

Contributions de la génétique animale à la transition agroécologique des systèmes d'élevage

Alain DUCOS¹, Frédéric DOUHARD¹, Davi SAVIETTO¹, Marion SAUTIER¹, Valérie FILLON¹, Mélanie GUNIA¹, Rachel RUPP¹, Carole MORENO-ROMIEUX¹, Sandrine MIGNON-GRASTEAU², Hélène GILBERT¹, Laurence FORTUN-LAMOTHE¹

¹GenPhySE, Université de Toulouse, INRAE, ENVT, 31326, Castanet Tolosan, France

²INRAE, Université de Tours, BOA, 37380, Nouzilly, France

Courriel : alain.ducos@envt.fr

■ Les systèmes d'élevage font face à une importante crise de légitimité et doivent évoluer en profondeur. L'agroécologie est un cadre pertinent pour guider cette évolution. Si la génétique a été associée dans le passé au développement de systèmes qui sont aujourd'hui remis en cause, elle peut également jouer un rôle dans leur transition. Pour cela, la génétique animale devra contribuer aux travaux visant une reconception des systèmes d'élevage.

Introduction

Les productions animales ont connu des évolutions très importantes au cours du xx^e siècle dans l'ensemble des pays industrialisés¹, dont la France (Domingues *et al.*, 2019). Le nombre d'élevages a très fortement diminué, et leur taille moyenne a augmenté. Les exploitations agricoles et les territoires se sont spécialisés, ce qui s'est traduit par une dissociation géographique assez forte entre productions végétales et animales. D'autres évolutions ont concerné la conduite de l'alimentation et de la reproduction des animaux, le niveau de recours aux intrants (engrais, énergie, médicaments...), les méthodes de sélection et de diffusion du progrès génétique. L'amélioration génétique² des populations animales (encadré 1) a joué un rôle central dans cette dynamique

d'intensification des productions, en permettant une évolution très importante des performances zootechniques (Hill et Kirkpatrick, 2010). La standardisation et l'artificialisation croissantes des conditions d'élevage ont permis la diffusion de quelques races ou lignées très productives et spécialisées, au détriment, le plus souvent, de races locales moins productives adaptées à leur environnement, dont certaines sont désormais menacées d'abandon pour l'agriculture (Verrier *et al.*, 2015). Toutes ces transformations visaient l'accroissement de la productivité globale des facteurs de production, de l'efficacité et de la compétitivité économique des entreprises agricoles dans un contexte de mondialisation croissante (Domingues *et al.*, 2019). Elles ont permis l'accès à des produits animaux à un coût maîtrisé pour la plupart des consommateurs (Laisney, 2012).

Cependant, ces évolutions ont eu des conséquences négatives sur l'environnement, la biodiversité, le bien-être des animaux, la situation socio-économique de nombreux éleveurs et la santé publique. La concentration animale dans certains territoires, comme dans le nord de l'Europe ou l'ouest de la France (Roguet *et al.*, 2015), l'importation massive de ressources alimentaires (soja) depuis certains pays recourant de façon importante à la déforestation (Rajão *et al.*, 2020), ainsi que le recours généralisé aux intrants ont entraîné d'importantes pollutions des eaux et des sols, augmenté les émissions de gaz à effets de serre et contribué à l'effondrement de la biodiversité (Buckwell et Nadeu, 2018). Par ailleurs, l'intensification des élevages s'est traduite par l'adoption à une large échelle de pratiques portant atteinte au bien-être des animaux, et/ou posant d'importantes questions éthiques : accroissement

1 Le périmètre de cet article a été volontairement limité aux systèmes d'élevage des pays occidentaux dont le climat est tempéré. La question de la transition agroécologique des systèmes d'élevages tropicaux est bien entendu importante, mais les enjeux, les leviers et les modalités de cette transition sont en partie différents, et justifieraient une analyse complémentaire à celle développée dans le présent article.

2 Les termes indiqués en gras dans le texte lors de leur première occurrence sont définis à l'encadré 1 (glossaire).

Encadré 1. Glossaire.

Amélioration génétique (des populations animales d'élevage) : Activité humaine conduite, selon l'espèce, par des éleveurs organisés de façon collective ou par des entreprises privées. Elle s'appuie sur les concepts de la génétique (quantitative) et de la statistique. Ses objectifs sont de mettre à la disposition des filières des animaux adaptés à leurs besoins en tirant parti des différences d'origine génétique intra-population et/ou entre populations (voire espèces), en développant des outils et en appliquant des méthodes susceptibles d'entraîner un progrès génétique dans le sens d'objectifs définis à l'avance (Source : [http : //www2.agroparistech. fr/svs/genere/uvf/AG/AGintro.htm](http://www2.agroparistech.fr/svs/genere/uvf/AG/AGintro.htm)).

Compromis biologique (*trade-off*) : Situation dans laquelle l'amélioration d'une fonction biologique s'accompagne d'une détérioration d'une autre fonction (et *vice versa*). Différents mécanismes physiologiques et biologiques peuvent expliquer ce phénomène. Par exemple si les fonctions entrent en compétition pour l'utilisation de nutriments, ou s'il existe des contraintes physiologiques (temporelles ou anatomiques, par exemple) à la co-expression des caractères. D'un point de vue génétique, les compromis se traduisent parfois par une corrélation génétique défavorable. Les compromis sont mis en jeu dans les processus d'adaptation au sens large, et notamment dans la robustesse (Source : Garland, 2014).

Efficacité alimentaire : L'efficacité alimentaire des animaux, terme classiquement utilisé dans le domaine de l'élevage pour qualifier le rendement d'utilisation de l'aliment par l'animal, est généralement appréhendée à l'aide d'indicateurs tels que l'indice de consommation (IC : quantité d'aliments nécessaire à la production par les animaux d'un kg de poids vif, de lait, d'œufs . . .), ou la consommation moyenne journalière résiduelle (CMJR : écart entre la consommation réelle et la consommation prédite en tenant compte des besoins de production et d'entretien des animaux).

Efficacité/Efficience : Formellement, l'efficacité permet de mesurer l'écart entre les résultats et les objectifs recherchés. L'efficience, quant à elle, est généralement définie comme un ratio entre produits et ressources. Un processus est d'autant plus efficace qu'il est capable de produire plus à partir des mêmes ressources, ou de produire autant en réduisant les ressources utilisées. En se basant sur ces définitions, les critères d'efficacité alimentaire définis au point précédent (IC et CMJR) seraient également des critères d'efficience alimentaire. En élevage, améliorer l'un ou l'autre de ces critères vise les mêmes objectifs : réduire les coûts de production et l'emprise de l'élevage sur les ressources naturelles (Source : Faverdin et Van Milgen, 2019).

Épigénétique : Étude des changements dans l'activité des gènes n'impliquant pas de modification de la séquence d'ADN et pouvant être transmis lors des divisions cellulaires. Contrairement aux mutations qui affectent la séquence d'ADN, les modifications épigénétiques sont réversibles (Source : Holliday, 1990).

Génétique : Science du vivant qui étudie la variation et la transmission des caractères héréditaires. La génétique quantitative, socle théorique des activités d'amélioration génétique, s'intéresse aux caractères dont l'observation passe par une mesure, dont la variation est généralement continue et due à l'action de nombreux gènes (déterminisme génétique complexe) (Source : [http : //silico.biotoul. fr/site/images/e/e0/Genetique-quantitative.pdf](http://silico.biotoul.fr/site/images/e/e0/Genetique-quantitative.pdf)).

Génomique : Discipline dont l'objectif est l'étude exhaustive des génomes, en particulier de l'ensemble des gènes, de leur disposition sur les chromosomes, de leur séquence, de leurs fonctions, de leurs rôles et de leur évolution (Source : Bidanel *et al.*, 2008)

Résilience : Aptitude d'un animal ou d'un système à absorber et/ou répondre à des perturbations, en particulier à des perturbations soudaines et imprévisibles (par exemple de nature nutritionnelle ou sanitaire), en mobilisant des capacités tampon (réallocation temporaire de ressources), d'adaptation ou de transformation permises par la complémentarité et/ou la redondance fonctionnelle entre les composantes du système. Elle est représentée par la trajectoire du système qui rend compte de l'importance de la déviation par rapport à l'état initial, et de la cinétique de rétablissement vers cet état initial ou un nouvel état d'équilibre (Sources : Darnhofer, 2014 ; Sauvart et Martin, 2010 ; Dumont *et al.*, 2020b).

Résistance (d'un animal à un agent infectieux) : Ensemble des mécanismes qui limitent la reproduction d'un agent pathogène au sein d'un hôte, en empêchant l'entrée du pathogène dans l'hôte, ou en freinant sa réplication (Source : Doeschl-Wilson et Kyriazakis, 2012).

Robustesse (d'un animal) : Un animal robuste est celui qui maintient son aptitude à transmettre ses gènes à la génération suivante, malgré diverses contraintes imposées par l'environnement (disponibilité des ressources, pression infectieuse . . .). Pour les animaux domestiques d'élevage, les fonctions de reproduction (fertilité, prolificité), de production (de lait, de viande, de descendants viables . . .) et de santé déterminent la longévité de l'individu dans le troupeau. En conséquence, un animal d'élevage robuste est capable de maintenir ses fonctions de (re) production et un état de santé jugé acceptable à l'échelle de sa vie dans une grande variété d'environnements (Sources : Blanc *et al.*, 2013 ; Knap, 2005).

Système d'élevage : Ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé par l'homme en fonction de ses objectifs, pour faire produire (lait, viande, cuirs et peaux, travail, fumure . . .) et se reproduire un collectif d'animaux domestiques en valorisant et renouvelant différentes ressources (Source : Dedieu *et al.*, 2008).

Système alimentaire : Ensemble des règles de fonctionnement, des modes d'organisation, des technologies et des pratiques qui déterminent les modes de consommation, de production, de transformation, de conditionnement, de stockage et de distribution des biens alimentaires. Des systèmes alimentaires durables assurent la sécurité alimentaire pour tous sans compromettre celle des générations futures. L'agroécologie vise à assurer la sécurité alimentaire au niveau des territoires tout en contribuant à leur durabilité sociale et au bien-être des populations locales (Source : Plumecocq, 2018 *in* Dictionnaire d'Agroécologie).

Tolérance (d'un animal à un agent infectieux) : Capacité de l'hôte (d'un animal) à limiter les effets négatifs (réduction des performances zootechniques telles que la croissance, l'efficacité alimentaire, la production de lait ou d'œufs, la fertilité) d'une infection (infestation) par un agent pathogène, sans affecter la charge infectieuse (Source : Doeschl-Wilson et Kyriazakis, 2012).

Transition (agroécologique) : Processus par lequel les principes qui régissent un système sont modifiés de façon radicale, entraînant un ensemble de changements concernant autant les valeurs des acteurs que les techniques qu'ils utilisent [. . .] (Source : Hazard, 2017 *in* Dictionnaire d'Agroécologie).

de la densité d'animaux dans des bâtiments sans accès à l'extérieur ni lumière naturelle, mutilations comme la coupe des queues ou la castration à vif des porcelets ou l'épointage du bec chez les volailles, transport sur des distances importantes avant l'abattage, élimination systématique de l'un des deux sexes dans certaines filières, par exemple (Fraser et Nations, 2005). Sur le plan socio-économique, l'agrandissement, la spécialisation des exploitations et la recherche d'efficacité par la baisse continue des coûts de production se sont accompagnés d'un accroissement du niveau moyen d'endettement des éleveurs. Ces changements, couplés à certaines évolutions politiques, économiques et commerciales (mondialisation, dérégulations induisant une instabilité de certains marchés, modification des rapports de force au sein des filières) ont également conduit à une précarisation accrue de nombreux éleveurs français et européens (Nozières-Petit *et al.*, 2016). Enfin, le recours important aux médicaments, et en particulier aux antibiotiques, a contribué à l'émergence d'agents pathogènes résistants, constituant une menace sérieuse pour la santé publique nécessitant la mise en œuvre, dès les années 2010, de politiques publiques visant à en réduire l'usage (David *et al.*, 2019).

Pour toutes ces raisons, l'élevage européen est aujourd'hui confronté à une crise de légitimité environnementale, sociale et économique sans précédent, et doit évoluer en profondeur (Peyraud *et al.*, 2019).

La nature des évolutions à envisager dépend des objectifs que l'on assigne aux activités d'élevage, et agricoles plus globalement. Selon la Commission Européenne, l'évolution de l'agriculture au *xxi*^e siècle, incluant l'élevage, doit se traduire par l'émergence de **systèmes alimentaires** durables, équitables, sains et respectueux de l'environnement. C'est l'ambition de la stratégie « De la ferme à la table » qui est au cœur du nouveau « Pacte Vert Européen » devant orienter les politiques publiques européennes au cours des prochaines décennies (European Union, 2020). Ces objectifs sont proches de ceux de l'agroécologie,

définie par Gliessman (2006) comme l'application de principes d'écologie et de principes sociaux à la conception et à la gestion de systèmes agricoles et alimentaires durables. L'agroécologie vise ainsi à (ré) inventer une agriculture durable, écologiquement saine, économiquement viable et socialement juste (Wezel et Jauneau, 2011), en proposant des voies de transformation des systèmes agricoles et alimentaires pensées sur le long terme et prenant en compte leurs multiples dimensions (FAO, 2018). De tels systèmes agroécologiques (1) recourent de façon accrue aux régulations biologiques, sont productifs mais moins dépendants des intrants que ne le sont les systèmes classiques, (2) sont liés à leur environnement physique et cherchent à valoriser les interactions entre les composantes du système, (3) considèrent la biodiversité comme une ressource et cherchent à la préserver, et (4) placent la production alimentaire, l'intégrité de l'agro-écosystème et du système alimentaire au même niveau de priorité.

Dans un travail dédié spécifiquement à l'élevage, Dumont *et al.* (2013) ont proposé un cadre conceptuel permettant de structurer les réflexions visant une **transition agroécologique des systèmes d'élevage**. Ce cadre conceptuel s'articule autour des cinq principes suivants :

(1) Développer des pratiques de gestion intégrée pour améliorer la santé des animaux.

(2) Potentialiser l'utilisation des ressources naturelles et des coproduits pour diminuer les intrants nécessaires à la production.

(3) Optimiser le fonctionnement des systèmes d'élevage pour réduire les pollutions.

(4) Gérer la diversité des ressources et la complémentarité des animaux pour renforcer la **résilience** des systèmes d'élevage.

