l'élevage bovin laitier et qu'elles sont encore assez peu présentes dans les élevages de volailles, poissons et élevages extensifs. Les domaines d'utilisation sont nombreux : gestion du bien-être (objectivation de l'état de l'animal dans le cadre d'une obligation de résultat), de

la santé (meilleure détection des maladies à la fois plus précoce et plus exhaustive, meilleure caractérisation des symptômes), de l'alimentation (ajustement en fonction des réponses animales - groupes ou individus), de la reproduction (des informations en continu sur les comportements et certains paramètres biologiques des individus). La sélection génétique a également beaucoup à gagner de ces informations à haut débit, le génotypage étant aujourd'hui bien moins limitant que le phénotypage à grande échelle des caractères d'intérêt zootechnique.

a. Utiliser les technologies du numérique en élevage

Les perspectives des nouvelles technologies sont extrêmement attractives et la difficulté consiste à ne pas succomber à cette attractivité en raison de sa nouveauté, mais bien en ce qu'elle permet de mieux répondre aux nouveaux enjeux de l'élevage. L'enjeu principal réside donc bien dans l'analyse et la valorisation de la plus-value de l'information permise par ces nouvelles technologies plutôt que dans les développements de ces techniques en elles-mêmes, ce qui n'interdit pas de les qualifier pour mieux en cerner les usages et de participer à leur développement avec d'autres organismes (CEA-Tech, partenaires privés) pour faciliter le développement des thématiques de recherche poursuivies. Les priorités de recherche concernent

- Déterminer les gains rendus possibles par la gestion de la diversité individuelle en élevage à partir des informations disponibles en dynamique et en combinant la connaissance de la diversité génétique offerte par les possibilités du génotypage aujourd'hui accessibles et la diversité phénotypique des trajectoires des animaux. Il devient en effet possible aujourd'hui de passer d'une conduite basée sur la production attendue et un calcul des besoins associés à une gestion en dynamique sur des critères beaucoup plus variés et des actions ciblées qui peuvent être adaptées à l'individu. Une autre question concerne l'évaluation du retour sur investissement de ces technologies. IL s'agit d'une véritable question scientifique car elle nécessite de simuler, via le développement de modèle bioéconomiques l'intérêt réel permis par l'acquisition d'information nouvelle (réduction des coûts, gain de temps de travail, etc.) en regard de l'investissement en amont.
- Valoriser au mieux toute l'information qui demain va arriver à haut débit dans l'élevage. La recherche doit préciser comment il est possible de valoriser au mieux toute la masse d'informations qui va débarquer, souvent plus vite que dans les dispositifs de recherche. La structuration des systèmes d'information est décisive et doit permettre de restituer à l'éleveur les données de façon claire pour les décisions voire d'en déléguer une partie à des robots.
- Analyser les conséquences des technologies du numérique sur l'évolution des métiers. Elles permettent de supprimer des tâches d'astreinte ce qui est attractif mais en même temps elles en créent de nouvelles (entretien/surveillance des équipements), elles peuvent être source de stress (alarmes trop nombreuses), peuvent conduire à un moindre investissement dans les savoirs faire de base et réduire les relations homme et l'animal. Les conditions d'utilisation de ces nouveaux outils doivent être étudiée précisément pour en tirer le meilleur parti en évitant les écueils. Le déploiement de ces nouvelles technologies va également modifier en profondeur l'organisation et le métier des acteurs du conseil et de la sélection animale.

b. Utiliser les technologies du numérique pour acquérir de la connaissance

Pour la recherche, ces nouveaux outils sont une formidable opportunité de vision large « macroscopique » de systèmes biologiques, en complément de la vision « microscopique » de ces dernières années et des précédentes révolutions technologiques (omics). La possibilité d'intégrer les données issues des capteurs utilisés dans les élevages commerciaux (qui seront parfois bien mieux

équipés que nos UE) permet de changer de dimension dans nos objets d'étude et d'observer de grands effectifs dans des environnements et avec des conduites très différentes (études des interactions génétique x environnement) pour un phénotypage à grande échelle. La complémentarité des visions macroscopique et microscopiques est prometteuse

- Etudier de nouveaux phénotypes et réaliser un phénotypage multi caractère. La mesure en continu de l'état des animaux permettant de dresser un portrait à court, moyen ou long terme des animaux qui pourrait être décisif pour développer une sélection sur des qualités d'élevage améliorées inaccessibles aujourd'hui, mieux comprendre la physiopathologie et améliorer la conduite d'élevage;
- Innover dans l'analyse des données obtenues à haut débit. L'INRAE n'est/ ne sera plus le principal fournisseur de données, mais il a un rôle important pour relier ces informations à haut débit avec des données difficiles à acquérir en élevage mais accessibles dans nos UE/IE sur des phénotypes spécifiques (émissions gazeuses, aptitudes digestives...). Ce travail est indispensable pour interpréter et utiliser ces données en élevage. Les liens entre ces données n'étant pas nécessairement mécanistes, il faudra associer des techniques de fouilles de données pour réaliser des apprentissages performants
- Utiliser les nouvelles technologies du numérique dans le cadre des 3R. Il s'agit de profiter de ces nouvelles technologies pour développer des techniques de mesures peu/pas invasives en remplacement des techniques existantes pour améliorer les pratiques en expérimentation animale.

4.3 Des fronts technologiques

Plusieurs des thématiques évoquées nécessitent des progrès conséquents dans les méthodologies qui en soit constituent des fronts de recherche technologique. Certaines d'entre elles nécessitent le développement de projets ambitieux au niveau de l'INRAE.

4.3.1. Développement technologique pour l'acquisition de connaissance sur la biologie de l'animal

Les recherches sur la capacité d'adaptation des animaux sont inféodées à des développements majeurs des technologies qui font partie intégrante des projets de recherche. Il s'agit de développer les capacités de phénotypage en temps réel à différentes échelles (cellule, embryon, animal, produit) et stades de la vie ainsi que le développement de biomarqueurs. Ces outils concernent l'investigation sur animaux vigiles et le développement d'alternatives à l'expérimentation invasive sur les animaux

- Développer la capacité à décrire de façon fine la composition (métagénomique), les interactions, la fonction (transcriptomique, métabolomique) et la dynamique des écosystèmes microbiens en relation directe (organes) et indirectes (arthropodes, faune sauvage, aliments pour animaux et aliments dérivés des animaux d'élevage...) avec l'Homme et l'animal ;
- Développer de nouveaux modèles cellulaires et de nouvelles méthodes d'investigation afin d'étudier des processus physiologiques finement. Ces méthodologies concourent aussi à réduire fortement le recours aux méthodes expérimentales sur animaux. Ceci recouvre les cultures 3D, embryoides ou organoïdes des tissus d'intérêt, cultures ex-vivo d'explants. Les organoïdes représentent un modèle attractif et alternatif pour des études mécanistiques dans un environnement simplifié. En reproduisant *in vitro* la micro-anatomie d'un organe, ils permettront de creuser les processus physiologiques liés à leur développement et à leur

fonctionnement. Un projet de réseau de labo sur les organoïdes (toute espèce et tout organe) va être déposé au prochain AO de la plateforme IBISA pour fédérer les forces à l'INRAE sur ce domaine. Récemment des puces de culture cellulaire microfluidique 3D à canaux multiples (organ on chips) qui simulent les activités, la mécanique et la réponse physiologique d'organes entiers et de systèmes d'organes, ont été développés chez l'homme et la souris. Ce type d'approches pourrait permettre de décomposer les interactions entre organes

- Développer des outils d'investigation du génome. Des plateaux techniques permettant des modifications ciblées des génomes et épigénomes (génomique ou épigénomique editing) devront être développés. Il s'agit d'un champ technologique très actif aujourd'hui sur les espèces modèles et l'homme mais encore peu développé dans les espèces d'élevage. Ces outils permettront de cribler à grande échelle des variations génétiques ou épigénétiques et mesurer les effets sur l'expression génétique dans les types cellulaires d'intérêt. Ils permettront également d'obtenir une démonstration fonctionnelle des mécanismes identifiés.
- Etudier les animaux en conditions d'élevage. Sans expérimentation « classique », les nouvelles méthodes de phénotypage à haut débit basées sur les outils du numérique devraient permettre d'étudier certaines questions à des échelles plus larges pour mieux comprendre les mécanismes d'adaptation au milieu, de robustesse, les liens génotypes phénotypes. Les travaux peuvent également contribuer au développement de nouvelles solutions technologiques pour l'étude des phénotypes (nouveaux capteurs, nouveaux marqueurs etc.). L'imagerie est sans doute une des technologies émergentes très prometteuses car les capteurs sont à faible coût et les possibilités de traitement des images sont de plus en plus nombreuses.

4.3.2. Acquisition, gestion et utilisation des données

De nombreux travaux font appel à l'utilisation d'approches d'analyse de données (expérimentations dans nos UE/IE, données de terrain, bases de données nationales et internationales) qui sont collectées dans des conditions très variées et pour couvrir une gamme de variations environnementales tant spatiales que temporelles aussi large que possible à la fois au niveau des animaux, aux échelles infra et au niveau des systèmes d'élevage, des filières et des territoires. L'utilisation conjointe d'approches expérimentales, de simulations et d'optimisations est pertinente et l'enjeu des données y est essentiel

- Gérer les données massives. Longtemps limitante, l'acquisition de données peut désormais s'appuyer sur le développement important de technologies de collecte automatisée (haut débit des « omiques » et des capteurs). Le déploiement de ces méthodologies à tous les niveaux d'étude du vivant amène de nouvelles questions. Il s'agit notamment de raisonner la fréquence d'acquisition des données pour qu'elles soient pertinentes, la mise en commun (plates formes d'échanges) mais peut encore rester une étape limitante (par ex pour la mesure de la production de méthane). La gestion de l'afflux massif de données pose par ailleurs des questions sur la confidentialité, la fiabilité, l'annotation, le stockage et les possibilités d'agrégation ce qui nécessite l'interopérabilité des bases de données avec pour objectif de les rendre FAIR (trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables). L'annotation repose notamment sur le développement des ontologies.
- Mieux utiliser les données massives pose des questions à la fois scientifiques sur la meilleure façon d'utiliser les données à des fins de compréhension des phénomènes étudiés, méthodologiques pour analyser la complexité des données collectées et technique revoyant aux capacités de calculs, à l'algorithmique et aux logiciels.

- Développer les approches « data driven » en intelligence artificielle. Avec l'arrivée du Big data et des méthodes d'apprentissage associées, les capacités de prédictions des sorties d'un système (un animal, un système agricole, un territoire) pourront ne plus reposer sur les approches classiques par des modèles mécanistes simulant les processus biologiques mais sur des modèles « boîtes noires » issus des analyses des données à haut débit. Il faudra rechercher des complémentarités entre ces 2 approches : les modèles mécanistes souffrent de l'impossibilité de se recaler face à des situations existantes faute d'informations dynamiques sur l'état du système et l'arrivée de ces informations peut leur redonner des perspectives et, à l'inverse, il faut essayer de rendre les approches « data driven » plus informatives sachant que les compétences sont surtout à l'INRIA pour le moment.
- Rapprocher des données contenues dans des bases nationales aux objectifs, formats différents (RICA, BDNI, Diapason...) est une nécessité pour traiter un certains nombres de questions, en particulier en économie et/ou à l'échelle des territoires, mais est souvent extrêmement coûteux en temps et difficile à mener au sein d'un collectif de recherche. L'accès à ces données reste un problème majeur en lien avec les contraintes liées au secret statistique et plus récemment à la mise en place de la RGPD. C'est un point fort de l'équipe ODR de Toulouse mais qui reste trop peu valorisée par les départements animaux.