(5) Adapter les pratiques d'élevage de manière à préserver la biodiversité et à assurer les services écosystémiques associés.

Dans la suite de cet article (partie 1), nous examinerons dans quelle mesure la **génétique** animale³ peut contribuer à chacun des principes proposés par Dumont *et al.* (2013). Nous verrons ensuite (partie 2) que les contributions passées et actuelles ne concernent le plus souvent qu'un seul ou quelques principes, alors qu'il est nécessaire de les mobiliser conjointement pour sortir de la crise environnementale, sociale et économique évoquée précédemment. Nous verrons également que la plupart de ces contributions visent un niveau de transition (ou de modernisation) agroécologique « faible » (Duru *et al.*, 2014). Nous montrerons qu'intégrer le niveau de transition « forte », c'est-à-dire contribuer à la reconception des systèmes d'élevage en conduisant des projets de recherche et de développement en génétique pensés dans ce but, est un enjeu important.

1. Contributions de la génétique animale aux principes d'agroécologie pour l'évolution des systèmes d'élevage

■ 1.1. Développer des pratiques de gestion intégrée pour améliorer la santé des animaux

Une gestion « intégrée » de la santé consiste à combiner des actions de prévention et de soin aux animaux, en cherchant à limiter le recours aux médicaments (Fortun-Lamothe et Savietto, 2017). Ces actions peuvent cibler : (1) le milieu de vie et les méthodes de conduite des animaux, (2) les agents pathogènes, par la vaccination et l'utilisation ciblée des traitements médicamenteux, et (3) les animaux (hôtes) eux-mêmes, qui, en fonction de leur génotype, sont plus ou moins **résistants, tolérants, et/ou résilients**. C'est naturellement sur le troisième volet que s'est focalisée jusqu'à présent

3 Génétique animale prise ici dans son sens le plus large : nous considérerons dans cet article les activités de recherche en génétique et génomique, ainsi que les activités d'amélioration génétique des populations animales.

l'attention des généticiens, en lien avec l'évolution des approches concernant les deux autres champs d'expertise.

Ce domaine de recherche mobilise actuellement une communauté scientifique importante, conduisant à une production scientifique conséquente. Les travaux réalisés concernent des maladies bien caractérisées d'un point de vue clinique et étiologique, comme les mammites chez les ruminants laitiers (encadré 2), le parasitisme gastro-intestinal chez les ovins (Moreno-Romieux *et al.*, 2017) et le cheval (Kornas *et al.*, 2015), les pathologies respiratoires chez le lapin (Shrestha *et al.*, 2020) et le porc (Boddicker *et al.*, 2014), différentes maladies bactériennes ou virales chez la truite (Fraslin *et al.*, 2019), la coccidiose ou le portage de salmonelles chez le poulet (Tran *et al.*, 2012). Ils concernent aussi des maladies dont l'étiologie est moins bien connue, comme les encéphalopathies spongiformes subaiguës transmissibles, ou encore des troubles de santé non spécifiques (Gunia *et al.*, 2018). Ils visent à comprendre les mécanismes impliqués dans la résistance des hôtes, à vérifier la spécificité ou l'universalité de ces résistances (face à différentes espèces ou souches d'agents infectieux), et à évaluer le risque de portage asymptomatique ou de contournement de résistance par les agents pathogènes. D'autres travaux ont pour but d'évaluer les modalités et l'efficacité de programmes de sélection visant à réduire l'incidence de certaines maladies telles que le parasitisme gastro-intestinal (Aguerre *et al.*, 2018) ou les mammites (encadré 2). Enfin, certains travaux cherchent à définir des critères originaux de **robustesse** pouvant être sélectionnés et susceptibles de contribuer à l'amélioration de l'état de santé des animaux, ou au maintien d'un bon état de santé durant certaines phases critiques d'élevage (Revilla *et al.*, 2019).

Une autre stratégie susceptible d'améliorer la résistance aux maladies infectieuses des animaux d'élevage consiste à intégrer dans les programmes de sélection un panel de critères permettant d'évaluer la compétence immunitaire globale des animaux. D'assez nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine, notamment chez la poule, le lapin et le porc (Mach *et al.*, 2013). Ces

Encadré 2. Résistance génétique aux mammites : état des lieux et mécanismes.

Les mammites sont des inflammations de la mamelle, provoquées essentiellement par des bactéries, principalement des staphylocoques.

Les premières recherches en génétique sur les mammites des ruminants laitiers ont consisté à quantifier la variabilité génétique de la résistance à l'aide d'indicateurs de l'état inflammatoire de la mamelle (comptages de cellules somatiques) ou de l'occurrence de cas cliniques, des indicateurs facilement mesurables à grande échelle (Rupp et Boichard, 2003). Une évaluation génétique des reproducteurs a rapidement été mise en place dans les principales races laitières (production d'index génétiques pour les comptages de cellules somatiques ou l'occurrence de cas cliniques) et ces caractères ont été intégrés aux objectifs de sélection en France, en concertation avec les organismes de sélection, durant les années 2000 (bovins), 2005 (ovins) et 2016 (caprins).

En parallèle, des approches de biologie intégrative transdisciplinaires (immunogénétique, physiologie, transcriptomique) ont été mises en place autour de dispositifs originaux de sélection divergente conduits dans différentes unités expérimentales. Ces travaux ont permis en premier lieu de démontrer concrètement l'efficacité de la sélection basée sur les comptages de cellules somatiques, associée à une diminution de la fréquence des infections et de la quantité de bactéries dans les laits dans les modèles ovin (Rupp *et al.*, 2009) et caprin (Rupp *et al.*, 2019), et ainsi d'infirmier l'hypothèse qu'une telle sélection conduirait à une immunité dégradée des animaux. Ces lignées expérimentales ont également permis d'étudier les fonctions biologiques sous-tendant la différence de résistance dans les lignées expérimentales produites. Les analyses du transcriptome de différents types cellulaires des brebis de la sélection divergente (Bonfont *et al.*, 2012) confirment l'importance des mécanismes immunitaires dans le déterminisme génétique de la résistance aux mammites, et notamment la migration des cellules immunitaires (du sang vers le tissu infecté) et la régulation du processus inflammatoire chez les brebis résistantes.

De plus, des données transcriptomiques complémentaires en caprins (Cremonesi *et al.*, 2012) et la méta-analyse de plusieurs dispositifs (Genini *et al.*, 2011) ont mis en évidence l'implication de voies de biosynthèse des lipides dans la réponse anti-infectieuse et ouvert la voie à l'étude des compromis entre immunité et caractères de production. Ces premiers éléments, ainsi que l'émergence de questionnements sur les capacités d'adaptation des animaux en situation de stress, ont motivé l'étude de la modulation de la résistance génétique aux mammites en relation avec le stress énergétique d'origine alimentaire. Les travaux de Bouvier-Muller *et al.* (2018) ont clairement établi un lien entre immunité et métabolisme énergétique dans le cadre des mammites. Ces résultats ont conforté l'importance des notions de compromis et synergies entre fonctions biologiques d'un animal, et de la prise en compte des conditions de milieu pour étudier et optimiser l'approche génétique.

Enfin, l'accès aux outils de génotypage à haut débit (puces à ADN) a permis d'explorer plus finement le déterminisme génétique du caractère de résistance aux mammites et d'identifier, dans la race Lacaune, une mutation dans le gène *SOCS2* qui explique près de 20 % de la variabilité génétique du caractère (Rupp *et al.*, 2015). La validation et la caractérisation fonctionnelle détaillée de ce gène ont mis en lumière ses effets multiples, puisque la mutation associée à une grande sensibilité aux mammites est également responsable d'effets positifs sur la production laitière et sur la croissance (Oget *et al.*, 2019a). La mutation *SOCS2* représente actuellement un modèle d'étude de la pléiotropie et des modalités de mise en œuvre d'une sélection équilibrée lorsque plusieurs caractères désirables présentent des compromis fonctionnels (Oget *et al.*, 2019b).

travaux ont évolué ces dernières années pour tenir compte du rôle que jouent les microorganismes symbiotiques (au niveau intestinal, mais aussi cutané, respiratoire ou mammaire...) dans la régulation de la réponse immunitaire de l'hôte et développer le concept « d'holobionte » (Calenge *et al.*, 2014).

En matière de santé, il convient également de citer ici l'ensemble des travaux conduits pour comprendre l'origine et

gérer les affections héréditaires qui sont en ségrégation dans les populations en sélection⁴. La plupart des anomalies décrites sont dues à des mutations d'un seul gène, à effet souvent (mais pas systématiquement) récessif, qui s'accompagnent d'anomalies fonctionnelles et/ou morphologiques pouvant

4 Des exemples peuvent être consultés sur le site de l'ONAB, Observatoire National des Anomalies Bovines : www.onab.fr

avoir des effets létaux. En France, de nombreux résultats ont été obtenus ces dernières années chez les bovins dans le cadre de l'ONAB (Bourneuf *et al.*, 2017). Des travaux comparables sont réalisés chez le porc, le cheval et les petits ruminants (Fabre *et al.*, 2020).

Ces différents travaux se poursuivent et s'inscrivent sur le long terme. Beaucoup de connaissances restent en effet à acquérir sur ces sujets. Ils s'enrichiront progressivement de nouvelles données liées au déploiement, dans les infrastructures expérimentales et dans les élevages commerciaux, de technologies innovantes associées à l'élevage de précision (Faverdin *et al.*, 2020). Ces nouvelles données devraient permettre de décrire plus finement les mécanismes physiopathologiques et les relations entre santé et bien-être. Elles sont également essentielles pour mieux comprendre les interactions génotype×milieu qui sont susceptibles d'être importantes pour ces caractères de résistance, résilience et/ou tolérance (Phocas *et al.*, 2017).

Des travaux pourraient également être initiés ou amplifiés dans d'autres domaines, relativement variés :

- L'étude du rôle de l'**épigénétique** dans la régulation des interactions entre hôtes et agents pathogènes et de la réponse immunitaire (Zhang et Cao, 2019) pourrait faire l'objet de programmes de recherches importants au cours des années à venir.

- Les relations entre immunocompétence et résistance (ou tolérance) devraient être plus systématiquement et précisément étudiées.

- À partir des nouvelles connaissances acquises sur les bases biologiques de la résistance et/ou de la tolérance et des interactions entre hôtes et agents pathogènes, de nouveaux travaux de modélisation pourraient contribuer à une meilleure appréhension des effets zootechniques, épidémiologiques et économiques de la sélection. La modélisation mathématique serait aussi un moyen de prédire ou d'explorer les différentes façons de conjuguer efficacement la sélection à d'autres stratégies de contrôle des maladies (Bishop, 2010).

- Une attention accrue pourrait être accordée à l'avenir aux déterminants génétiques et épigénétiques des maladies métaboliques « non transmissibles » (telles que la cétose chez les vaches laitières, par exemple).

- De nouveaux travaux visant à mieux comprendre les capacités d'adaptation des animaux à différentes sources de stress abiotiques susceptibles d'induire des troubles de santé (variations de température par exemple) devraient être entrepris. L'aptitude à faire face à des sources variées de stress biotiques et abiotiques doit être considérée dans une perspective de développement de systèmes d'élevage reposant sur un accès à l'extérieur des animaux, ou, plus généralement, sur des environnements moins contrôlés en lien avec un recours réduit aux intrants (voir le chapitre 1.2).

- Les travaux en cours visant à mieux comprendre l'influence de l'environnement précoce sur la construction et la variabilité des phénotypes, et sur les capacités d'adaptation des animaux à leur milieu (mettant en œuvre des mécanismes épigénétiques notamment) devraient être poursuivis (Pitel *et al.*, 2019). De tels travaux pourraient en effet déboucher sur des propositions de conduites innovantes susceptibles d'améliorer la robustesse ou la résilience des systèmes d'élevage à bas niveaux d'intrants.

- Enfin, la valorisation des nouvelles techniques de modification ciblée (ou « d'édition ») des génomes (CRISPR-Cas9 et autres nucléases programmables ; Ducos *et al.*, 2017) pourrait aussi être envisagée pour améliorer la résistance des animaux à des agents infectieux divers, dans une perspective de gestion intégrée de la santé. Ce point particulier est discuté à l'**encadré 3**.

■ 1.2. Potentialiser l'utilisation des ressources naturelles et des coproduits pour diminuer les intrants nécessaires à la production

Le développement des systèmes d'élevage au xx^e siècle s'est accompagné d'une augmentation importante des intrants mobilisés pour la production.

Parmi ceux-ci, les intrants alimentaires ont une importance toute particulière, pour au moins deux raisons. La première tient au volume global considérable des productions végétales mobilisées par l'élevage, induisant une compétition importante entre alimentation animale et humaine (Herrero *et al.*, 2015). Dans un contexte de forte croissance démographique mondiale et de réchauffement climatique, maîtriser et si possible réduire cette emprise très forte de l'élevage sur les ressources naturelles est un enjeu crucial. La deuxième raison tient à la part généralement importante que représente l'alimentation dans le coût de production des animaux, en particulier des monogastriques (65 % en élevage porcin conventionnel par exemple), qui fragilise les exploitations d'un point de vue économique. Dans un contexte de marchés souvent difficile et très fluctuant, la maîtrise du coût alimentaire est une priorité forte pour beaucoup d'éleveurs. Cette maîtrise passe par la mobilisation de plusieurs leviers.

L'un de ces leviers, intéressant les généticiens depuis des décennies, est l'amélioration de l'**efficacité alimentaire** des animaux (Phocas *et al.*, 2014). Des travaux essentiels visant à comprendre le déterminisme et quantifier la variabilité génétique de différents critères d'efficacité alimentaire tels que l'**indice de consommation**, la **consommation moyenne journalière résiduelle**, la vitesse de croissance en situation de restriction alimentaire ou l'efficacité digestive, ont été engagés de longue date. La recherche de biomarqueurs, déterminante pour ce type de caractères difficiles et coûteux à évaluer, fait l'objet d'un effort de recherches important. Enfin, d'autres travaux visant à analyser les **compromis (trade-off)** et synergies entre efficacité alimentaire et robustesse, ou à élaborer des méthodes pertinentes de sélection pour ce type de caractères, sont en cours. Toutes ces recherches ont donné lieu à une importante production scientifique, dans différentes espèces : le porc (Gilbert *et al.*, 2017), le lapin (Drouilhet *et al.*, 2013), le poulet (Mignon-Grasteau *et al.*, 2020), les bovins allaitants (Martin *et al.*, 2019), et les ovins allaitants (Tortereau *et al.*, 2020), par exemple. Une amélioration

Encadré 3. Agroécologie ou technologies, faut-il choisir ?