5. Recommandations pour un plan d'action

Dans la partie précédente nous avons définis des priorités de recherches sur de nouveaux fronts de sciences (et technologiques) à l'interface entre plusieurs disciplines (voir tableau 2). Les réflexions conduites ont identifié des thématiques centrées sur l'élevage et les animaux mais ouvrent aussi sur des enjeux plus larges concernant les systèmes agri-alimentaires et la place et rôles que doit y jouer l'élevage. Les progrès dans ce domaine nécessitent des coordinations plus fortes entre disciplines des sciences de l'animal, du végétal et des sciences sociales. Nous développons dans cette dernière partie les évolutions de notre dispositif de recherches rendues nécessaires pour atteindre les objectifs.

5.1. Développer les synergies entre élevages et productions végétales pour accroître l'autonomie en azote et en protéines des systèmes alimentaires

La question de la production de protéines alimentaires et dans ce cadre de la dépendance de notre agriculture à l'azote de synthèse (et au phosphore) pour les cultures et aux importations de protéines de soja pour l'alimentation animale est aujourd'hui non résolue et fait l'objet d'un plan protéines européen et d'un plan français (non encore publié). Des reconnections entre élevages, productions végétales et arbres (agroforesterie) offre en théorie plusieurs avantages dont la fourniture d'azote pour les cultures par les effluents d'élevage, la fourniture de protéines locales en remplacement du soja importé pour l'alimentation des animaux. L'alimentation animale offre en retour des degrés de liberté pour réfléchir la diversification des rotations et des assolements avec des intérêts pour la réduction de l'usage des pesticides⁷⁸, la biodiversité et le stockage de carbone dans les sols. Un tel

⁷⁸ Les résultats des fermes DEFI du plan Ecophyto montrent d'ailleurs que la réduction de l'usage des phyto est plus important en système de polyculture élevage. La prairie et l'ensilage de maïs (culture de printemps) contribuent à rompre les cycles

recouplage doit aussi permettre en corollaire une réduction des émissions vers l'environnement (donc GES et notamment N₂O, nitrate, ammoniac). Toutefois, l'agriculture fait partie d'un système sociotechnique qui, en raison de ses choix historiques, est aujourd'hui «enfermé» dans ses approches intensives et spécialisées. Les grandes exploitations intensives et spécialisées responsables de la majorité de la production en volume et gérant la plus grande partie du foncier et des cheptels sont plus rentables, une fois les investissements effectués, et moins sensibles aux aléas naturels. Les logiques économiques des filières s'opposent aussi à la réalisation des synergies techniques. La connaissance des facteurs critiques et des stratégies permettant de mener à bien l'intégration des cultures et de l'élevage fait encore défaut. Les défis consistent à mieux comprendre ce type d'intégration, à évaluer les gains possibles dans les différents contextes et à développer des outils d'aide à la décision pour soutenir sa conception et sa mise en œuvre, de l'exploitation au territoire. INRAE est riche en compétences pour aborder cet enjeu dans sa globalité et fournir aux agriculteurs et aux chaînes alimentaires des alternatives économiques solides.

Les objectifs de recherche sont ici nombreux et concernent notamment

- Améliorer les méthodes d'évaluation des systèmes. Pour gérer le changement vers une agriculture circulaire et durable, il est essentiel de définir le point de départ et de suivre les progrès. L'ACV doit progresser pour mieux évaluer les effets de la circularité et des aspects essentiels à la production alimentaire durable à long terme (voir aussi 4.2.1.c) tels que la fertilité des sols et les risques d'érosion, les effets des pratiques sur la biodiversité, les propriétés qui émergent au niveau du paysage, la prise en compte de la spatialisation territoriale des émissions et la fourniture d'autres services (emplois, aspects culturels).
- Développer des modèles localisés du métabolisme territorial pour évaluer les conséquences de scénarii de rupture (voir aussi 4.2.1.b) et évaluer les équilibres des futurs systèmes alimentaires selon les territoires avec des approches quantitatives dynamiques et spatialisées. Il s'agit aussi de transformer ces informations sous formes d'indicateurs (au sens large) permettant de comprendre et piloter ces flux.
- Repenser les systèmes de culture et d'élevage pour favoriser les synergies avec des questions renouvelées autour de nouveaux modèles agronomiques : introduction de cultures fourragères pérennes au sein des rotations, développement des légumineuses pures ou en association avec des graminées, des cultures à double finalité (alimentation humaine et animale) pour éviter les cultures dédiées à la seule alimentation animale, des cultures intercalaires et CIPAN pouvant être utilisées en alimentation animale, de l'agroforesterie pour ses rôles dans la régulation des flux et l'adaptation au changement climatique, etc. Les systèmes d'élevage doivent évoluer pour valoriser au mieux ces nouvelles biomasses avec un renouvellement des questions pour adapter la conduite des troupeaux à une variabilité (temporelle et qualitative) plus grande des ressources, pour mieux raisonner les complémentarités et compétitions entre monogastriques et ruminants, entre systèmes « intensif » et « extensif » selon les territoires afin de tirer au mieux partie de la circularité. Ce volet a été largement exposé dans les parties 4.2.2.a, c et 4.2.3.a). A l'interface entre culture et élevage, il faut aussi innover dans la gestion des effluents d'élevage en s'intéressant notamment à la dynamique des formes d'azote réactif et du carbone dans l'air, l'eau et le sol en fonction des modalités de leur gestion, des traitements technologiques mis en œuvre et des systèmes culturels dans lesquels ils sont utilisés (voir aussi 4.2.2.b).

naturels des parasites, les associations céréales-légumineuses produites en inter-cultures sont des couverts étouffants pour les adventices; les cultures intercalaires et les CIPAN peuvent aussi être une ressource alimentaire pour les animaux

- Préparer la génétique végétale et animale pour des systèmes intégrés. Les efforts de sélection devraient se concentrer à la fois sur les espèces actuelles et les nouvelles mieux adaptées au changement climatique. Les caractéristiques d'intérêt concernent l'amélioration des rendements et la réduction de la sensibilité aux ravageurs (notamment pour les légumineuses), de nouvelles variétés mieux adaptées à la culture en mélange et l'amélioration de la qualité nutritionnelle (teneur en protéines, biodisponibilité et profil des acides aminés, élimination de facteurs antinutritionnels) des produits à destination de l'alimentation humaine mais aussi des coproduits destinés à l'alimentation animale. Le recouplage renouvelle aussi les questions en génétique animale pour améliorer les capacités d'adaptation des animaux et l'efficacité de l'utilisation des ressources alimentaires variées et issues de l'économie circulaire et renforce aussi le besoin sur la recherche d'animaux faiblement émetteurs de méthane. Des travaux en amont sont nécessaires pour fournir les informations génotypiques et phénotypiques indispensables.
- Développer des bioraffineries pour une autosuffisance accrue. L'amélioration des méthodes de transformation des plantes n'est pas un sujet nouveau mais la recherche d'une plus grande autonomie en protéines renouvelle l'intérêt pour l'extraction et la transformation des protéines et des composés secondaires extraits des plantes soit directement soit après une première transformation (cas des oléo-protéagineux avec la production d'huile) pour améliorer leur valeur nutritionnelle pour l'homme et l'animal en complément des approches de génétique. Cela concerne aussi le développement de procédés de traitement des lisiers pour mieux valoriser le N et le P (voir aussi 4.2.2.b).
- Gérer la question sanitaire. Les effets de ces nouvelles chaînes alimentaires sur la qualité sanitaire, nutritionnelle et sensorielle des produits d'origines animale et végétale sont à étudier. L'identification des dangers réels et émergents les plus importants dans l'alimentation animale et les (nouvelles) ressources alimentaires qui devraient être surveillés et contrôlés, nécessitera la mise au point d'outils d'alerte rapide pour diffuser des informations sur la prévalence des impuretés / mycotoxines botaniques dans les cultures et les sous-produits de traitement des cultures et le développement de processus de décontamination.
- Étudier les conditions de développement et la gouvernance de nouveaux systèmes plus autonomes. Il est néanmoins nécessaire d'examiner la rentabilité des modèles alternatifs, en tenant du coût du travail et d'adaptation des compétences, requis notamment pour réduire des intrants polluants, très bon marché et donc très rentables au regard du service productif qu'ils rendent, sous peine de prêcher dans le désert. Il faut donc bien comprendre les dynamiques qui favorisent ou empêchent la reconnexion entre les secteurs de l'élevage et des productions végétales, la trajectoire d'industrialisation et d'intensification de la production animale et végétale et l'émergence de modes alternatifs de production et de commercialisation. Un second enjeu concerne les modalités de nouvelles coordinations entre acteurs pour faire évoluer le système sociotechnique et l'organisation des filières en ciblant la coordination des innovations à différents niveaux⁷⁹. L'analyse d'exemples de cas de systèmes en transition pour identifier les conditions et les facteurs qui favorisent le succès de nouvelles organisations, de nouvelles chaînes de valeur, des processus d'apprentissage et, au contraire, des phénomènes de verrouillage sera utile à condition de pouvoir monter en généralité⁸⁰. Il

⁷⁹ Par exemple, l'adoption d'une nouvelle culture vertueuse dans un système de rotation nécessite à la fois la réflexion préparatoire à propos de sa valorisation du marché ainsi que sur l'accompagnement à sa maîtrise technique.

⁸⁰ Un travail initié entre les GIS « Avenir Elevages », « Grandes cultures à hautes performances économique et environnementale », « Cultures légumières » et « Fruits » doit permettre une analyse d'exemples de cas de systèmes en transition pour identifier les conditions et les facteurs

importe enfin de travailler sur les outils de politique publique les plus appropriés pour favoriser les transitions : taxes sur les émissions ou intrants polluants, paiements pour services environnementaux, protection des innovations de niches durant les phases expérimentales, aide à la structuration entre acteurs, etc.

5.2. Des compétences à acquérir/renforcer et à mettre en synergie

5.2.1. Besoin en compétences nouvelles

Des priorités sont apparues dans plusieurs domaines et nécessitent des recrutements.