La transition agroécologique des systèmes d'élevage nécessite une compréhension fine des régulations complexes qui s'opèrent en leur sein. Produire les connaissances nécessaires à cette compréhension et à la *conception* de systèmes pertinents implique un effort de recherche conséquent, et peut bénéficier des avancées technologiques les plus récentes dans des domaines variés (électronique, numérique, biotechnologies...). Certaines technologies peuvent par ailleurs jouer un rôle utile dans le *pilotage* des systèmes. C'est le cas, par exemple, de celles permettant de réaliser un suivi précis et en temps réel de l'état du système ou de son environnement, offrant la possibilité de détecter précocement certains dysfonctionnements et d'améliorer l'utilisation des ressources : approches d'élevage et de médecine « de précision ». Une utilisation réfléchie des nouvelles technologies, au moins de certaines, n'est donc pas incompatible avec l'évolution agroécologique des systèmes agricoles et d'élevage, à condition qu'elle ne compromette pas l'autonomie des agriculteurs/éleveurs et qu'elle n'induise pas chez ces derniers une charge mentale trop importante.

Cas particulier des nouvelles biotechnologies du génome : quelle place peuvent-elles prendre dans la transition agroécologique des systèmes d'élevage ?

De nouvelles techniques de « *genome editing* », permettant la réalisation de modifications ciblées (ou « réécriture ») des génomes de toutes les espèces d'intérêt agronomique, ont été mises au point au début des années 2010 (voir la synthèse de Ducos *et al.*, 2017). Ces techniques (CRISPR-Cas9 et autres nucléases programmables) sont souvent présentées comme incontournables pour relever les grands défis auxquels l'élevage devra faire face à l'avenir : gérer efficacement la santé des animaux en limitant le recours aux médicaments, réduire l'empreinte écologique des élevages, s'affranchir de pratiques constituant des atteintes graves au bien-être des animaux, par exemple. Si la relative simplicité et l'efficacité de ces nouvelles techniques ouvrent des perspectives indiscutablement très importantes, leur application commerciale en élevage soulève de multiples questions, de nature technique et/ou éthique (Le Roy *et al.*, 2019 ; Ducos, 2020).

Certaines réalisations récentes ont été fortement médiatisées, en particulier celles concernant la santé. C'est le cas, par exemple, de la production de porcs dont l'un des gènes (CD163) a été altéré de façon à les rendre résistants à une maladie virale pour laquelle les méthodes « classiques » de lutte sont peu efficaces, et qui est responsable de pertes économiques considérables à l'échelle mondiale (le SDRP, ou Syndrome Dysgénésique et Respiratoire Porcin, PRRS en anglais). Certains résultats publiés montrent que de tels animaux, produits par manipulation génétique d'embryons et/ou de cellules somatiques en culture (suivie dans ce cas de clonage par transfert de noyau), sont résistants à différentes souches virales. Selon les auteurs de ces études, leur commercialisation, techniquement envisageable à court terme, constituerait une réponse efficace et rapide à ce problème majeur de santé animale, réponse *a priori* compatible avec le principe agroécologique de gestion intégrée de la santé. Cependant, utiliser des animaux génétiquement modifiés temporairement résistants à une (ou des) maladie(s) sans remettre en question les éléments de conception des systèmes d'élevage qui constituent les causes principales de la sévérité et/ou de la récurrence de ces maladies (concentration géographique des élevages, fortes densités d'animaux élevés en claustration, faible diversité génétique de ces animaux, recherche de performances zootechniques très élevées...), nous semble assez orthogonal avec les principes fondamentaux de l'agroécologie. Cela pourrait par ailleurs conduire à retarder la nécessaire transition de ces systèmes, dont la prédisposition à certaines maladies n'est pas le seul point faible.

Une réflexion plus globale sur la place et le rôle des innovations technologiques dans la transition vers un système alimentaire durable a été proposée par Herrero *et al.* (2020).

très importante de ces critères d'efficacité alimentaire a été réalisée, dont environ la moitié, chez le porc par exemple, serait imputable au progrès génétique, l'autre partie provenant de l'amélioration de la composition des aliments et des stratégies et techniques d'alimentation et de logement, notamment. La plupart de ces travaux ont été conduits avec des aliments optimisés de haute valeur nutritionnelle. D'autres

visaient à étudier l'efficacité alimentaire et/ou digestive des animaux en présence de ressources alimentaires de moindre qualité, par exemple chez le poulet (Mignon-Grasteau *et al.*, 2004) et le porc (Déru *et al.*, 2020), ou ayant un impact réduit sur l'environnement et la biodiversité, par exemple chez la truite (Callet *et al.*, 2017). Ces travaux se poursuivent aujourd'hui en incluant l'étude du microbiote digestif

(Borey *et al.*, 2020 ; Aliakbari *et al.*, 2021) et d'autres sources d'hérédité non génétiques telles que l'épigénétique, le comportement et les interactions sociales (David *et al.*, 2020), mais aussi le comportement alimentaire, l'activité des animaux et leur réponse au stress, les émissions de gaz à effets de serre (Renand *et al.*, 2019) et les rejets d'azote et de phosphore dans les effluents (Saintilan *et al.*, 2013), ou encore la capacité des animaux à mobiliser et reconstituer leurs réserves corporelles (Mace *et al.*, 2018). Beaucoup de ces travaux ont bénéficié des évolutions importantes réalisées ces dernières années au niveau des technologies de phénotypage (consommations individuelles d'aliment et d'eau par des animaux élevés en groupe et/ou au sol, mesures d'émissions de méthane et de digestibilité individuelles rendues possibles sur de grands nombres d'animaux, par exemple).

De nouveaux travaux seront nécessaires pour étudier la génétique de l'adaptation à des régimes alimentaires en plus forte rupture, beaucoup moins basés sur les céréales et oléo-protéagineux directement valorisables par l'Homme. Ceci sera particulièrement important à envisager chez les monogastriques, et chez le porc en particulier. Ces animaux sont en effet susceptibles de valoriser des sources de biomasse peu ou pas du tout exploitées jusqu'à présent, comme par exemple (1) des produits de cultures ou d'intercultures présentant un intérêt agronomique et difficilement valorisables par l'Homme ou d'autres espèces d'élevage, (2) des coproduits d'industries agricoles et agroalimentaires, et (3) les déchets de restauration au potentiel considérable, mais qui nécessiteraient une évolution de la réglementation pour être exploités (Rauw *et al.*, 2020). Une étude approfondie des impacts de l'usage de ce type de matières premières sur la santé et le bien-être digestif des animaux, ainsi que des interactions génotyp-alimentation, devrait être réalisée. Chez les ruminants, laitiers notamment, les études pourront porter sur le déterminisme et la variabilité génétique de critères caractérisant les aptitudes à valoriser de façon efficace les fourrages grossiers d'origines plus diverses

qu'actuellement, de qualité moindre et variable, et dont la disponibilité sera soumise à une plus grande variabilité interannuelle, en raison notamment du changement climatique (Dellar *et al.*, 2018).

L'énergie, l'eau et les hormones sont d'autres intrants très utilisés en élevage. L'énergie est par exemple utilisée pour maîtriser l'ambiance dans les bâtiments d'élevage. Mieux comprendre les bases génétiques de la thermorégulation (Gourdine *et al.*, 2019), de l'aptitude des animaux à rester performants dans une large gamme de températures, est important dans une perspective de réduction des dépenses énergétiques (fluides), et, plus largement, de réduction de l'usage des énergies fossiles dans les élevages. Les hormones sont très largement utilisées pour le contrôle de la reproduction dans beaucoup de filières, voire indispensables pour maintenir certains types de conduite, telles que la conduite en bandes chez le porc ou la production à contre saison chez les petits ruminants. Elles sont aussi cruciales pour la création et la diffusion du progrès génétique dans la grande majorité des schémas de sélection. La recherche d'alternatives à l'utilisation d'hormones en élevage a fait l'objet d'assez nombreux travaux de la part des physiologistes (Pellicer-Rubio *et al.*, 2019). Comparativement, la contribution des généticiens à ce sujet est plus limitée. On peut néanmoins mentionner les travaux portant sur le contrôle génétique de l'aptitude au désaisonnement et la réponse à l'effet bélier des brebis (Maatoug-Ouzini *et al.*, 2013), ou la réceptivité des lapines (Theau-Clement *et al.*, 2015).

Diminuer les intrants en considérant la durée de vie totale des animaux au sein des élevages peut aussi s'envisager *via* la réduction des pertes associées à la production, qui sont assimilables à un gaspillage de ressources. Par exemple, améliorer la précocité sexuelle permettrait d'envisager, chez les bovins allaitants, une mise à la reproduction plus précoce des génisses, donc une réduction du temps de vie improductif et de l'importance des ressources agricoles mobilisées par l'élevage des animaux de renouvellement. Améliorer la longévité

des femelles reproductrices comme les vaches laitières, les truies, les lapines ou les poules pondeuses permettrait de réduire le taux de renouvellement des troupeaux, et épargnerait de nombreuses vies animales (et les ressources mobilisées pour les produire). Réduire les taux de mortalité aux différents âges contribuerait aussi à cet objectif, en évitant par ailleurs des souffrances animales. Comprendre le déterminisme et connaître la variabilité génétique de ces caractères dans les différentes populations sélectionnées et dans différents types de systèmes, en cherchant à comprendre l'origine d'éventuels compromis entre fonctions biologiques, est à ce titre important. Les recherches dans ce domaine devront être poursuivies.

■ 1.3. Optimiser le fonctionnement des systèmes d'élevage pour réduire les pollutions

Si on ne retient, en première approche, que la fin de l'énoncé de ce 3^e principe (« réduire les pollutions »), on peut considérer qu'une partie des travaux évoqués au point précédent, visant à réduire les intrants par unité de production, sont aussi des voies intéressantes pour réduire les pollutions que représentent les effluents d'élevage ou les émissions de gaz à effets de serre, par exemple.

Certains scientifiques envisagent le recours aux biotechnologies du génome dans cet objectif. Par exemple, dès la fin des années 1990, des chercheurs canadiens et danois ont entrepris la production de porcs transgéniques intégrant dans leur génome des gènes codant une phytase bactérienne. Ils ont montré que ces animaux valorisaient efficacement le phosphore apporté par les phytates végétaux de l'alimentation (d'ordinaire très mal absorbés) et nécessitaient, de ce fait, une complémentation réduite en phosphates minéraux biodisponibles. La charge polluante de leurs effluents s'en trouvait considérablement réduite (Golovan *et al.*, 2001). Des travaux comparables ont été reproduits récemment par Zhang *et al.* (2018), et d'autres, valorisant les nouvelles techniques de modification ciblée des génomes, pourraient rapidement suivre. L'évaluation

de ce type d'approche par rapport à l'utilisation de phytases microbiennes incorporées dans l'alimentation, ou par rapport à des interventions visant à sélectionner un microbiote plus efficace, par exemple, reste à faire.

Toutefois, considéré dans sa globalité, le principe « d'optimisation du fonctionnement des systèmes d'élevage » renvoie plutôt à la notion de « bouclage des cycles » au sein de systèmes diversifiés composés d'éléments complémentaires (Peyraud *et al.*, 2015). Les systèmes de polyculture-élevage, ou polyculture-polyélevage, lorsqu'ils sont très intégrés comme ils ont pu l'être en Europe avant le mouvement massif de spécialisation qui s'est opéré au xx^e siècle, sont emblématiques de ce 3^e principe. Ce sont des systèmes largement autonomes, recourant peu aux intrants, avec des niveaux de couplage forts entre productions végétales et animales (Bonaudo *et al.*, 2014, Coquil *et al.*, 2019). Les recherches nécessaires pour les promouvoir concernent principalement ce qui relève de la conception des systèmes elle-même (à l'échelle de l'entreprise agricole et/ou du territoire ; Ryschawy *et al.*, 2017). Les contributions de la génétique animale à ces recherches ont été relativement limitées jusqu'à présent. Les travaux visant à faire évoluer les objectifs de sélection dans le but de disposer d'animaux plus autonomes, adaptables et robustes, susceptibles de valoriser des ressources hétérogènes produites localement (pâturage, résidus de récolte, cultures fourragères variées intégrées dans des rotations longues...), ou visant à identifier des ressources génétiques (races et/ou croisements) présentant ces caractéristiques, en font néanmoins partie (Phocas *et al.*, 2017).

■ 1.4. Gérer la diversité des ressources et la complémentarité des animaux pour renforcer la résilience des systèmes d'élevage

L'expérience du troupeau ovin allaitant du domaine expérimental INRAE de la Fage (Aveyron, France) est souvent citée comme exemple d'application réussie de ce 4^e principe (pour

la dimension « complémentarité animaux – ressources » ; Thomas *et al.*, 2014). Le cycle de production animale (production d'agneaux à partir d'un troupeau de 280 brebis allaitantes conduites en plein air intégral) et le système d'alimentation (pâturage sur parcours et cultures fourragères) ont en effet été pensés et organisés pour que les besoins des animaux et les ressources offertes par le système soient en adéquation, notamment pendant la période de reproduction. Cela permet de minimiser les intrants nécessaires à la production, de préserver un milieu riche en biodiversité, et de générer un revenu stable et satisfaisant. Ce succès repose en partie sur le génotype des animaux retenus pour cette expérimentation. Les brebis de race Romane, lignée composite issue de croisements Berrichon du Cher x Romanov, disposent en effet de très bonnes capacités de mobilisation et de reconstitution de leurs réserves corporelles, permettant de faire face aux fluctuations importantes des ressources fourragères au cours de l'année (González-García *et al.*, 2014), et de caractéristiques de toison permettant une bonne survie des agneaux (Allain *et al.*, 2014). Ces capacités/caractéristiques ont une base génétique, ce qui permet d'envisager leur sélection pour ce type de système (Mace *et al.*, 2018). Cet exemple illustre bien l'intérêt d'intégrer une composante génétique dès la phase de conception des systèmes d'élevage innovants et des expérimentations visant à les étudier.