- Renforcer les disciplines de fouilles de données. L'enjeu des données est central avec l'arrivée du Big Data. Des compétences existent (par ex UMR MISTEA Montpellier, MIA) mais sont à renforcer face au développement des demandes sachant que les profils de « data scientist » sont très recherchés. Les progrès peuvent être réalisés par (i) quelques recrutements notamment de chercheurs ayant une double compétence élevage/data pour assurer l'interface avec les « data scientists » et (ii) le renforcement des partenariats avec l'INRIA, les universités et certaines grandes écoles qui disposent de compétences dans le domaine des data et la capitalisation sur l'opportunité de #DIGITAG. Les « data scientists » sont à la recherche de jeu de données attractifs pour développer des méthodes originales d'analyse. Nos travaux peuvent fournir de tels jeu de données en open data. L'approche en dynamique des processus, la diversité des milieux envisagés, les données massives issues du monde de capteurs et des « omiques » et certaines bases de données nationales (ex la base BDNI⁸¹) offrent sans doute des opportunités de collaborations (échanges/accueil de chercheurs, masters et doctorants et/ou animations de type réseau entre laboratoires data science et élevage). La production intensive de données en écologie, et les capacités de l'exploiter, sont aussi nécessaires pour caractériser et quantifier les services écosystémiques (pollinisation, bio-contrôle) au niveau des parcelles, des troupeaux et des paysages où parcelles et troupeaux interagissent avec les infrastructures agro-écologiques.
- Renforcer les compétences dans le domaine de l'élevage et de son intégration dans la société. Les besoins résident surtout dans (i) des biologistes capables d'interpréter des signaux issus de capteurs variés et d'intégrer des données multi omiques et phénotypiques et de collaborer avec différents partenaires (CEA Tech, laboratoires de physique, chimie...) pour le développement de capteurs et d'algorithmes de traitement permettant d'appréhender de nouveaux phénotypes ; (ii) de zootechniciens capables d'intégrer au niveau des systèmes d'élevage les connaissances biologiques, de conduire des travaux sur la conception innovante de systèmes d'élevage et des projets d'interface avec les autres secteurs de l'INRAE ; (iii) des sciences de la cognition et de l'éthologie face aux enjeux du bien-être animal ; (iv) des compétences en SHS (économie, science de gestion, sociologie, géographie) pour repenser les liens entre élevage, production végétale et territoires ainsi qu'entre élevage, transformation et consommation (produits animaux et substituts).
- Renforcer les compétences dans l'analyse économique et sociologique du numérique, notamment pour la traçabilité et la commercialisation de produits de qualités différenciées,

qui favorisent le succès de nouvelles organisations, de nouvelles chaînes de valeur, des processus d'apprentissage et, au contraire, des phénomènes de verrouillage.

⁸¹ Nous aurons accès à ce type de données si nous montrons que l'on est capable de faire des analyses et des interprétations que nos partenaires ne peuvent pas réaliser.

éventuellement de petits volumes, et des services environnementaux (biodiversité) et sociétaux (bien-être animal) associés.

5.2.2. Renforcer les approches interdisciplinaires

Les approches interdisciplinaires entre les départements « animaux » sont nombreuses et doivent se renforcer à l'issue de la prospective du fait de l'émergence de thématiques nouvelles liées à l'agroécologie et au numérique (priorités 3 et 4). D'autres approches interdisciplinaires sont à développer avec les secteurs des productions végétales, de l'environnement, des SHS et de l'alimentation humaine pour faire face aux enjeux de l'élevage et plus généralement de l'agriculture (priorités 1 et 2, voir aussi partie 5.1). Plusieurs MétaProgrammes embarquent des thèmes de la prospective mais pas tous et des voies complémentaires sont à explorer :

- L'organisation de séminaires, éventuellement ouverts aux partenaires, sur des controverses et/ou des thématiques ciblées permettrait de formaliser des questions de recherches originales dans le cadre de domaines d'interface souvent bien identifiés mais protéiformes. Les deux séminaires conduits dans la prospective ont montré tout l'intérêt de l'exercice.
- La mise en place de groupes d'animation interdépartementaux sur des thèmes partagés est relativement simple à mettre en œuvre pour approfondir des domaines d'interface mais nécessite en amont d'identifier des chercheurs leaders ayant une vision systémique. Des thèses ou des crédits incitatifs peuvent aider au démarrage des projets. De façon plus formelle, le recrutement de spécialistes disciplinaires dans des unités d'autres départements est une possibilité mais qui pose la question du risque d'isolement des chercheurs ainsi recrutés de leur collectif « naturel ».
- La modélisation et l'étude de scénarii prospectifs sont aussi des bonnes voies d'entrée pour le dialogue interdisciplinaire.

5.3. Des évolutions du dispositif d'acquisition de données

Dans un contexte de développement de l'agro-écologie en élevage, il faut renforcer les complémentarités entre les dispositifs de recherche à l'international et entre dispositif de recherche et dispositifs de terrain pour élargir le champ de collecte des données par une coopération renforcée avec nos partenaires de la R&D.

- Faire évoluer notre dispositif expérimental qui est très riche du fait de la diversité des espèces animales étudiées, des contextes d'étude et des méthodes d'investigation utilisées. Il doit nous aider à jouer un rôle de premier plan au niveau national et international (notamment via les projets infrastructures européens comme AquaExcel, SmartCow, PigWeb). Il nous faut pour cela renforcer les approches analytiques de long terme pour un suivi longitudinal inter générationnel des animaux (étude des trajectoires individuelles d'évolution) afin de pouvoir étudier, dans des approches d'agroécologie, les capacités des animaux à s'adapter à différents environnements (production, santé, bien être...). Il faut aussi développer de nouvelles méthodes d'investigation pour un suivi non invasif des animaux, élargir les capacités de phénotypage, développer les e-infrastructures pour assurer le cycle de vie des données et développer les alternatives à l'expérimentation animale.
- Valoriser les complémentarités entre les données collectées dans nos Unités Expérimentales et celles collectées à grande échelle sur le terrain. Les données du terrain permettent d'acquérir de l'information dans des conditions d'environnement très variées, de confronter à la réalité

nos résultats et concepts et elles posent en retour de nouvelles questions de recherche. Les données acquises dans nos UE/IE permettent quant à elles d'approfondir les mécanismes physiologiques. Les UMT sont des outils facilitant ces complémentarités.

- Les dispositifs de recherche participative sont bien adaptés pour aborder des thématiques telles que la transition de l'élevage vers l'agroécologie, la diversité des systèmes, des services produits par l'élevage ou encore pour une gestion intégrée de la santé et du bien-être. Des « living lab » territoriaux à des échelles locales doivent permettre d'associer l'ensemble des acteurs des chaînes de valeur et des territoires autour d'objets communs de recherche-action et la réalisation de démonstration in situ de la pertinence de solutions innovantes.
- Les dispositifs d'observation producteurs intensifs de données en (agro-) écologie pour la caractérisation des services écosystémiques à différentes échelles (parcelle, troupeau, paysage)

5.4. Le développement des partenariats

5.4.1 Partenariat scientifiques internationaux

Les recherches l'INRAE sont relativement bien positionnées et reconnues au niveau Européen. Les équipes INRAE coordonnent et/ou sont impliquées dans de nombreux projets H2020 et participent activement à l'EAAP⁸². Il nous faut aujourd'hui renforcer notre positionnement au plan international, notamment vis-à-vis des instances internationales en abordant de façon volontaire la dimension mondiale des enjeux de l'élevage, en termes de gestion de la santé des troupeaux, des rôles de l'élevage, d'aptitudes des animaux, de gestion des ressources alimentaires et de diversité des systèmes de production. Pour aborder cette échelle, outre le MP Transition pour la sécurité alimentaire globale des collaborations et partenariats seront sans doute à développer / renforcer avec les institutions internationales (Banque Mondiale, FAO, Global Alliance for Sustainable Livestock, ILRI) travaillant sur cette dimension et avec d'autres organismes de recherche par le développement de LIA⁸³.

5.4.2. Partenariats socio-professionnels

L'objectif a été durant la prospective d'organiser le partenariat pour l'innovation et la programmation autour d'opérations structurantes permettant d'assurer un continuum entre les enjeux et fronts de science proposés dans la prospective Elevage, nos partenaires habituels de la R et R&D, d'accéder à de nouveaux partenariats afin d'impulser une nouvelle dynamique à l'ensemble du secteur et de couvrir l'échelle des TRL. A l'issue de la prospective le partenariat national paraît lisible autour

- Le GIS Avenir élevages qui regroupe les acteurs du secteur Recherche, développement et Formation pour une meilleure efficacité et lisibilité du dispositif national (23 partenaires comprenant l'ANSES, les ITA et Interprofessions du secteur élevage, des organismes privés, les principaux établissements de formation supérieure, les principaux organismes de développement) et (i) créer une continuité et des perspectives communes entre les communautés ; (ii) développer des approches inter-filières car elles sont toutes concernées par les mêmes enjeux et par les démarches de la connaissance à l'innovation ; (iii) d'impliquer

⁸² European Association of Animal Production. INRAE préside des groupes filières dans l'association et de très nombreuses communications lors du congrès annuel.

⁸³ Laboratoire International Associé

de manière plus volontariste les partenaires dans les appels d'offre nationaux et européens (synergie avec l'ATF) et de coordonner leurs réponses.

- Le LIT OUESTEREL qui regroupe l'ensemble de la chaîne de valeur, de l'éleveur au consommateur et au citoyen pour retisser les liens entre élevage et société dans une approche de co-construction de nouveaux modes d'élevage, de filières animales et de valorisation des produits animaux qui en sont issus. L'amélioration du bien-être animal et la réduction des usages d'antibiotiques sont les pivots thématiques, l'innovation, la traçabilité des pratiques grâce au numérique et la différenciation des produits animaux grâce à la labellisation en sont les vecteurs. Le LIT peut fournir des terrains d'expérimentation en vraie grandeur en prolongement du nouveau Métaprogramme « SANBA » et en ouvrant de nouveaux partenaires (ONGs, PME du numérique, coopératives, distribution...).
- Le Carnot France Futur Elevage qui est un partenariat public-privé a été monté pendant le chantier de la prospective et est co-animé par l'INRAE. La création des domaines d'Innovations (DI Génétique Animale ; Elevage sur Mesure ; Innovation pour la santé Animale ; Changements climatiques ; Eaux, sol et effluents ; Protéines pour alimentation animale ; transition Agro-écologique des systèmes alimentaires) complète le dispositif partenarial avec les acteurs économiques.

Cette organisation nationale du partenariat est complétée par le dispositif des UMT et RMT et au plan local par le tissu partenarial conçu par les centres/unités (ex le GIS APIVALE) et des initiatives de département (ex le consortium méthane).

Ce partenariat socio-professionnel s'appuie également sur la revue INRAE Productions Animales (<https://productions-animales.org/>), revue de transfert en sciences animales et élevage éditée par INRAE en Open Access. Cette revue permet de diffuser les résultats de la recherche acquis par INRAE seul ou en partenariat, sous forme d'articles de synthèse accessibles à un large public du secteur Recherche, Formation et Développement.

5.5. Valorisation de la prospective

Un effort tout particulier est consacré à la diffusion des idées développées dans la prospective au niveau français et européen avec l'ambition de promouvoir et faire partager au niveau français et Européen la vision développée dans la prospective et les propositions des grands enjeux et front de science qui en découlent. Il s'agit de faire bouger les lignes de la recherche et innovation en élevage et plus globalement la place de l'élevage en relation avec les productions végétales pour une agriculture plus durable. On peut aujourd'hui affirmer que cette démarche est couronnée d'un certain succès, la vision étant globalement partagée par les acteurs de la R&D en France et par les organismes et grandes universités impliquées au niveau Européen.