Au-delà de cet exemple particulier et de la dimension « complémentarité » entre animaux et ressources, l'idée générale du 4^e principe est de raisonner la diversité au sein des systèmes dans le but d'accroître leur résilience. L'hypothèse sous-jacente est qu'une diversité bien pensée, d'un point de vue biologique/génétique, technique, organisationnel, ou structurel, renforcerait la résilience des systèmes d'élevage (encadré 1). Par exemple, la variabilité interindividuelle au sein d'un troupeau mono-spécifique (mono- ou multi-racial) pourrait être une source de résilience face aux variations des conditions d'élevage si tous les animaux ne géraient pas les compromis entre fonctions de la même façon, et ne mettaient pas en jeu

les mêmes mécanismes d'adaptation à des contraintes particulières. La diversité intra-troupeau pourrait d'autre part favoriser l'immunité de groupe et l'immunité sociale, définie comme le service immunitaire rendu par un animal à d'autres animaux. Associer plusieurs espèces animales au sein d'un même système peut également présenter de multiples intérêts : (1) valorisation de ressources alimentaires différentes, ou avec des temporalités différentes, si les besoins, les stratégies et les comportements alimentaires des espèces élevées en association sont différents et complémentaires ; (2) baisse de la compétition pour l'accès à certaines ressources ; (3) effets favorables sur la dynamique épidémiologique de certaines maladies (parasitisme ; mais risque concomitant éventuel de transmission croisée d'autres agents infectieux) et sur la biodiversité des surfaces fourragères ; (4) sécurisation des revenus (Magne *et al.*, 2019 ; Mahieu *et al.*, 2020 ; Martin *et al.*, 2020).

Si un nombre important de travaux ont été conduits dans le domaine des productions végétales pour explorer les liens entre diversité, résilience et multi-performance, ils restent relativement rares dans le domaine des productions animales (Dumont *et al.*, 2020b ; Doré et Bellon, 2019). Comme résumé dans le rapport issu de la réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie conduite à INRAE (Caquet *et al.*, 2019), les enjeux cognitifs sont néanmoins importants et nombreux. Il s'agit notamment :

(1) D'évaluer précisément la contribution de la diversité génétique animale à la (multi) performance et à la résilience des systèmes agroécologiques, intégrant l'analyse des relations entre diversité et services écosystémiques (Leroy *et al.*, 2018).

(2) De mieux comprendre les mécanismes d'action de cette diversité, ainsi que l'effet de la gamme de diversité et de la gamme de variation environnementale sur l'amplitude des interactions génétique x environnement.

(3) D'identifier les caractères d'intérêt majeurs impliqués dans les interactions

entre animaux. Il s'agit notamment ici de modéliser l'influence d'un animal sur les performances des autres animaux au sein d'un même groupe.

(4) De définir la gamme de diversité permettant l'expression des mécanismes favorables au développement de systèmes de production plus résilients.

(5) De définir de nouveaux critères et développer de nouveaux programmes de sélection et de croisement innovants prenant en compte les objectifs de diversité génétique des animaux (voir aussi le chapitre suivant).

Ces enjeux indiquent qu'une contribution de la génétique animale au 4^e principe nécessite de dépasser les approches de sélection et de conduite d'élevage fondées sur la recherche d'un animal optimal aux performances calibrées pour des environnements d'élevage standardisés et contrôlés, et de s'inscrire dans des approches plus systémiques du fonctionnement des systèmes d'élevage.

■ 1.5. Adapter les pratiques d'élevage de manière à préserver la biodiversité et à assurer les services écosystémiques associés

Le 5^e principe du cadre conceptuel proposé par Dumont *et al.* (2013) considère la biodiversité sous l'angle (1) des écosystèmes et (2) des populations d'animaux d'élevage.

En premier lieu, l'application du 5^e principe doit conduire au déploiement de systèmes et de pratiques d'élevage n'ayant pas d'impacts négatifs sur la biodiversité des agroécosystèmes qu'ils mobilisent. Ces derniers comprennent ceux dans lesquels vivent les animaux, mais aussi ceux qui servent à la production des ressources alimentaires pour l'élevage. Actuellement, la voie principale pour favoriser la biodiversité des agroécosystèmes repose sur le redéploiement des prairies naturelles et l'extension des infrastructures agroécologiques (haies, arbres...), ainsi que l'adaptation des pratiques de valorisation des surfaces fourragères de façon à maintenir la biodiversité (Sabatier *et al.*,

2015). À l'inverse, des systèmes d'élevage mobilisant des ressources alimentaires produites à partir de déforestation massive, de monoculture, induisant des dégâts importants sur la végétation ou nécessitant un recours important aux pesticides, devraient être proscrits, étant donné le rôle prépondérant de ces pratiques dans l'effondrement de la biodiversité. Il est donc nécessaire que cet aspect soit intégré dans les recherches portant, par exemple, sur l'efficacité alimentaire des animaux. Dans l'ensemble, les recherches en génétique animale permettant de contribuer à ce 1^{er} volet du 5^e principe sont encore assez largement insuffisantes au regard du principe d'agroécologie qui considère que la production alimentaire et l'intégrité des agroécosystèmes se situent au même niveau de priorité.

Le 5^e principe inclut aussi des objectifs de préservation de la diversité des populations animales elles-mêmes, qualifiée de « biodiversité domestique », importante à considérer mais qui ne représente qu'une faible part de la biodiversité globale des agroécosystèmes. Dans ce domaine, la contribution des généticiens a été et restera importante. Des méthodes et outils permettant de quantifier, caractériser et gérer la diversité génétique au sein des populations (et entre populations) ont été développés de longue date, et sans cesse améliorés (Leroy *et al.*, 2013). Les populations commerciales en sélection comme les races locales ou patrimoniales ont été considérées. Ces travaux ont bénéficié de l'évolution considérable des outils d'analyse du génome ces dernières années (génotypage et séquençage). Parmi les contributions récentes de INRAE, on peut citer, par exemple, à l'échelle internationale (1) la coordination du projet européen IMAGE⁵, qui vise à améliorer la gestion des banques de gènes pour la conservation *ex-situ in-vitro* des ressources génétiques et à promouvoir leur usage (CRB-anim en France⁶), (2) la participation à des projets internationaux tels que « 1 000 génomes bovins » (Daetwyler *et al.*, 2014),

« 1 000 génomes Gallus » (Tixier-Boichard *et al.*, 2020) ou la coordination du projet « 1 000 génomes caprins » VARGOAT⁷, contribuant de façon très importante à l'amélioration des connaissances concernant la diversité génétique au sein des espèces concernées, (3) la caractérisation et l'évaluation génétique, zootechnique et économique de races porcines locales européennes (Muñoz *et al.*, 2019), et (4) les travaux de caractérisation de la diversité et de la structure des populations européennes d'abeilles (Parejo *et al.*, 2016) ou de populations internationales de chèvres (Stella *et al.*, 2018). À l'échelle nationale, on peut mentionner (1) l'étude de l'impact de la sélection génomique (sélection basée sur une évaluation génomique des candidats à la sélection ; Le Roy *et al.*, 2019) sur la diversité des trois principales races bovines laitières françaises (Doublet *et al.*, 2019), (2) l'élaboration d'une stratégie pour une politique de conservation des races avicoles locales (Chiron *et al.*, 2018), et (3) la caractérisation de la diversité génétique au sein de lignées de truites commerciales sélectionnées (D'Ambrosio *et al.*, 2019), par exemple. On pourrait ajouter à cet inventaire les développements méthodologiques réalisés pour (1) reconstruire l'histoire démographique des populations (Boitard *et al.*, 2016) et détecter les signatures de sélection (Paris *et al.*, 2019), (2) préserver la diversité génétique au sein de populations sélectionnées (Colleau *et al.*, 2017), ou encore (3) optimiser les accouplements en tenant compte des effets génétiques non additifs et de la consanguinité dans les espèces utilisées en croisement (González-Diéguez *et al.*, 2019).

2. Des travaux en génétique animale à la transition agroécologique des systèmes d'élevage

Le cadre conceptuel élaboré par Dumont *et al.* (2013), articulé autour des cinq principes détaillés plus haut,

est intéressant pour décliner de façon structurée les contributions de la génétique animale à la transition agroécologique des systèmes d'élevage. Cette analyse présente néanmoins certaines limites qui sont discutées ci-dessous.

■ 2.1. Vers une mobilisation conjointe et équilibrée des différents principes

Certaines actions et/ou programmes de recherche ont été associés dans notre présentation à l'un de ces cinq principes, mais contribuent également à d'autres (figure 1). Par exemple, en améliorant génétiquement la résistance des animaux aux parasites gastro-intestinaux dans le cadre de programmes de gestion intégrée de la santé (contribution forte au principe 1), on contribue à réduire l'usage des anthelminthiques (intrants médicamenteux – contribution au principe 2), tout en préservant la biodiversité du sol, l'entomo- et l'avi-faune (contribution plus limitée aux principes 3 et 5) (figure 1). De la même façon, en améliorant l'efficacité alimentaire des animaux, monogastriques par exemple, on réduit les quantités d'intrants nécessaires à la production (par unité de production : viande, œufs... ; contribution forte au principe 2), tout en réduisant les pollutions (contribution au principe 3) et le besoin global d'importation de matières premières en provenance de régions assez peu vertueuses en matière de préservation de la biodiversité (pour un volume de production donné ; contribution plus limitée au principe 5). Cependant, si le gain d'efficacité alimentaire s'accompagne d'une augmentation de la taille des exploitations et du volume global de production, d'un besoin de ressources alimentaires de qualité nutritionnelle supérieure, l'impact favorable de l'amélioration de l'efficacité alimentaire sur le niveau des pollutions ou la préservation de la biodiversité est susceptible d'être en partie ou totalement annulé.

D'autres travaux sont susceptibles de mobiliser simultanément plusieurs principes. C'est le cas par exemple des études conduites dans le but de quantifier conjointement les conséquences économiques et environnementales d'une sélection basée sur

5 <http://www.imageh2020.eu/>

6 <https://www.crb-anim.fr/>

7 <http://www.goatgenome.org/vargoats.html>

des caractères particuliers (efficacité alimentaire par exemple : Soleimani et Gilbert, 2020), ou des études qui visent à analyser l'impact économique et environnemental du remplacement des habituelles pondérations économiques par des pondérations environnementales (ou de leur prise en compte conjointe) au sein des objectifs de sélection (Besson *et al.*, 2020). Ces travaux mobilisent essentiellement les principes 2 et 3, mais contribuent également (bien que de façon plus limitée) au principe 5 (figure 1). Certains travaux sont susceptibles enfin de mobiliser conjointement l'ensemble des principes. On peut citer notamment (1) la définition de nouveaux objectifs de sélection plus complets et équilibrés adaptés à des systèmes d'élevage « alternatifs » et diversifiés, en Agriculture Biologique par exemple (Slagboom *et al.*, 2020), ou (2) la définition de nouveaux objectifs de sélection (et l'élaboration des méthodes

afférentes) permettant de prendre en compte de façon plus explicite l'ensemble des services et disservices des élevages à une échelle territoriale (Tixier-Boichard *et al.*, 2015).

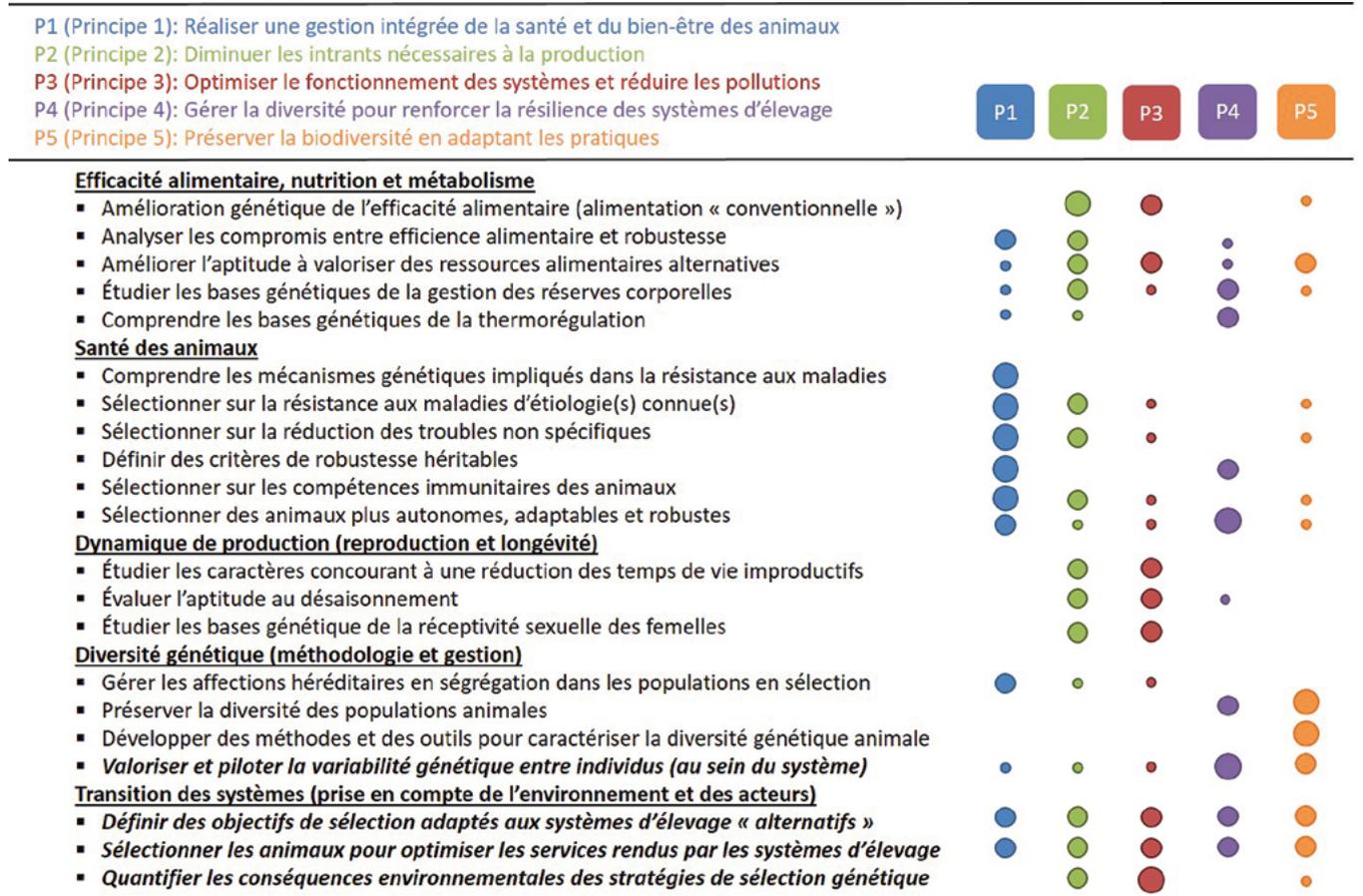
Par ailleurs, la modification en profondeur de nos systèmes agricoles se heurte à de nombreux verrous. Certains relèvent d'une insuffisance de connaissances dans différents champs des sciences du vivant. L'effort de recherche fondamentale actuellement consenti, dans le domaine de la génétique/génomique, ou plus globalement de la biologie intégrative, par exemple, est susceptible de produire des connaissances utiles à l'évolution agroécologique des systèmes d'élevage en contribuant à plusieurs principes du cadre conceptuel, potentiellement à tous (Clark *et al.*, 2020 ; Crespi *et al.*, 2020). Cet effort de recherche fondamentale devra par conséquent être poursuivi et amplifié.

Globalement, une mobilisation conjointe et si possible équilibrée des différents principes est nécessaire pour engager les systèmes d'élevage dans une véritable transition agroécologique susceptible de répondre à la crise de légitimité évoquée en introduction. Les travaux en génétique devraient être envisagés et articulés dans cette perspective.

■ 2.2. De l'amélioration de l'efficacité à la reconception de systèmes d'élevage

Comme le montre la figure 1, certaines contributions peuvent être associées à un voire à plusieurs principes du cadre conceptuel de Dumont *et al.* (2013), mais être envisagées dans un cadre d'élevage « conventionnel » et ne relever en rien, ou que marginalement, d'une réelle transition agroécologique. Ce serait le cas, par exemple, de travaux visant à améliorer temporairement la

Figure 1. Exemples de contributions de la génétique animale aux 5 principes agroécologiques¹ pour les systèmes d'élevage^{2, 3}.



¹Les cinq principes du cadre conceptuel proposé par Dumont *et al.* (2013).

²La taille du cercle indique l'importance de la contribution (avérée ou potentielle) d'une action/thématique de recherche au principe (voir aussi le texte).

³Les thématiques de recherche figurant en gras et italiques ont fait l'objet d'un nombre limité de travaux à ce jour.

résistance génétique des animaux vis-à-vis d'un agent infectieux particulier (contribution forte au principe 1, plus marginale aux autres principes) sans s'intéresser aux principaux facteurs de risque et d'impact de la maladie (encadré 3). Au-delà de l'inscription dans les 5 principes du cadre conceptuel défini par Dumont *et al.* (2013), il semble nécessaire de considérer le niveau de la transition (des évolutions, des transformations) que les différentes actions vont engendrer. L'utilisation du gradient E/S/R (Efficience/Substitution/Reconception) proposé par Hill (1985) permet d'intégrer cette dimension dans notre réflexion. Sur ce gradient, certaines actions visent une « simple » recherche d'efficience (E), sans remettre en cause les fondements, les composantes ou la conception générale des systèmes. Ce serait le cas, par exemple, de l'utilisation d'animaux génétiquement améliorés pour transformer l'aliment en muscle (carcasse) de façon plus efficace, sans chercher à modifier le type d'aliment utilisé ni la conduite des élevages. D'autres actions visent à substituer (S), de façon temporaire ou définitive, certaines composantes d'un système par d'autres, mieux acceptées et/ou jugées plus « vertueuses », mais sans remettre en question non plus la conception générale des systèmes. Ce serait le cas, par exemple, dans les régions de grandes cultures, de la substitution des engrais minéraux par des fertilisants organiques importés depuis les régions d'élevage sans remettre en question la structure des rotations, les itinéraires culturaux ou la spécialisation territoriale. En productions animales, ce serait le cas par exemple d'un changement de matières premières dans la formulation d'aliments commerciaux (remplacement du tourteau de soja par d'autres matières premières produites localement) sans reconsidération des objectifs quantitatifs de production ou de la conduite des élevages. Enfin, le niveau de transition le plus abouti sur ce gradient implique une reconception (R) globale et en profondeur des systèmes. Dans une démarche de reconception, la mise en œuvre conjointe de plusieurs principes du cadre conceptuel de Dumont *et al.* (2013) est importante (Dumont *et al.*, 2020a).

Ce gradient E/S/R est assez proche, conceptuellement, de l'idée de modernisation agroécologique « faible » ou « forte » des systèmes agricoles proposée par Duru *et al.* (2014). La modernisation agroécologique « faible » se réfère aux changements de pratiques conduisant (1) à une amélioration de l'efficience des intrants (alimentation de précision par exemple), (2) à la mise en œuvre de bonnes pratiques telles que le recyclage de matières ou l'utilisation de technologies relevant de l'élevage (ou de la médecine) de précision, de façon à réduire l'usage des intrants (médicaments par exemple) et leurs effets collatéraux (sélection d'agents pathogènes résistants), ou (3) au remplacement d'intrants par d'autres, dans le but de réduire les impacts environnementaux par exemple. La modernisation « forte » nécessite quant à elle un changement de paradigme et une reconception en profondeur des systèmes fondée sur les principes de l'agroécologie : en résumé, utiliser la biodiversité pour produire des services, de régulation notamment, afin de limiter les intrants, réduire les pollutions et accroître la résilience des systèmes.

La modernisation agroécologique « faible » (E/S sur le gradient E/S/R) est plus simple à envisager et à mettre en œuvre. En effet, dans ce cas, on ne change pas la logique *ante*, on cherche à réduire les coûts pour améliorer l'efficience économique des systèmes. Cependant, plus l'efficacité de ces approches est (ou semble) importante à court terme, plus elles conduisent à se désintéresser des causes fondamentales des problèmes qu'elles sont censées résoudre, et plus elles retardent la mise en œuvre de solutions de long terme nécessitant, généralement, une remise en question « forte » de la structure, de l'organisation et du fonctionnement des systèmes (Hill, 1985). À ce titre, elles peuvent contribuer au verrouillage socio-technique des systèmes, ce qui rend leur évolution d'autant plus difficile. L'idée d'utiliser des animaux génétiquement modifiés pour résoudre (au moins temporairement) un problème récurrent de maladie en élevage en est une bonne illustration (encadré 3).

L'analyse des nombreuses contributions de la génétique animale aux

différents principes du cadre conceptuel défini par Dumont *et al.* (2013) (voir la partie 1 et la figure 1) les situe assez majoritairement dans un registre de modernisation agroécologique « faible » (E/S). La génétique animale a eu, dans le passé, un impact positif sur la durabilité économique et environnementale des élevages. En contribuant à l'accroissement de la productivité des animaux, elle a permis une réduction, ou une maîtrise, des coûts de production, des ressources mobilisées pour la production de biomasse animale (nécessaires à la production d'un kg de lait, de viande ou d'œufs par exemple) et de l'intensité des impacts environnementaux (gaz à effet de serre par kg de lait ou de viande). Cependant, cette contribution a bénéficié essentiellement aux systèmes d'élevage « conventionnels » dominants, et ses effets positifs ont été plus que contrebalancés par une augmentation très importante des volumes produits. La génétique animale a ainsi accompagné l'évolution technico-industrielle des systèmes de productions animales qui s'est opérée au cours des dernières décennies, qui a conduit à la crise de légitimité évoquée en introduction. Elle a donc aussi contribué, pour partie, au verrouillage socio-technique de ces systèmes, rendant les évolutions difficiles. Ce constat est désormais partagé et discuté au sein de la communauté scientifique, et une volonté d'évolution des priorités de recherche, de changement de perspectives, émerge progressivement.

Le tableau 1 illustre la façon dont certains thèmes de recherches classiques et importants dans le domaine de la génétique animale (à l'échelle mondiale) pourraient s'inscrire dans une perspective de transition agroécologique « forte » des systèmes d'élevage.

■ 2.3. Transition agroécologique, bien-être des animaux, des humains et de l'environnement

Les réflexions et travaux fondateurs de l'agroécologie ont été portés par des chercheurs s'intéressant principalement aux productions végétales. En 2014, 5 % seulement des publications indexées dans le domaine de l'agroé-

Tableau 1. Positionnement de travaux concernant trois grands domaines de recherche en génétique animale sur le gradient Efficience/Substitution/Reconception. L'état actuel des connaissances sur chaque sujet est considéré comme très avancé (+++), avancé (++) , en cours d'exploration (+) ou encore largement inexploré (?)

Thématiques/ Domaines de recherche & développement	>> GRADIENT DE TRANSITION >>		
	Efficiencie (E) 	Substitution (S) 	Reconception (R) 
Efficacité alimentaire	+++ Sélection pour réduire la consommation de concentrés (réduction des intrants et du coût de production)	+ Sélection pour améliorer la capacité à valoriser des aliments fibreux de moindre valeur nutritionnelle et en plus faible compétition avec l'alimentation humaine → alternative/substitution aux concentrés	+ / ? Stratégie(s) pour accroître durablement l'efficacité à l'échelle de la ferme en mobilisant plusieurs leviers : - sélection et conduite pour améliorer l'efficacité à l'échelle de la carrière de l'animal ou du troupeau (gestion du renouvellement) - ressources alimentaires alternatives (ex : produits et coproduits d'intercultures, déchets alimentaires) - systèmes innovants diversifiés s'appuyant sur une forte intégration agriculture et élevage
Santé des animaux	+++ Sélection pour améliorer la productivité des animaux dans des milieux très contrôlés (sous-entendu : les animaux malades ne sont pas productifs, et réciproquement)	++ / + Sélection pour améliorer la résistance des animaux aux maladies infectieuses et parasitaires et/ou l'immunocompétence → alternative/substitution à l'usage de médicaments, antibiotiques et antiparasitaires notamment	+ / ? Stratégie intégrée de gestion de la santé pour minimiser le recours aux intrants en mobilisant plusieurs leviers complémentaires et services écosystémiques : - association de plusieurs espèces animales complémentaires et sélectionnées pour leur adaptation au système (ex : animaux résistants ou tolérants) - utilisation de plantes à valeur santé - traitements ciblés sélectifs - pâturage tournant
Dynamiques de production, diversité et transition des systèmes	++ Sélection pour améliorer l'efficacité de fonctions biologiques particulières (persistance laitière, longévité...) Réduire la durée de la phase de démarrage non productive	+ Sélection pour améliorer l'aptitude des animaux à mobiliser et reconstituer leurs réserves corporelles, à gérer les compromis entre fonctions → alternative/substitution à la maîtrise du milieu par les éleveurs basée sur un usage intensif d'intrants	? Stratégie de gestion de la diversité et de la complémentarité entre les animaux, et entre les animaux et les autres composantes du système (croisements, gestion innovante de la diversité intra-troupeau) pour accroître la résilience des systèmes et minimiser le recours aux intrants (dont animaux) Stratégies de sélection à partir d'objectifs multicritères intégrant les impacts économiques, sociaux et environnementaux (incluant la biodiversité) de la sélection, à l'échelle des territoires

cologie faisaient explicitement référence à l'élevage dans leurs mots-clés (Soussana *et al.*, 2014). Le cadre conceptuel proposé par Dumont *et al.* (2013) pour penser l'évolution des systèmes d'élevage s'est donc assez logiquement articulé autour de principes inspirés

de ceux qu'Altieri avait formulés pour les systèmes de culture (Altieri, 2002). Ceci explique probablement que le bien-être animal, enjeu majeur pour l'évolution des systèmes d'élevage au ^{xxi}e siècle, ait été, jusqu'à présent, assez peu considéré dans les réflexions visant

une transition agroécologique des systèmes d'élevage, relativement focalisées sur les questions environnementales.

Être en bonne santé est l'une des conditions nécessaires (mais pas suffisante) au bien-être des animaux.

L'absence de douleur, de blessure et de maladie est l'une des cinq « libertés » sur lesquelles s'appuient la plupart des dispositifs d'évaluation du bien-être en élevage (Mounier *et al.*, 2021). Dans l'idée d'intégrer plus étroitement ces notions très connectées de santé et bien-être des animaux dans nos réflexions, le bien-être aurait pu être associé dans notre présentation au 1^{er} principe de Dumont *et al.* (2013) (gestion intégrée de la santé animale), qui s'inscrit dans la dynamique *One Health*, promouvant une approche intégrée, systémique et unifiée de la santé publique, animale et environnementale. En prolongement, il serait intéressant d'analyser finement dans quelle mesure certaines contributions de la génétique à une évolution des systèmes d'élevage fondée sur les principes de l'agroécologie seraient susceptibles de s'inscrire dans la dynamique *One Welfare*, visant à mieux comprendre les interconnexions entre bien-être animal, bien-être humain et environnement (Garcia Pinillos *et al.*, 2016). Un exemple pouvant illustrer ce point est la sélection d'animaux robustes, résistants à un ensemble d'agents infectieux donc moins malades (meilleur bien-être des animaux), requérant moins d'interventions médicales (moins de médicaments utilisés, moins d'antibiotiques par exemple, préservant donc mieux l'environnement et la santé publique) et permettant de réduire la mortalité en élevage (contribuant au bien-être psychologique des éleveurs et conforme aux attentes sociétales). Un autre exemple serait la sélection visant à accroître les capacités cognitives des animaux (capacités d'apprentissage par exemple), leur permettant de s'adapter à des systèmes d'élevage plus diversifiés et exposés, mais aussi plus stimulants (de faire un meilleur usage

des ressources, d'avoir des interactions positives avec les autres espèces animales partageant leur environnement, et en particulier avec l'Homme). Les animaux et les éleveurs pourraient en tirer des bénéfices mutuels pour leur santé et leur bien-être. Cette réflexion mériterait d'être approfondie mais elle dépasse le périmètre du présent article.

Conclusion

L'accroissement démographique mondial, la dégradation des écosystèmes et les menaces que le dérèglement climatique fait peser sur leur intégrité, ainsi que les évolutions fortes des attentes sociétales dans certains pays, font partie des raisons qui nous obligent aujourd'hui à reconsidérer certains choix ayant structuré nos systèmes alimentaires pendant des décennies (Duru et Le Bras, 2020). Parmi ces choix, l'intensification des systèmes agricoles et d'élevage est désormais fortement remise en cause. Différentes voies de transition sont envisagées. Certaines, comme l'intensification durable (ou « l'écologie industrielle », évoquée elle aussi dans l'article de Dumont *et al.*, 2013), prolongent le paradigme productiviste de la modernisation agricole. D'autres, comme l'agroécologie, proposent d'opérer un réel virage. Même si quelques éléments de convergence peuvent être identifiés entre ces différentes orientations, les débats sont encore vifs entre les partisans de l'une ou de l'autre, y compris au sein de la communauté scientifique. La génétique, en tant que discipline scientifique, n'est pas l'apanage d'un seul de ces modèles : elle peut servir indifféremment à chacune de ces voies de transition des systèmes agricoles.

Notre revue de la littérature montre que l'engagement vers une transition agroécologique forte des systèmes d'élevage nécessite d'adopter une vision holistique de ces systèmes, ne négligeant aucune dimension (sociale, environnementale, sanitaire, éthique, économique...). Pour accompagner cette transition, l'effort de recherches doit être conséquent (Dumont *et al.*, 2014) et envisagé de façon nécessairement interdisciplinaire. Compagnone *et al.* (2018) ont par ailleurs suggéré que conduire des recherches visant la transition agroécologique des systèmes nécessite un passage de la « monoculture scientifique » à une « écologie des savoirs », intégrant la diversité des connaissances issues d'un partenariat large et potentiellement renouvelé. Pour s'impliquer dans des travaux visant une reconception agroécologique des systèmes d'élevage, les généticiens devront donc envisager de remettre en question certains de leurs principes épistémologiques, théoriques, méthodologiques et techniques, de questionner fortement leurs priorités de recherche et anticiper un certain renouvellement de leur partenariat : plus globalement, s'interroger sur leur « posture de recherche » (Hazard *et al.*, 2019). D'importants changements s'imposent donc, qui sont nature à motiver de nouvelles générations de chercheurs.

Remerciements

Les auteurs remercient Jean-Pierre Bidanel (Chef de département adjoint, Département INRAE Génétique Animale) pour les échanges intéressants et constructifs durant la rédaction de cet article.

Références

Aguerre S., Jacquet P., Brodier H., Bournazel J.P., Grisez C., Prevot F., Michot L., Fidelle F., Astruc J.M., Moreno C.R., 2018. Resistance to gastrointestinal nematodes in dairy sheep: Genetic variability and relevance of artificial infection of nucleus rams to select for resistant ewes on farms. *Vet. Parasitol.*, 256, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2018.04.004>

Aliakbari A., Zemb O., Billon Y., Barilly C., Ahn I., Riquet J., Gilbert H., 2021. Genetic relationships

between feed efficiency and gut microbiome in pig lines selected for residual feed intake. *J. Anim. Breed. Genet.*, 138, 491-507. <https://doi.org/10.1111/jbg.12539>

Allain D., Foulquière D., Autran P., Francois D., Bouix J., 2014. Importance of birthcoat for lamb survival and growth in the Romane sheep breed extensively managed on rangelands. *J. Anim. Sci.*, 92, 54-63. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6660>

Altieri M., 2002. Agroecological principles and strategies for sustainable agriculture. In: *Agroecological innovations: Increasing food production with participatory development*. Uphoff N. (éd). Earthscan Publications Ltd, London, UK, 40-46

Besson M., Komen H., Rose G., Vandeputte M., 2020. The genetic correlation between feed conversion ratio and growth rate affects the design of a breeding program for more sustainable fish production.

- Genet. Sel. Evol., 52, 5. <https://doi.org/10.1186/s12711-020-0524-0>
- Bidanel J.P., Boichard D., Chevalet C., 2008. De la génétique à la génomique. In : Numéro spécial anniversaire. 20 ans de recherches en productions animales à l'INRA. Charley B., Herpin P., Perez J.M. (éds). INRA Prod. Anim., 21, 15-32. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2008.21.1.3372>
- Bishop S.C., 2010. Modelling Farm Animal Diseases. In: Breeding for Disease Resistance in Farm Animals, 3rd Edition. Bishop S.C., Axford R.F.E., Nicholas F.W., Owen J.B. (éds). Cabi Publishing, Wallingford, UK, 38-54. <https://doi.org/10.1079/9781845935559.0038>
- Blanc F., Ollion E., Puillet L., Delaby L., Ingrand S., Tichit M., Friggens N., 2013. Évaluation quantitative de la robustesse des animaux et du troupeau : quels principes retenir ? Renc. Rech. Rum., 20, 365-272.
- Boddicker N.J., Bjorkquist A., Rowland R.R.R., Lunney J.K., Reecy J.M., Dekkers J.C.M., 2014. Genome-wide association and genomic prediction for host response to porcine reproductive and respiratory syndrome virus infection. Genet. Sel. Evol., 46, 18. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-46-18>
- Boitard S., Rodriguez W., Jay F., Mona S., Austerlitz F., 2016. Inferring population size history from large samples of genome-wide molecular data – an approximate Bayesian computation approach. Plos Genet., 12, e1005877. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005877>
- Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. Eur. J. Agron., 57, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- Bonnefont C.M.D., Rainard P., Cunha P., Gilbert F.B., Toufeer M., Aurel M.R., Rupp R., Foucras G., 2012. Genetic susceptibility to *S. aureus* mastitis in sheep: differential expression of mammary epithelial cells in response to live bacteria or supernatant. Physiol. Genomics, 44, 403-416. <https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00155.2011>
- Borey M., Estelle J., Caidi A., Bruneau N., Coville J.L., Hennequet-Antier C., Mignon-Grasteau S., Calenge F., 2020. Broilers divergently selected for digestibility differ for their digestive microbial ecosystems. Plos One, 15, e0232418. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232418>
- Bourneuf E., Otz P., Pausch H., Jagannathan V., Michot P., Grohs C., Piton G., Ammermueller S., Deloche M.C., Fritz S., Leclerc H., Pechoux C., Boukadiri A., Hoze C., Saintilan R., Crechet F., Mosca M., Segelke D., Guillaume F., Bouet S., Baur A., Vasilescu A., Genestout L., Thomas A., Allais-Bonnet A., Rocha D., Colle M.A., Klopp C., Esquerre D., Wurmser C., Flisikowski K., Schwarzenbacher H., Burgstaller J., Brueggemann M., Dietschi E., Rudolph N., Freick M., Barbey S., Fayolle G., Danchin-Burge C., Schibler L., Bed'Hom B., Hayes B.J., Daetwyler H.D., Fries R., Boichard D., Pin D., Drogemüller C., Capitan A., 2017. Rapid discovery of de novo deleterious mutations in cattle enhances the value of livestock as model species. Sci. Rep., 7, 11466. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11523-3>
- Bouvier-Muller J., Allain C., Enjalbert F., Farizon Y., Portes D., Foucras G., Rupp R., 2018. Somatic cell count-based selection reduces susceptibility to energy shortage during early lactation in a sheep model. J. Dairy Sci., 101, 2248-2259. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13479>
- Buckwell A., Nadeu E., 2018. What is the Safe Operating Space for EU Livestock? RISE Foundation, Brussels, Belgium. https://risefoundation.eu/wp-content/uploads/2020/07/2018_RISE_Livestock_Exec_Summ.pdf
- Calenge F., Martin C., Le Floch N., Phocas F., Morgavi D., Rogel-Gaillard C., Quéré P., 2014. Intégrer la caractérisation du microbiote digestif dans le phénotypage de l'animal de rente : vers un nouvel outil de maîtrise de la santé en élevage ? In : Phénotypage des animaux d'élevage. Phocas F. (Éd). Dossier, INRA Prod. Anim., 27, 209-222. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.3.3068>
- Callet T., Médale F., Larroquet L., Surget A., Aguirre P., Kerneis T., Labbe L., Quillet E., Geurden I., Skiba-Cassy S., Dupont-Nivet M., 2017. Successful selection of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) on their ability to grow with a diet completely devoid of fishmeal and fish oil, and correlated changes in nutritional traits. Plos One, 12, e0186705. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186705>
- Caquet T., Gascuel-Oudoux C., Tixier-Boichard M., Dedieu B., Detang-Dessendre C., Dupraz P., Faverdin P., Hazard L., Hinsinger P., Litrico-Chiarelli I., Médale F., Monod H., Petit-Michaud S., Reboud X., Thomas A., Lescourret F., Roques L., de Vries H., Soussana J.F., 2019. Une réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie. Rapport de synthèse. 108 pp. <https://www.inrae.fr/actualites/prospective-interdisciplinaire-agroecologie>
- Chiron G., Chapuis H., Tixier-Boichard M., Restoux G., Rognon X., Lubac-Paye S., Vieaud A., Seigneurin F., Petitjean F., Guémené D., 2018. Quelle stratégie pour une politique de conservation des races locales avicoles ? (Biodiva). Innov. Agron., 63, 357-371. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01839198/file/2018_Chiron_Innovations%20Agronomiques.pdf
- Clark E.L., Archibald A.L., Daetwyler H.D., Groenen M.A.M., Harrison P.W., Houston R.D., Kühn C., Lien S., Macqueen D.J., Reecy J.M., Robledo D., Watson M., Tuggle C.K., Giuffra E., 2020. From FAANG to fork: application of highly annotated genomes to improve farmed animal production. Genome Biol., 21, 285. <https://doi.org/10.1186/s13059-020-02197-8>
- Colleau J.J., Palhière I., Rodriguez-Ramilo S.T., Legarra A., 2017. A fast indirect method to compute functions of genomic relationships concerning genotyped and ungenotyped individuals, for diversity management. Genet. Sel. Evol., 49, 87. <https://doi.org/10.1186/s12711-017-0363-9>
- Compagnone C., Lamine C., Dupré L., 2018. La production et la circulation des connaissances en agriculture interrogées par l'agroécologie. Rev. Anthropol. Connaiss., 12, 111-138. <https://doi.org/10.3917/rac.039.0111>
- Coquil X., Anglade J., Barataud F., Brunet L., Durpoix A., Godfroy M., 2019. TEASER-lab : concevoir un territoire pour une alimentation saine, localisée et créatrice d'emplois à partir de la polyculture – polyélevage autonome et économe. La diversification des productions sur le dispositif expérimental ASTER-Mirecourt. Innov. Agron., 72, 61-75. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02194742/document>
- Cremonesi P., Capoferri R., Pisoni G., Del Corvo M., Strozzi F., Rupp R., Caillat H., Modesto P., Moroni P., Williams J.L., Castiglioni B., Stella A., 2012. Response of the goat mammary gland to infection with *Staphylococcus aureus* revealed by gene expression profiling in milk somatic and white blood cells. BMC Genomics, 13, 540. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-540>
- Crespi M., Diribane M., Gilbert H., Guiderdoni E., Hippolyte I., Hubert B., Lemanceau P., Litrico I., Médale F., Phocas F., Salse J., Treyer S., 2020. Publication du cahier n° 12 de l'ANR : les apports de la génomique à l'agroécologie. Hippolyte I., Guiderdoni E., Mia J., Hubert B. (éds). 72p. https://anr.fr/fileadmin/documents/2020/ANR_Cahiers_N12_WEB.pdf
- Daetwyler H.D., Capitan A., Pausch H., Stothard P., Van Binsbergen R., Brondum R.F., Liao X., Djari A., Rodriguez S.C., Grohs C., Esquerre D., Bouchez O., Rossignol M.N., Klopp C., Rocha D., Fritz S., Eggen A., Bowman P.J., Cote D., Chamberlain A.J., Anderson C., VanTassell C.P., Hulsegge I., Goddard M.E., Gulbrandsen B., Lund M.S., Veerkamp R.F., Boichard D.A., Fries R., Hayes B.J., 2014. Whole-genome sequencing of 234 bulls facilitates mapping of monogenic and complex traits in cattle. Nat. Genet., 46, 858-865. <https://doi.org/10.1038/ng.3034>
- D'Ambrosio J., Phocas F., Haffray P., Bestin A., Brard-Fudulea S., Poncet C., Quillet E., Dechamp N., Frasin C., Charles M., Dupont-Nivet M., 2019. Genome-wide estimates of genetic diversity, inbreeding and effective size of experimental and commercial rainbow trout lines undergoing selective breeding. Genet. Sel. Evol., 51, 26. <https://doi.org/10.1186/s12711-019-0468-4>
- Darnhofer I., 2014. Resilience and why it matters for farm management. Eur. Rev. Agric. Econ., 41, 461-484. <https://doi.org/10.1093/erae/jbu012>
- David I., Aliakbari A., Deru V., Garreau H., Gilbert H., Ricard A., 2020. Inclusive inheritance for residual feed intake in pigs and rabbits. J. Anim. Breed. Genet., 137, 535-544. <https://doi.org/10.1111/jbg.12494>
- David V., Beaugrand F., Gay E., Bastien J., Ducrot C., 2019. Évolution de l'usage des antibiotiques en filières bovins lait et bovins viande : état d'avancement et perspectives. In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim., 32, 291-304. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2469>
- Dedieu B., Faverdin P., Dourmad J.Y., Gibon A., 2008. Système d'élevage, un concept pour raisonner les transformations de l'élevage. In : Numéro spécial anniversaire. 20 ans de recherches en productions animales à l'INRA. Charley B., Herpin P., Perez J.M. (Éds). INRA Prod. Anim., 21, 45-58. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2008.21.1.3374>

- Dellar M., Topp C.F.E., Banos G., Wall E., 2018. A meta-analysis on the effects of climate change on the yield and quality of European pastures. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 265, 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.029>
- Déru V., Bouquet A., Labussière E., Ganier P., Blanchet B., Carillier-Jacquin C., Gilbert H., 2020. Genetics of digestive efficiency in growing pigs fed a conventional or a high-fibre diet. *J. Anim. Breed. Genet.*, 138, 246-258. <https://doi.org/10.1111/jbg.12506>
- Doeschl-Wilson A.B., Kyriazakis I., 2012. Should we aim for genetic improvement in host resistance or tolerance to infectious pathogens? *Front. Genet.*, 3, 272. <https://doi.org/10.3389/fgene.2012.00272>
- Domingues J.P., Bonaudo T., Gabrielle B., Perrot C., Trégaro Y., Tichit M., 2019. Les effets du processus d'intensification de l'élevage dans les territoires. In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim., 32, 159-170. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2506>
- Doré T., Bellon S., 2019. Les mondes de l'agroécologie. Éditions Quae, Versailles, France, 173p. <https://www.quae.com/produit/1560/9782759230037/les-mondes-de-l-agroecologie>
- Doublet A.C., Croiseau P., Fritz S., Michenet A., Hoze C., Danchin-Burge C., Laloe D., Restoux G., 2019. The impact of genomic selection on genetic diversity and genetic gain in three French dairy cattle breeds. *Genet. Sel. Evol.*, 51, 52. <https://doi.org/10.1186/s12711-019-0495-1>
- Drouilhet L., Gilbert H., Balmisse E., Ruesche J., Tircazes A., Larzul C., Garreau H., 2013. Genetic parameters for two selection criteria for feed efficiency in rabbits. *J. Anim. Sci.*, 91, 3121-3128. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-6176>
- Ducos A., 2020. Les nouvelles techniques d'amélioration génétique : l'« édition » des génomes. In : Génétique des animaux d'élevage. Verrier E., Milan D., Rogel-Gaillard C. (éds), Éditions Quae, Versailles, France, 205-224. <https://www.quae.com/produit/1635/9782759231003/genetique-des-animaux-d-elevage>
- Ducos A., Bed'Hom B., Acloque H., Pain B., 2017. Modifications ciblées des génomes : apports et impacts pour les espèces d'élevage. INRA Prod. Anim., 30, 3-18. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.1.2226>
- Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Thomas M., Tichit M., 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*, 7, 1028-1043. <https://doi.org/10.1017/S1751731112002418>
- Dumont B., González-García E., Thomas M., Fortun-Lamothe L., Ducrot C., Dourmad J.Y., Tichit M., 2014. Forty research issues for the redesign of animal production systems in the 21st century. *Animal*, 8, 1382-1393. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001281>
- Dumont B., Fortun-Lamothe L., Thomas M., 2020a. Agroécologie en élevage : quelles opportunités face au défi climatique ? In : L'élevage pour l'agroécologie et une alimentation durable. Chriki S., Ellies-Oury M.P., Hocquette J.F. (éds). Éditions France Agricole, Paris, France, 157-175.
- Dumont B., Puillet L., Martin G., Savietto D., Aubin J., Ingrand S., Niderkorn V., Steinmetz L., Thomas M., 2020b. Incorporating diversity into animal production systems can increase their performance and strengthen their resilience. *Front. Sustain. Food Syst.*, 4, 109. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00109>
- Duru M., Le Bras C., 2020. Crises environnementales et sanitaires : des maladies de l'anthropocène qui appellent à refonder notre système alimentaire. *Cah. Agric.*, 29, 34. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020033>
- Duru M., Fares M., Therond O., 2014. A conceptual framework for thinking now (and organising tomorrow) the agroecological transition at the level of the territory. *Cah. Agric.*, 23, 84-95. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0691>
- European Union, 2020. Farm to Fork Strategy – for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en
- Fabre S., Chantepie L., Plisson-Petit F., Sarry J., Woloszyn F., Genet C., Drouilhet L., Tosser-Klopp G., 2020. A novel homozygous nonsense mutation in ITGB4 gene causes epidermolysis bullosa in Mouton Vendéen sheep. *Anim. Genet.* 52, 138-139. <https://doi.org/10.1111/age.13026>
- FAO, 2018. FAO's work on agroecology: A pathway to achieve the SDGs. FAO, Rome, Italy. 28p. <http://www.fao.org/3/i9021EN/i9021en.pdf>
- Faverdin P., Van Milgen J., 2019. Intégrer les changements d'échelle pour améliorer l'efficacité des productions animales et réduire les rejets. In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (éd). INRA Prod. Anim., 32, 305-322. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2499>
- Faverdin P., Allain C., Guattéo R., Hostiou N., Veissier I., 2020. Élevage de précision : de nouvelles informations utiles pour la décision ? INRAE Prod. Anim., 33, 223-234. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.4.4585>
- Fortun-Lamothe L., Savietto D., 2017. Gestion intégrée de la santé animale : Définition. Dictionnaire d'Agroécologie. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/gestion-integree-de-la-sante-animale/>
- Fraser D.G., Nations F., 2005. Animal welfare and the intensification of animal Production: An alternative interpretation. FAO, Rome, Italy. 32p. <http://www.fao.org/3/a-a0158e.pdf>
- Fraslin C., Brard-Fudulea S., D'Ambrosio J., Bestin A., Charles M., Haffray P., Quillet E., Phocas F., 2019. Rainbow trout resistance to bacterial cold water disease: two new quantitative trait loci identified after a natural disease outbreak on a French farm. *Anim. Genet.*, 50, 293-297. <https://doi.org/10.1111/age.12777>
- García Pinillos R., Appleby M.C., Manteca X., Scott-Park F., Smith C., Velarde A., 2016. One Welfare – a platform for improving human and animal welfare. *Vet. Record*, 179, 412-413. <https://doi.org/10.1136/vr.i5470>
- Garland T., 2014. Trade-offs. *Current Biology*, 24, R60-R61. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.11.036>
- Genini S., Badaoui B., Sclep G., Bishop S.C., Waddington D., Pinard-van der Laan M.H., Klopp C., Cabau C., Seyfert H.-M., Petzl W., Jensen K., Glass E.J., de Greeff A., Smith H.E., Smits M.A., Olsaker I., Boman G.M., Pisoni G., Moroni P., Castiglioni B., Cremonesi P., Del Corvo M., Foulon E., Foucras G., Rupp R., Giuffra E., 2011. Strengthening insights into host responses to mastitis infection in ruminants by combining heterogeneous microarray data sources. *BMC Genomics*, 12, 225. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-225>
- Gilbert H., Billon Y., Brossard L., Faure J., Gatellier P., Gondret F., Labussière E., Leuret B., Lefaucheur L., Le Floch N., Louveau I., Merlot E., Meunier-Salaun M.-C., Montagne L., Mormede P., Renaudeau D., Riquet J., Rogel-Gaillard C., van Milgen J., Vincent A., Noblet J., 2017. Review: divergent selection for residual feed intake in the growing pig. *Animal*, 11, 1427-1439. <https://doi.org/10.1017/S175173111600286X>
- Gliessman S., 2006. Agroecology: The ecology of sustainable food systems. Second edition. CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 408p. <https://doi.org/10.1201/b17420>
- Golovan S.P., Meidinger R.G., Ajakaiye A., Cottrill M., Wiederkehr M.Z., Barney D.J., Plante C., Pollard J.W., Fan M.Z., Hayes M.A., Laursen J., Hjorth J.P., Hacker R.R., Phillips J.R., Forsberg C.W., 2001. Pigs expressing salivary phytase produce low-phosphorus manure. *Nat. Biotechnol.*, 19, 741-745. <https://doi.org/10.1038/90788>
- González-Diéguéz D., Tusell L., Carillier-Jacquin C., Bouquet A., Vitezica Z.G., 2019. SNP-based mate allocation strategies to maximize total genetic value in pigs. *Genet. Sel. Evol.*, 51, 55. <https://doi.org/10.1186/s12711-019-0498-y>
- González-García E., Gozto de Figueredo V., Foulquie D., Jousserand E., Autran P., Camous S., Tesnière A., Bocquier F., Jouven M., 2014. Circannual body reserve dynamics and metabolic profile changes in Roman ewes grazing on rangelands. *Domest. Anim. Endocrinol.*, 46, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2013.10.002>
- Gourdine J.L., Riquet J., Rose R., Poulet N., Giorgi M., Billon Y., Renaudeau D., Gilbert H., 2019. Genotype by environment interactions for performance and thermoregulation responses in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 97, 3699-3713. <https://doi.org/10.1093/jas/skz245>
- Gunia M., David I., Hurtaud J., Maupin M., Gilbert H., Garreau H., 2018. Genetic parameters for resistance to non-specific diseases and production traits measured in challenging and selection environments; Application to a Rabbit Case. *Front. Genet.*, 9, 467. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00467>
- Hazard L., 2017. Transition agroécologique : Définition. Dictionnaire d'Agroécologie. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/transition-agroecologique/>

- Hazard L., Cerf M., Lamine C., Magda D., Steyaert P., 2019. A tool for reflecting on research stances to support sustainability transitions. *Nat. Sustain.*, 3, 89-95. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0440-x>
- Herrero M., Wirsensius S., Henderson B., Rigolot C., Thornton P., Havlík P., de Boer I., Gerber P.J., 2015. Livestock and the environment: what have we learned in the past decade? *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 40, 177-202. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-031113-093503>
- Herrero M., Thornton P.K., Mason-D'Croz D., Palmer J., Benton T.G., Bodirsky B.L., Bogard J.R., Hall A., Lee B., Nyborg K., Pradhan P., Bonnett G.D., Bryan B.A., Campbell B.M., Christensen S., Clark M., Cook M.T., de Boer I.J.M., Downs C., Dizyee K., Folberth C., Godde C.M., Gerber J.S., Grundy M., Havlik P., Jarvis A., King R., Loboguerrero A.M., Lopes M.A., McIntyre C.L., Naylor R., Navarro J., Obersteiner M., Parodi A., Peoples M.B., Pikaar I., Popp A., Rockström J., Robertson M.J., Smith P., Stehfest E., Swain S.M., Valin H., van Wijk M., van Zanten H.H.E., Vermeulen S., Vervoort J., West P.C., 2020. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system. *Nature Food*, 1, 266-272. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0074-1>
- Hill S., 1985. Redesigning the food system for sustainability. *Alternatives*, 12, 32-36. https://www.researchgate.net/publication/285538508_Redesigning_the_food_system_for_sustainability
- Hill W.G., Kirkpatrick M., 2010. What animal breeding has taught us about evolution? *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2010. 41:1-19. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144728>
- Holliday R., 1990. Mechanisms for the control of gene activity during development. *Biol. Rev.*, 65, 431-471. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1990.tb01233.x>
- Knap P.W., 2005. Breeding robust pigs. *Aust. J. Exp. Agric.*, 45, 763-773. <https://doi.org/10.1071/EA05041>
- Kornas S., Salle G., Skalska M., David I., Ricard A., Cabaret J., 2015. Estimation of genetic parameters for resistance to gastro-intestinal nematodes in pure blood Arabian horses. *Int. J. Parasitol.*, 45, 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2014.11.003>
- Laisney C., 2012. L'évolution de l'alimentation en France. Centre d'Études et de Prospective, n° 5, janvier 2012, 25p. <http://46.29.123.56/IMG/pdf/doctravail50112.pdf>
- Leroy G., Mary-Huard T., Verrier E., Danvy S., Charvolin E., Danchin-Burge C., 2013. Methods to estimate effective population size using pedigree data: Examples in dog, sheep, cattle and horse. *Genet. Sel. Evol.*, 45, 1. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-45-1>
- Leroy G., Baumung R., Boettcher P., Besbes B., From T., Hoffmann I., 2018. Animal genetic resources diversity and ecosystem services. *Glob. Food Secur.*, 17, 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.04.003>
- Le Roy P., Ducos A., Phocas F., 2019. Quelles performances pour les animaux de demain? Objectifs et méthodes de sélection. In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim. 32, 233-246. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2466>
- Maatoug-Ouzini S., Khaldi G., Francois D., Bodin L., 2013. Female response to ram effect in the Barbarine breed: Phenotypic and genetic parameter estimation. *Small Rumin. Res.*, 113, 376-382. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.03.020>
- Mace T., González-García E., Pradel J., Parisot S., Carrière F., Douls S., Foulquie D., Hazard D., 2018. Genetic analysis of robustness in meat sheep through body weight and body condition score changes over time. *J. Anim. Sci.*, 96, 4501-4511. <https://doi.org/10.1093/jas/sky318>
- Mach N., Gao Y., Lemonnier G., Lecardonnel J., Oswald I.P., Estelle J., Rogel-Gaillard C., 2013. The peripheral blood transcriptome reflects variations in immunity traits in swine: towards the identification of biomarkers. *BMC Genomics*, 14, 894. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-894>
- Magne M.A., Nozières-Petit M.O., Cournut S., Ollion E., Puillet L., Renaudeau D., Fortun-Lamothe L., 2019. Gérer la diversité animale dans les systèmes d'élevage : laquelle, comment et pour quels bénéfices? In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim., 32, 263-280. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2496>
- Mahieu M., Arquet R., Fleury J., Bonneau M., Mandonnet N., 2020. Mixed grazing of adult goats and cattle: Lessons from long-term monitoring. *Vet. Parasitol.*, 280, 109087. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2020.109087>
- Martin G., Barth K., Benoit M., Brock C., Destruel M., Dumont B., Grillot M., Huebner S., Magne M.A., Moerman M., Mosnier C., Parsons D., Ronchi B., Schanz L., Steinmetz L., Werne S., Winckler C., Primi R., 2020. Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agric. Syst.*, 181, 102821. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>
- Martin P., Taussat S., Vinet A., Krauss D., Maupetit D., Renand G., 2019. Genetic parameters and genome-wide association study regarding feed efficiency and slaughter traits in Charolais cows. *J. Anim. Sci.*, 97, 3684-3698. <https://doi.org/10.1093/jas/skz240>
- Mignon-Grasteau S., Muley N., Bastianelli D., Gomez J., Peron A., Sellier N., Millet N., Besnard J., Hallouis J.M., Carre B., 2004. Heritability of digestibilities and divergent selection for digestion ability in growing chicks fed a wheat diet. *Poult. Sci.* 83, 860-867. <https://doi.org/10.1093/ps/83.6.860>
- Mignon-Grasteau S., Beauclercq S., Urvoix S., Le Bihan-Duval E., 2020. Interest in the serum color as an indirect criterion of selection of digestive efficiency in chickens. *Poult. Sci.*, 99, 702-707. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.005>
- Moreno-Romieux C., Sallé G., Jacquet P., Blanchard A., Chylinski C., Cabaret J., Francois D., Saccareu M., Astruc J.M., Bambou J.C., Mandonnet N., 2017. La résistance génétique aux infections par les nématodes gastro-intestinaux chez les petits ruminants : un enjeu de durabilité pour les productions à l'herbe. *INRA Prod. Anim.*, 30, 47-56. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.1.2231>
- Mounier L., Boissy A., de Boyer des Roches A., Duvaux-Ponter C., Guattéo R., Meunier-Salaün M.C., Mormède P., 2021. Le bien-être des animaux d'élevage. Comprendre le bien-être animal. éditions Quae, Versailles, France, 76p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-3327-4>
- Muñoz M., Bozzi R., Garcia-Casco J., Nunez Y., Ribani A., Franci O., Garcia F., Skrlep M., Schiavo G., Bovo S., Utzeri V.J., Charneca R., Martins J.M., Quintanilla R., Tibau J., Margeta V., Djurkin-Kusec I., Mercat M.J., Riquet J., Estelle J., Zimmer C., Razmaite V., Araujo J.P., Radovic C., Savic R., Karolyi D., Gallo, M., Candek-Potokar M., Fernandez A.I., Fontanesi L., Ovilo C., 2019. Genomic diversity, linkage disequilibrium and selection signatures in European local pig breeds assessed with a high density SNP chip. *Sci. Rep.*, 9, 13546. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49830-6>
- Nozières-Petit M.O., Baritoux V., Couzy C., Dervillé M., Perrot C., Sans P., You G., 2016. Organisation des filières de ruminants : Quelles évolutions ? Quelles alternatives pour les éleveurs? *Renc. Rech. Rum.*, 23, 97-104.
- Oget C., Teissier M., Astruc J.M., Tosser-Klopp G., Rupp R., 2019a. Alternative methods improve the accuracy of genomic prediction using information from a causal point mutation in a dairy sheep model. *BMC Genomics*, 20, 719. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6068-4>
- Oget C., Tosser-Klopp G., Rupp R., 2019b. Genetic and genomic studies in ovine mastitis. *Small Rumin. Res.*, 176, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.05.011>
- Parejo M., Wragg D., Gauthier L., Vignal A., Neumann P., Neuditschko M., 2016. Using Whole-Genome Sequence Information to foster conservation efforts for the European dark honey bee, *Apis mellifera mellifera*. *Front. Ecol. Evol.*, 4, 140. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00140>
- Paris C., Servin B., Boitard S., 2019. Inference of selection from genetic time series using various parametric approximations to the Wright-Fisher model. *G3-Genes Genomes Genet.*, 9, 4073-4086. <https://doi.org/10.1534/g3.119.400778>
- Pellicer-Rubio M.T., Boissard K., Grizelj J., Vince S., Fréret S., Fatet A., López-Sebastian A., 2019. Vers une maîtrise de la reproduction sans hormones chez les petits ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 32, 51-66. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.1.2436>
- Peyraud J.L., Richard G., Gascuel-Oudou C., 2015. Boucler les grands cycles biogéochimiques. *Innov. Agron.*, 43, 177-186. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01215774/document>
- Peyraud J.L., Aubin J., Barbier M., Baumont R., Berri C., Bidanel J.P., Citti C., Cotinot C., Ducrot C., Dupraz P., Faverdin P., Friggens N., Houot S., Nozières-Petit M.O., Rogel-Gaillard C., Santé-Lhoutellier V., 2019. Quelle

- science pour les élevages de demain ? Une réflexion prospective conduite à l'INRA. In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim., 32, 323-338. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2591>
- Phocas F., Agabriel J., Dupont-Nivet M., Geurden I., Médale F., Mignon-Grasteau S., Gilbert H., Dourmad J.Y., 2014. Le phénotypage de l'efficacité alimentaire et de ses composantes, une nécessité pour accroître l'efficacité des productions animales. In : Phénotypage des animaux d'élevage. Phocas F. (éd). Dossier, INRA Prod. Anim. 27, 235-248. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.3.3070>
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Frappat B., González-García E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno-Romieux C., 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. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2017.30.1.2232>
- Pitel F., Calenge F., Aigueperse N., Estellé-Fabrellas J., Coustham V., Calandreau L., Morisson M., Chavatte-Palmer P., Ginane C., 2019. Rôle de l'environnement précoce dans la variabilité des phénotypes et l'adaptation des animaux d'élevage à leur milieu. In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim., 32, 247-262. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2467>
- Plumecocq G., 2018. Systèmes alimentaires durables : Définition. Dictionnaire d'Agroécologie. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/systemes-alimentaires-durables/>
- Rajão R., Soares-Filho B., Nunes F., Börner J., Machado L., Assis D., Oliveira A., Pinto L., Ribeiro V., Rausch L., Gibbs H., Figueira D., 2020. The rotten apples of Brazil's agribusiness. Science, 369, 246-248. <https://doi.org/10.1126/science.aba6646>
- Rauw W.M., Rydhmer L., Kyriazakis I., Overland M., Gilbert H., Dekkers J.C.M., Hermes S., Bouquet A., Izquierdo E.G., Louveau I., Gomez-Raya L., 2020. Prospects for sustainability of pig production in relation to climate change and novel feed resources. J. Sci. Food Agric., 100, 3575-3586. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10338>
- Renand G., Vinet A., Decruyenaere V., Maupetit D., Dozias D., 2019. Methane and carbon dioxide emission of beef heifers in relation with growth and feed efficiency. Animals, 9, 1136. <https://doi.org/10.3390/ani9121136>
- Revilla M., Friggens N.C., Broudiscou L.P., Lemonnier G., Blanc F., Ravon L., Mercat M.J., Billon Y., Rogel-Gaillard C., Le Floch N., Estelle J., Munoz-Tamayo R., 2019. Towards the quantitative characterisation of piglets' robustness to weaning: a modelling approach. Animal, 13, 2536-2546. <https://doi.org/10.1017/S1751731119000843>
- Roguet C., Gaigné C., Chatellier V., Cariou S., Carlier M., Chenut R., Daniel K., Perrot C., 2015. Spécialisation territoriale et concentration des productions animales européennes : état des lieux et facteurs explicatifs. INRA Prod. Anim., 28, 5-22. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2015.28.1.3007>
- Rupp R., Boichard D., 2003. Genetics of resistance to mastitis in dairy cattle. Vet. Res., 34, 671-688. <https://doi.org/10.1051/vetres:2003020>
- Rupp R., Bergonier D., Dion S., Hygonenq M.C., Aurel M.R., Robert-Granie C., Foucras G., 2009. Response to somatic cell count-based selection for mastitis resistance in a divergent selection experiment in sheep. J. Dairy Sci., 92, 1203-1219. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1435>
- Rupp R., Senin P., Sarry J., Allain C., Tasca C., Ligat L., Portes D., Woloszyn F., Bouchez O., Tabouret G., Lebastard M., Caubet C., Foucras G., Tosser-Klopp G., 2015. A Point mutation in suppressor of cytokine signalling 2 (Socs2) increases the susceptibility to inflammation of the mammary gland while associated with higher body weight and size and higher milk production in a sheep model. Plos Genet., 11, e1005629. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1005629>
- Rupp R., Huau C., Caillat H., Fassier T., Bouvier F., Pampouille E., Clement V., Palhiere I., Larroque H., Tosser-Klopp G., Jacquet P., Rainard P., 2019. Divergent selection on milk somatic cell count in goats improves udder health and milk quality with no effect on nematode resistance. J. Dairy Sci., 102, 5242-5253. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15664>
- Ryschawy J., Martin G., Moraine M., Duru M., Therond O., 2017. Designing crop-livestock integration at different levels: Toward new agroecological models? Nutr. Cycl. Agroecosystems, 108, 5-20. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9815-9>
- Sabatier R., Durant D., Hazard L., Lauvie A., Lecrivain E., Magda D., Martel G., Roche B., Marie C. de Sainte, Teillard F., Tichit M., 2015. Towards biodiversity-based livestock systems : review of evidence and options for improvement. CAB Rev., 10, 1-13. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01210128>
- Saintilar R., Merour I., Brossard L., Tribout T., Dourmad J.Y., Sellier P., Bidanel J., van Milgen J., Gilbert H., 2013. Genetics of residual feed intake in growing pigs: Relationships with production traits, and nitrogen and phosphorus excretion traits. J. Anim. Sci., 91, 2542-2554. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5687>
- Sauvant D., Martin O., 2010. Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage : définitions systémique et biologique des différents concepts. In : Robustesse, rusticité, flexibilité, plasticité, résilience... les nouveaux critères de qualité des animaux et des systèmes d'élevage. Sauvant D Perez JM (éds). Dossier, INRA Prod. Anim., 23, 5-10. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2010.23.1.3280>
- Shrestha M., Garreau H., Balmisse E., Bed'hom B., David I., Guitton E., Helloin E., Lenoir G., Maupin M., Robert R., Lantier F., Gunia M., 2020. Genetic parameters of resistance to pasteurellosis using novel response traits in rabbits. Genet. Sel. Evol., 52, 34. <https://doi.org/10.1186/s12711-020-00552-8>
- Slagboom M., Hjorto L., Sorensen A.C., Mulder H.A., Thomassen J.R., Kargo M., 2020. Possibilities for a specific breeding program for organic dairy production. J. Dairy Sci., 103, 6332-6345. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16900>
- Soleimani T., Gilbert H., 2020. Evaluating environmental impacts of selection for residual feed intake in pigs. Animal, 14, 2598-2608. <https://doi.org/10.1017/S175173112000138X>
- Soussana J.F., Tichit M., Lecomte P., Dumont B., 2014. Agroecology : integration with livestock. In: Agroecology for food security and nutrition, FAO Intern. Symp., Rome, Italy, 225-249.
- Stella A., Nicolazzi E.L., Van Tassel C.P., Rothschild M.F., Colli L., Rosen B.D., Sonstegard T.S., Crepaldi P., Tosser-Klopp G., Joost S., 2018. AdaptMap: exploring goat diversity and adaptation. Genet. Sel. Evol., 50, 61. <https://doi.org/10.1186/s12711-018-0427-5>
- Theau-Clement M., Tircazes A., Saleil G., Monniaux D., Bodin L., Brun J.M., 2015. Preliminary study of the individual variability of the sexual receptivity of rabbit does. World Rabbit Sci., 23, 163-169. <https://doi.org/10.4995/wrs.2015.3471>
- Thomas M., Fortun-Lamothe L., Joven M., Tichit M., González-García 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. (éds). INRA Prod. Anim., 27, 89-100. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.2.3057>
- Tixier-Boichard M., Verrier E., Rognon X., Zerjal T., 2015. Farm animal genetic and genomic resources from an agroecological perspective. Front. Genet., 6, 153. <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00153>
- Tixier-Boichard M., Lecerf F., Hérault F., Bardou P., Klopp C., 2020. Le projet « Mille Génomes Gallus » : partager les données de séquences pour mieux les utiliser. INRAE Prod. Anim., 33, 189-202. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.3.4564>
- Tortereau F., Marie-Etancelin C., Weisbecker J.L., Marcon D., Bouvier F., Moreno-Romieux C., Francois D., 2020. Genetic parameters for feed efficiency in Romane rams and responses to single-generation selection. Animal, 14, 681-687. <https://doi.org/10.1017/S1751731119002544>
- Tran T.S., Beaumont C., Salmon N., Fife M., Kaiser P., Le Bihan-Duval E., Vignal A., Velge P., Calenge F., 2012. A maximum likelihood QTL analysis reveals common genome regions controlling resistance to Salmonella colonization and carrier-state. BMC Genomics, 13, 198. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-198>
- Verrier E., Audiot A., Bertrand C., Chapuis H., Charvolin E., Danchin-Burge C., Danvy S., Gouridine J.L., Gaultier P., Guémené D., Laloë D., Lenoir H., Leroy G., Naves M., Patin S., Sabbagh M., 2015. Assessing the risk status of livestock breeds: a multi-indicator method applied to 178 French local breeds belonging to 10 species. Anim. Genet. Resources, 57, 105-118. <https://doi.org/10.1017/S2078633615000260>

Wezel A., Jauneau J.C., 2011. Agroecology – Interpretations, approaches and their links to nature conservation, rural development and ecotourism. In: Integrating agriculture, conservation and ecotourism: examples from the field. Campbell W.B., López Ortiz S. (Eds.), Springer Netherlands,

Dordrecht, The Netherlands, 1-25. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1309-3_1

Zhang Q., Cao X., 2019. Epigenetic regulation of the innate immune response to infection. *Nat. Rev. Immunol.*, 19, 417-432. <https://doi.org/10.1038/s41577-019-0151-6>

Zhang X., Li Z., Yang H., Liu D., Cai G., Li G., Mo J., Wang D., Zhong C., Wang H., Sun Y., Shi J., Zheng E., Meng F., Zhang M., He X., Zhou R., Zhang J., Huang M., Zhang R., Li N., Fan M., Yang J., Wu Z., 2018. Novel transgenic pigs with enhanced growth and reduced environmental impact. *eLife*, 7, e34286. <https://doi.org/10.7554/eLife.34286>

Résumé

Les filières et systèmes d'élevage ont considérablement évolué au cours du xx^e siècle. La recherche en génétique animale et la mise en place des programmes d'amélioration génétique ont joué un rôle important dans cette évolution. Aujourd'hui, le modèle dominant, caractérisé par une utilisation intensive d'intrants, une très grande spécialisation des systèmes et la recherche de coûts de production toujours plus bas, est remis en cause. Un objectif désormais largement partagé est de contribuer à l'émergence de systèmes alimentaires durables, équitables, sains et respectueux de l'environnement. L'agroécologie est un moyen pour atteindre cet objectif et guider la nécessaire transition des systèmes d'élevage, à laquelle la génétique animale doit contribuer. Des exemples de contributions passées, actuelles et potentielles sont présentés et positionnés selon cinq principes d'agroécologie proposés pour guider l'évolution des systèmes d'élevage. La plupart, telles que la sélection d'animaux résistants à différentes maladies infectieuses ou valorisant de façon plus efficace leur alimentation, correspondent à des niveaux de transition agroécologique faible, dans la mesure où elles ne remettent pas en cause les fondements, les composantes ou la conception générale des systèmes. De nouvelles contributions, visant une transition forte, fondée sur une reconception en profondeur des systèmes d'élevage, sont à développer à l'avenir.

Abstract

Contributions of animal genetics to the agroecological transition of livestock farming systems

Livestock production systems have considerably evolved over the 20th century. Research in animal breeding and genetics and the implementation of genetic improvement programmes have played an important role in this evolution. Today, the dominant model, characterized by an intensive use of inputs, a very high degree of specialization of production systems and the search for ever lower production costs, is questioned. A now widely shared objective is to contribute to the emergence of sustainable, equitable, healthy and environmentally-friendly food systems. Agroecology is a means to achieve this goal and a guide to the necessary transition of livestock systems, to which animal genetics must contribute. Examples of past, current and potential contributions are presented and positioned according to five agroecological principles proposed as a guide to the evolution of livestock systems. Most of them, such as the selection of animals resistant to different infectious diseases or making a more efficient use of feed, correspond to low levels of agroecological transitions in that they do not question the foundations, components or general design of production systems. Further contributions aimed at a strong transition, based on an in-depth redesign of livestock systems, should be developed in the future.

DUCOS A., DOUHARD F., SAVIETTO D., SAUTIER S., FILLON V., GUNIA M., RUPP R., MORENO-ROMIEUX C., MIGNON-GRASTEAU S., GILBERT H., FORTUN-LAMOTHE L., 2021. Contributions de la génétique animale à la transition agroécologique des systèmes d'élevage. *INRAE Prod. Anim.*, 34, 79-96.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.2.4773>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.