En interne à l'INRAE, la prospective doit servir de cadre général à la réflexion sur l'orientation des recherches en irrigant les réflexions sur les nouveaux métaprogrammes et les prochains SSD de départements.

- Concernant l'appropriation des conclusions, une journée de restitution de la prospective reste à organiser en 2020 pour partager la vision et les priorités avec les contributeurs et plus largement au sein de l'INRAE et avec nos partenaires des UMR. Un tel séminaire doit être ouvert aux ITA qui sont nos partenaires dans le cadre des UMT.

- La tenue de séminaires sur des thématiques à l'interface entre départements devrait permettre de formaliser des questions originales et précises de recherches à l'interface entre secteurs/disciplines.
- Plusieurs réflexions conduites dans la prospective ont nourri les réflexions des futurs MP et/ou s'intègrent dans les nouveaux MP à des degrés divers
 - Le MP Sanba a largement repris les réflexions de la prospective, notamment celles du GT4 sur la Gestion intégrée de la santé et du Bien-être.
 - Le MP Approches prédictives en biologie et écologie a bénéficié des réflexions de la prospective (Priorité 3, notamment thème 3a) par la participation croisée de chercheurs dans les deux chantiers. Plusieurs des fronts de science mis en avant dans la prospective ont des déclinaisons dans d'autres MP. C'est notamment le cas du fonctionnement de l'holobionte (thème inclus dans 3a) et le microbiote des produits animaux (Thème 3c) qui relèvent du MP Holoflux. C'est aussi le cas des fronts de science sur la recherche d'animaux plus robustes (priorité 3a) et sur le recouplage élevage-végétal (priorité 2) qui relèvent du MP Métabio ainsi que des fronts de sciences concernant l'atténuation des émissions et d'adaptation de l'élevage au changement climatique (thème 1b, Priorité 2) avec le MP Atténuation-Adaptation au changement climatique.
 - D'autres relations sont à construire avec des MP en cours de réflexion. Il s'agit notamment des fronts de sciences sur les services rendus par l'élevage (thème 1c) avec le MP Biodiversité et services écosystémiques ; des thématiques de la priorité 1 et du thème 3c avec le MP Systèmes alimentaires et santé. En revanche la prospective ne considère pas les risques des d'expositions sur la santé.
 - L'élevage demeure un élément clé de la sécurité alimentaire mondiale et plusieurs des thématiques mises en avant par la prospective (Priorité 1) relèvent des contours de l'ancien MP GloFoods où l'on pourrait renforcer la place de l'élevage.
 - En revanche, l'approche de circularité développée dans la prospective (Priorité 2) ne rentre plus dans les contours retenus du MP Bioéconomie territoriale.

Au niveau national, les idées percolent à travers la production de documents et l'embarquement des partenaires dans des projets de R&D.

- Un article a été publié dans le numéro spécial de la revue INRAE Productions Animales à l'occasion des 30 ans de la revue présentant de façon synthétique le rapport de la prospective : <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2591>.
- La prospective a été présentée lors d'une rencontre INRAE au Salon de l'Agriculture 2020, organisée conjointement avec la revue INRAE Productions Animales qui s'intitulait « De grands défis pour l'élevage : ce que la recherche peut apporter comme solutions » : <https://www6.inrae.fr/rencontresia/Les-rencontres-2020/De-grands-defis-pour-l-elevage>
- Un CIAG a été organisé en partenariat avec l'Ademe (12/12/19) pour valoriser conjointement les points de convergences entre la prospective Agro-écologie et la prospective Elevage sur le thème de la « Complémentarités entre cultures et élevages pour des systèmes agri-alimentaires plus durables et résilients ». Un numéro de la revue Innovations agronomique est constitué d'articles issus du colloque.

<https://www6.inrae.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2020/Volume-80-Mars-2020>

- Le GIS Avenir Elevages qui rassemble l'ensemble des acteurs (Instituts techniques, interprofessions, APCA, organismes de formation et de conseil) est le lieu le plus adapté pour faire percoler les nouveaux concepts et besoins de recherche. Le nouveau programme scientifique du GIS élaboré en 2018/19 pour la reconduction de la convention s'est très fortement inspiré des réflexions de la prospective et la vision est maintenant partagée par tous les partenaires. Des présentations de la prospective ont aussi été réalisées lors des COS des instituts techniques animaux.

Au niveau Européen, les actions ont été engagées dans le cadre de la préparation du nouveau programme « Horizon Europe ». Elles concernent.

- La priorité sur l'élevage de l'INRAE élaborée en 2018 « Towards Livestock Systems for the Future » qui a été soutenue par le TEAGASC, le WUR, le DAFA, Agroscope et Inia. inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com
- La production et présentation de deux position papers : le premier a été préparé par l'Animal Task Force qui est une plate-forme publique-privée (21 pays) et concerne l'avenir de l'élevage et des recherches à conduire en Europe. Le second, élaboré entre l'ATF et la plate-forme correspondante en production végétale (Plant for the Future) concerne le recouplage entre élevage et production végétale pour des systèmes agri-alimentaires plus durables. Ces documents ont été présentés et bien accueillis par la commission (DG Agri, DG RTD).

Position Paper de l'ATF 2019. Towards European Research and Innovation for a sustainable and competitive livestock production sector in Europe. 34 pages

http://animaltaskforce.eu/Portals/0/ATF_Vision_Paper_2019.pdf?ver=2019-02-19-022521-460

Joint position paper Animal Task Force and Plant For the Future, 2019. Research and Innovation towards a more sustainable and circular European agriculture Exploring synergies between the livestock and crop sectors, 27 pages

http://animaltaskforce.eu/Portals/0/ATF/Downloads/ATF_PlantETP_joint-paper_Sept2019.pdf?ver=2019-09-19-042855-867

- Il reste à compléter la diffusion des idées par la production de papiers scientifiques. Parmi les points les plus originaux à valoriser sur la vision et les besoins de recherche qui en découlent on peut penser à (i) : La compréhension et le pilotage de l'élaboration des phénotypes animaux (GT2, 3) avec l'intérêt de disposer de suivis longitudinaux sur l'animal au cours de sa vie et sur sa descendance ; (ii) La place et les rôles de l'élevage dans le développement de systèmes agri-alimentaires durables montrant l'aptitudes des animaux à valoriser des biomasses variées et les recherches à conduire pour optimiser cette aptitude ; (iii) La gestion intégrée du bien-être animal et de la santé comme fondateur sur les relations complexes entre bien-être et santé de l'animal et de l'intervenant en élevage.

6. Conclusion

Cette réflexion scientifique prospective a permis de développer une vision pour le positionnement de l'élevage au sein de systèmes agri-alimentaires circulaires et durables et de fournir un cadre conceptuel pour le développement futur des recherches et des innovations. Repositionner l'élevage au cœur des systèmes agri-alimentaires, ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer simultanément les différentes dimensions de l'élevage. Cette approche permet aussi de positionner l'élevage non plus uniquement comme un élément aux impacts négatifs qu'il faut réduire, mais aussi comme une ressource pour trouver des solutions innovantes améliorant la durabilité des systèmes agri-alimentaires. Les évolutions à réaliser et les progrès à accomplir nécessitent une recherche ambitieuse qui ne peut pas être réalisée dans la seule continuité des recherches actuelles. Des ruptures sont à réaliser tant au niveau des thématiques de recherche que des méthodes d'approche. Il est notamment indispensable de renforcer les approches interdisciplinaires, non seulement entre biologistes du domaine animal, mais aussi avec les sciences du végétal, les sciences sociales et économiques et les sciences des données. Parmi les virages à négocier, trois sont d'une importance toute particulière :

Le premier concerne, le développement d'une vision dynamique et intégrée de l'animal et des systèmes d'élevage en intégrant les différents niveaux d'approche et les différentes échelles temporelles et spatiales. Cet enjeu va nécessiter de développer des approches analytiques de long terme permettant des suivis longitudinaux et intergénérationnels d'animaux placés dans des conditions contrôlées et de quitter l'approche animal/lot moyen pour s'intéresser aux trajectoires d'évolution. Au final il faut disposer de modèles animaux construits par un vécu différent alors que jusqu'à présent nous disposons essentiellement de modèles génétiques reposant sur des lignées expérimentales divergentes. Cet enjeu doit aussi s'accompagner du développement de nouvelles méthodes d'investigation pour un suivi non invasif des animaux et de l'élargissement des capacités de phénotypage ainsi que du développement de méthodes alternatives à l'expérimentation animale permettant d'approfondir les processus physiologiques en reproduisant *in vitro* la micro-anatomie d'un organe (organoïdes) et d'analyser les interactions entre organes (Organ-on-chips). À l'échelle des systèmes d'élevage, il est indispensable de renouveler les compétences de zootechniciens ayant une vision systémique pour conduire des travaux souvent à l'interface entre disciplines et de conception innovante de systèmes ainsi que de renforcer celles en sciences humaines et sociales liées à l'élevage qui apparaissent trop modestes face aux enjeux des controverses liées aux questions du bien-être et santé des animaux et des Hommes, de l'acceptabilité de substituts à la viande et plus généralement de l'éthique en élevage.

Le deuxième concerne l'intégration de l'élevage dans des problématiques plus globales relatives au (re)couplage entre élevage et productions végétales. Une clé d'entrée très transformante pour l'agriculture serait de développer des recherches pour réduire notre dépendance à l'azote de synthèse et aux importations de protéines pour l'alimentation animale. Cette thématique converge avec l'objectif de réduction des émissions de GES, notamment de N₂O, avec la réduction des produits phytosanitaires *via* la diversification des rotations, l'alimentation animale offrant de degrés de liberté pour réfléchir à cette diversification, et l'introduction de légumineuses dans un objectif de réduction de l'usage des engrais de synthèse. Les fronts de science concernent la plupart des départements.

Le troisième est lié au développement des « *data sciences* ». De nombreux travaux font appel à l'utilisation d'approches d'analyse de données collectées dans des conditions très variées pour couvrir une gamme de situations environnementales, tant spatiales que temporelles, aussi large que possible à la fois au niveau des animaux (ou à des échelles infra) et au niveau des systèmes d'élevage, des

filières et des territoires. Les questions soulevées concernent la fréquence d'acquisition, la gestion d'un afflux massif de données souvent hétérogènes et leur utilisation. Ce dernier point soulève des questions de nature scientifique sur la meilleure façon de les utiliser à des fins de compréhension des phénomènes étudiés, de nature méthodologique pour analyser la complexité des données collectées et de nature technique renvoyant aux capacités de calcul, à l'algorithmique et aux logiciels. Des complémentarités sont à trouver entre des approches en intelligence artificielle (« *data driven* ») et les modèles plus mécanistes simulant les processus biologiques. Même si quelques recrutements de « *data scientists* » peuvent s'envisager dans un domaine où la technologie évolue très vite, c'est surtout de chercheurs ayant une double compétence « élevage/data » dont nous avons besoin pour développer des collaborations.



INRAE

147 rue de l'Université
75338 Paris cedex 7
Tél. : 01 42 75 90 00

Rejoignez-nous sur :



inrae.fr

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE