



HAL
open science

Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques ?

Florence Phocas, Catherine Belloc, Joël Bidanel, Luc Delaby, Jean-Yves Dourmad, Bertrand Dumont, Pauline Ezanno, Laurence Lamothe, Gilles Foucras, Brigitte Frappat, et al.

► To cite this version:

Florence Phocas, Catherine Belloc, Joël Bidanel, Luc Delaby, Jean-Yves Dourmad, et al.. Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques ?. INRA Productions Animales, 2017, 30 (1), pp.31-46. 10.20870/productions-animales.2017.30.1.2232 . hal-01608756

HAL Id: hal-01608756

<https://hal.science/hal-01608756>

Submitted on 25 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques ?

F. PHOCAS¹, C. BELLOC², J. BIDANEL³, L. DELABY⁴, J.-Y. DOURMAD⁴, B. DUMONT⁵, P. EZANNO², L. FORTUN-LAMOTHE⁶, G. FOUCRAS⁷, B. FRAPPAT⁸, E. GONZALEZ-GARCIA⁹, D. HAZARD⁶, C. LARZUL⁶, S. LUBAC¹⁰, S. MIGNON-GRASTEAU¹¹, C. MORENO-ROMIEUX⁶, M. TIXIER-BOICHARD¹, M. BROCHARD⁸

¹ GABI, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 78350, Jouy-en-Josas, France

² BIOEPAR, INRA, Oniris, 44307, Nantes, France

³ IFIP - Institut du porc, La motte au Vicomte, 35650, Le Rheu, France

⁴ PEGASE, AgroCampus, INRA, 35590, Saint-Gilles, France

⁵ UMR1213 Herbivores, INRA, Vetagro Sup, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France

⁶ GenPhySE, Université de Toulouse, INRA, INPT, INP-ENVT, 31320, Castanet Tolosan, France

⁷ IHAP, INRA, INPT, Université de Toulouse, INP-ENVT, 31076, Toulouse, France

⁸ Institut de l'Élevage, 149 rue de Bercy, 75595, Paris, France

⁹ SELMET, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, 34000, Montpellier, France

¹⁰ Institut Technique de l'Aviculture, 23 rue Baldassini, 69364, Lyon, France

¹¹ URA, INRA, 37380, Nouzilly, France

Courriel : Florence.phocas@inra.fr

La conception et le pilotage de systèmes d'élevage agro-écologiques impliquent de reconnaître et de valoriser la diversité biologique et les interactions biotiques à tous les niveaux d'organisation, ainsi que de solliciter les capacités adaptatives des animaux face aux fluctuations de leur milieu d'élevage. Dans ce contexte, la question essentielle posée à la sélection animale est : Comment améliorer l'adaptation des animaux d'élevage à des milieux moins homogènes et contrôlés ?¹

L'Agro-Écologie (AE) est mise en avant par la recherche agronomique (Guillou *et al* 2013) comme un ensemble de modes de production permettant de répondre aux enjeux de durabilité des systèmes. Elle s'inscrit dans un mouvement de fond visant à identifier des stratégies pour produire mieux et autrement en conciliant performances techniques, environnementales, économiques et sociales. Lancé en 2012, le « Projet Agro-Écologique pour la France » vise à conjuguer l'ensemble de ces performances tant au niveau de l'exploitation qu'à des niveaux plus englobants (territoires, filières, etc.) en réponse à la Loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (Loi n° 2014-1170, 13 octobre 2014).

L'AE se définit comme l'application des concepts et principes de l'écologie à la conception et à la gestion d'agroécosys-

tèmes durables (Altieri 2002, Gliessman 2006). Elle se traduit par un ensemble de pratiques dont l'objectif est d'exploiter, voire d'amplifier, les processus naturels afin de concevoir des systèmes productifs, peu artificialisés, respectueux de l'environnement et moins dépendants des intrants. Les spécificités des systèmes d'élevage ont longtemps été ignorées par les théoriciens de l'AE (Gliessman 2006). Les principes énoncés par Altieri (2002) pour la protection intégrée des cultures ont été le point de départ d'une réflexion structurante de l'INRA pour analyser comment les concepts de l'AE pouvaient contribuer à l'innovation dans les systèmes de production animale. Ils ont été reformulés au travers de cinq principes appliqués aux productions animales (Dumont *et al* 2013, Thomas *et al* 2014) ayant trait à *i*) la gestion intégrée de la santé animale, *ii*) la diminution des res-

sources consommées, *iii*) la limitation des émissions polluantes, *iv*) le renforcement de la résilience des systèmes et *v*) la préservation de la biodiversité.

La mise en place de ces principes s'appuie sur le renforcement des interactions positives (ou synergies) entre les composantes du système d'élevage ainsi que sur une organisation spatio-temporelle des cycles biologiques favorisant une utilisation plus efficace des ressources (meilleure adéquation entre besoins des animaux et disponibilité de la ressource alimentaire par exemple). Dans cette perspective, le système est raisonné en lien avec son environnement, ce qui implique de ne plus chercher à affranchir les animaux des fluctuations de cet environnement, mais plutôt de favoriser leur capacité à valoriser les ressources locales pour survivre, produire

¹ Cet article est le fruit d'une expertise collective de l'INRA, Idele, IFIP et ITAVI conduite en 2015 à la demande du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt (Phocas *et al* 2015).

et se reproduire dans un environnement moins maîtrisé. Ainsi, l'AE représente-t-elle un changement de paradigme par rapport aux systèmes intensifs « classiques » basés sur une forte utilisation d'intrants de synthèse pour tamponner les effets des fluctuations du milieu. L'AE prend en compte le contexte local et les potentialités du milieu afin d'assurer une production stable sur le long terme et non forcément maximale à court terme. Il s'agit de mobiliser les capacités d'adaptation des animaux (Dumont *et al* 2014), qu'elles soient comportementales (*e.g.* les apprentissages) ou physiologiques (*e.g.* la croissance compensatrice suite à une phase de restriction alimentaire), en adaptant le cycle de production des animaux, afin de tirer au mieux parti de la diversité et de la disponibilité des ressources. Dans le champ de la gestion intégrée de la santé animale, on cherchera à perturber les cycles hôte-pathogènes pour limiter la virulence et/ou la propagation des agents pathogènes, à accroître la résistance des animaux pour réduire les besoins de traitements sanitaires.

L'AE implique donc une démarche systématique qui questionne l'application des sciences animales à la conception de systèmes d'élevage agro-écologiques, et en particulier, la traduction dans les programmes d'amélioration génétique des animaux. Dans cette synthèse, nous présentons l'état des lieux de l'offre génétique au regard des enjeux de l'AE, et nous explicitons les marges de manœuvre relevant de la sélection animale qui soient à même de faciliter la transition agro-écologique en élevage. Nous avons restreint le champ de notre expertise aux programmes de sélection concernant les pays développés et les milieux tempérés, ainsi qu'aux espèces de ruminants, porcs et volailles.

L'application des principes agro-écologiques va affecter les trois principales étapes d'un programme de sélection génétique, à savoir :

i) la définition de l'objectif de sélection en équilibrant l'importance des caractères de production et des aptitudes fonctionnelles (reproduction, survie, bien-être et santé) ;

ii) la réalisation d'une évaluation génétique sur des critères de sélection pertinents mesurés dans les conditions d'élevage souhaitées, ou en considérant les interactions Génotype-Environnement (G×E) existantes ;

iii) la sélection et l'utilisation des reproducteurs pour créer le progrès génétique en adéquation avec l'objectif de sélection des races/lignées (choix collectif), et répondre aux besoins individuels des éleveurs (offre génétique diversifiée).

1 / Définir des objectifs de sélection équilibrés entre l'amélioration de la production et les aptitudes fonctionnelles des animaux

Le débat public est actuellement vif sur la capacité des animaux sélectionnés et élevés dans les systèmes conventionnels à survivre, se reproduire et maintenir une production suffisante dans des environnements moins contrôlés. La sélection animale est passée d'une dimension locale à une dimension globale grâce à des pratiques internationales standardisées développées par la génétique quantitative, la génomique, les technologies de la reproduction et les échanges internationaux de semences. Au sein d'une race, les éleveurs utilisent des reproducteurs issus d'un même programme de sélection et choisis pour leur plus-value sur les critères de performance essentiels en systèmes conventionnels (Nauta *et al* 2001). En revanche, l'AE conduit à rechercher des animaux aux profils variés et robustes dans une large gamme d'environnements.

Des années 1960 à 1980, les programmes d'amélioration génétique ont visé une productivité maximale dans tous les pays d'élevage. La sélection était généralement réalisée à partir de performances enregistrées sur un faible nombre de caractères de production. Ceci a favorisé l'essor international de quelques races particulièrement bien adaptées à la demande du marché, au détriment des races locales dont certaines ont disparu. Toutefois, le nombre de races répertoriées en France reste très important (Phocas *et al* 2015) grâce en particulier à des actions de conservation et valorisation des races locales qui ont débuté dès les années 1970. Cela offre un réservoir génétique conséquent pour repérer et utiliser les types génétiques adaptés à une diversité d'environnements.

Depuis les années 1990, les programmes d'amélioration génétique se sont progressivement réorientés pour faire face à la maîtrise des coûts de production dans un contexte de mondialisation des échanges, et aux exigences sociétales en matière de sécurité sanitaire, de qualité des produits, de préservation de l'environnement et d'éthique de production. Dans de nombreuses filières, l'objectif premier de la sélection est aujourd'hui d'améliorer la robustesse des animaux inscrits dans un processus de production (Phocas *et al* 2014a). La robustesse est associée, d'une part, à l'amélioration ou au maintien des aptitudes fonctionnelles des animaux telles que la santé, le bien-être et la capacité de reproduction dans un milieu donné,

et, d'autre part, à l'évaluation des interactions G×E comme indicateur de la capacité d'adaptation des animaux à une large gamme d'environnements. La robustesse se rapproche donc du concept de « plasticité phénotypique » des animaux, aussi appelé « sensibilité environnementale », et qui correspond à la propriété d'un génotype à exprimer des phénotypes différents dans des environnements différents. L'objectif est d'obtenir des animaux dont les performances soient peu sensibles aux variations de l'environnement afin qu'ils puissent produire et se reproduire dans des milieux divers et fluctuants (Dumont *et al* 2014).

Cette réorientation est également cruciale pour mieux répondre aux attentes sociétales en termes de conditions de vie des animaux d'élevage et de systèmes de production plus diversifiés (Dockès *et al* 2011). Elle vise à atténuer voire à inverser les évolutions défavorables sur des caractères de santé, survie et reproduction constatées dans certaines filières du fait d'une sélection intensive des animaux sur les caractères de production (Rauw *et al* 1998) qui induit *in fine* une moindre efficacité des systèmes de production. Cette stratégie implique d'accroître le nombre de caractères inclus dans l'objectif de sélection d'une population. Jusqu'à présent, la prise en compte de nouveaux caractères se fait de manière cumulative dans les programmes de sélection : le nouveau caractère vient en complément des caractères déjà sélectionnés, en faisant évoluer le poids accordé à chacun dans l'objectif de sélection. Il s'agit ainsi d'améliorer une combinaison de caractères ayant trait aux fonctions biologiques de production, reproduction, survie et santé des animaux pour tout système.

Si l'amélioration de la robustesse est l'objectif global recherché par tout éleveur quel que soit son mode de production, certains éleveurs engagés dans la transition agro-écologique pourraient souhaiter une sélection plus orientée vers d'autres aptitudes que celles privilégiées en élevage conventionnel. Il faut alors leur offrir de nouvelles combinaisons de caractères adaptées à leurs objectifs de sélection. Ces combinaisons peuvent être proposées en quantifiant la valeur marchande des caractères à améliorer par une modélisation bioéconomique du profit de l'élevage en considérant les mécanismes physiologiques sous-jacents aux performances des animaux dans le système envisagé (Leenhouwers *et al* 2011). Au-delà de cette quantification économique, une approche basée sur une hiérarchisation des préférences déclarées par les acteurs (éleveurs, sélectionneurs, consommateurs...) est envisagée depuis une dizaine d'années. Elle permet de prendre en compte des intérêts

divergents et de quantifier la valeur non marchande des caractères à améliorer (Sölkner *et al* 2008, Nielsen *et al* 2014). Notons que la standardisation tant des animaux que des conditions d'élevage paraît antinomique avec les principes mêmes de l'AE qui prône une adaptation des animaux aux ressources et contraintes locales dans des systèmes peu artificialisés et très liés à leur environnement physique. Face à la diversité des milieux et des systèmes d'élevage, il n'y a donc pas un animal type agro-écologique, mais des animaux aux profils variés permettant de répondre aux attentes de l'AE.

Très peu de travaux portent sur les objectifs de sélection et l'offre génétique attendue par les éleveurs engagés dans des systèmes de production alternatifs, en rupture avec les systèmes les plus fréquemment rencontrés (dits conventionnels). À ce jour, seules quatre études, publiées, ont abordé ce sujet et sont essentiellement dédiées à l'agriculture biologique. Une première enquête a été réalisée par l'« *International Federation of Organic Agriculture Movements* » (IFOAM 2014) et concerne les filières animales de nombreux pays. Deux études ont été conduites sur les systèmes suédois, l'une en production laitière bovine (Ahlmán *et al* 2014), l'autre en production porcine (Wallenbeck *et al* 2015). Enfin, une quatrième étude a été réalisée en 2015 sur les productions françaises de ruminants (laitiers et allaitants des espèces bovine, ovine et caprine), porcs et volailles (Phocas *et al* 2015). Ces quatre études soulignent que les caractères d'intérêt majeur pour les éleveurs impliqués dans des démarches agro-écologiques concernent la robustesse des animaux, en particulier leur santé et leur capacité à se reproduire, ainsi que leur capacité à valoriser des fourrages et ressources alimentaires locales. Cependant, quelle que soit la filière, les éleveurs ne souhaitent pas établir de priorité entre les aptitudes et préfèrent parler d'aptitude globale, de multi-compétences ou d'équilibre entre aptitudes. Très souvent, cette aptitude globale est appelée « rusticité » par les éleveurs, dans le sens d'un cumul équilibré de la plupart des aptitudes animales permettant de produire dans un environnement peu favorable et fluctuant, en valorisant les ressources disponibles (Phocas *et al* 2016a). Cette notion est donc proche de la définition académique de la robustesse.

Dans les filières de ruminants, les éleveurs jouent un rôle important dans la sélection et l'organisation des filières (au moins à l'échelle européenne). Leurs attentes sont donc prises en compte dans les programmes de sélection. Face aux coûts de production élevés au regard de la valorisation souvent faible des produits, l'attente première des éleveurs est de

produire de manière économe. En outre, le besoin de pratiques d'élevage simplifiées est une priorité en raison de l'agrandissement des troupeaux et des exploitations. L'objectif est donc de produire des animaux « autonomes », c'est à dire faciles à élever (mise-bas sans aide, animaux dociles...) avec de bonnes aptitudes de reproduction (fertilité, qualités maternelles), une bonne résistance aux maladies et une bonne efficacité alimentaire permettant de limiter les intrants (Dockès *et al* 2011). Plutôt qu'une remise en cause des équilibres au sein des objectifs de sélection actuels dans les filières de ruminants, il ressort des enquêtes réalisées en France que la sélection devrait mieux intégrer un caractère essentiel, l'efficacité alimentaire sur des rations à base de fourrages grossiers ou de qualité variable. Ce caractère n'est pas évalué dans les programmes de sélection actuels, mais il est quasi-unanimement cité par les éleveurs de toutes les filières (Phocas *et al* 2016a).

Dans certains pays, des index synthétiques de sélection spécifiques ont été développés pour les races bovines laitières à partir de priorités définies par les éleveurs en agriculture biologique ; c'est le cas par exemple de l'index Valeur d'Élevage Globale Écologique (VEGE) utilisé en Suisse à partir de 2000 (Haas et Bapst 2004) ou de l'index synthétique organique proposé en Ontario en 2006 (Rozzi *et al* 2007). La motivation initiale pour ces index spécifiques était de mettre plus de poids sur les caractères fonctionnels que celui mis dans les index nationaux. Cependant, le poids accordé à ces caractères ayant crû dans les dernières évolutions des index nationaux, l'index VEGE a été abandonné en 2014 (Fric et Spengler Neff 2014). En ovins allaitants, une comparaison entre Nouvelle-Zélande et Irlande (Santos *et al* 2015) a révélé une forte corrélation (0,86) entre les index de synthèse utilisés pour le renouvellement des troupeaux, alors que les conduites d'élevage sont très différentes entre ces deux pays. En Nouvelle-Zélande, les troupeaux sont très grands et conduits en plein-air intégral avec des régimes exclusivement fourragers tant pour les brebis que pour les agneaux. En Irlande, la plupart des éleveurs font agneler les brebis en bergerie et supplémentent à volonté en concentrés brebis et agneaux jusqu'au sevrage. Les deux situations étant représentatives de la diversité rencontrée en élevage ovin allaitant et les deux index ayant été établis sur des considérations économiques, on peut raisonnablement supposer qu'un index de sélection spécifique à l'élevage agro-écologique des ovins allaitants n'apporterait aucun bénéfice.

Dans les filières de monogastriques, les attentes des éleveurs conventionnels

sont d'améliorer encore la productivité de l'élevage (Dockès *et al* 2011) tout en réduisant les intrants alimentaires, vétérinaires et les coûts de main-d'œuvre (Merks *et al* 2012). Dans cette optique, la sélection devrait poursuivre l'amélioration des caractères de production-reproduction classiques : en lignées paternelles, cela concerne l'amélioration de l'efficacité alimentaire, l'augmentation de la vitesse de croissance et de la teneur en muscle des carcasses, tout en maintenant la qualité technologique du produit (le jambon en filière porcine, la viande en filières de volailles de chair et les œufs en filière de poules pondeuses) ; en lignées maternelles, l'objectif reste à ce jour l'augmentation de la productivité numérique des truies et de la persistance de la ponte des volailles. Globalement, pour développer une génétique mieux adaptée aux enjeux de l'AE dans les filières porcine et avicoles, il s'agit avant tout de donner priorité à l'amélioration des caractères de santé, puis aux caractères associés à la rusticité et la facilité d'élevage des animaux, tout en améliorant l'efficacité de la production (Phocas *et al* 2016a).

2 / Considérer dans l'évaluation génétique les interactions G×E et des critères de sélection mesurés en conditions d'élevage de production

Sélectionner pour une meilleure adaptation à l'environnement signifie que l'on choisit ou procréé les génotypes qui répondent le mieux dans les milieux où les animaux seront élevés. Or il existe fréquemment des disparités entre le milieu dans lequel les animaux sont sélectionnés (ambiance, logement, alimentation) et celui où leurs descendants produiront. En particulier, le changement climatique est un facteur essentiel à considérer pour assurer la durabilité des productions animales dans le monde, y compris en Europe (www.eea.europa.eu).

Nous synthétisons ici les travaux de recherche qui pourraient amener à définir de nouveaux critères de sélection permettant de répondre aux trois interrogations essentielles pour favoriser le développement d'une génétique animale adaptée aux enjeux de l'AE.

2.1 / Quels nouveaux critères de sélection pour améliorer la santé des animaux face aux aléas climatiques et sanitaires ?

Le changement climatique rend nécessaire l'adaptation des animaux aux stress abiotiques (chaleur, humidité) et biotiques (agents pathogènes, en particulier les

parasites) du fait de l'évolution induite des conditions sanitaires dans des systèmes à bas intrants, et en particulier dans les élevages au sol ou au pâturage.

a) Adapter les animaux à la chaleur

Un stress thermique prolongé entraîne une diminution des niveaux de production et de reproduction des animaux liée à la baisse de leur ingestion. Il faut alors résoudre le conflit entre production et adaptation à la chaleur : pour produire, l'animal doit consommer de l'aliment, ce qui entraîne une production de chaleur intense le rendant mal adapté à des conditions chaudes. Il s'agit donc soit d'ajuster sa consommation alimentaire en période chaude, soit d'améliorer sa capacité à dissiper la chaleur.

Chez les monogastriques, ce champ d'étude est particulièrement actif car leur production se développe essentiellement dans les pays tropicaux où on diffuse le même matériel génétique que dans les pays tempérés. Chez les ruminants, nombre de travaux ont également été conduits en milieux tropicaux (Berman 2011) et plus récemment dans des milieux tempérés (Phocas *et al* 2016a).

Dans les différentes espèces, la variabilité génétique intra-race est suffisante pour permettre une sélection sur la résistance à la chaleur. Jusqu'à présent, le critère principal de sélection est le maintien des performances de production en condition de stress thermique. D'autres caractères, comme les changements de température corporelle, de production de chaleur ou de rythme respiratoire, sont étudiés comme critères potentiels de sélection (Renaudeau *et al* 2004, Alhidary *et al* 2012).

Par ailleurs, des gènes à effet majeur sur la résistance à la chaleur ont été identifiés, dont certains font déjà l'objet de programmes d'introgression dans les populations animales en sélection. Par exemple, la réduction de l'emplumement a été testée chez les volailles *via* les gènes « cou nu », « frisé » ou « sans écaille ». Les animaux porteurs de ces gènes ont tous montré leur capacité à maintenir de bonnes performances en conditions chaudes (Azoulay *et al* 2011, Zerjal *et al* 2013). De même, en race Holstein l'introgression du variant « slick » du récepteur de la prolactine, qui a un effet sur le stress thermique par augmentation de la transpiration chez les mutants, a montré la pertinence de cette approche pour les ruminants (Littlejohn *et al* 2014).

b) Améliorer la santé des animaux dans des environnements moins contrôlés

L'émergence d'une ou plusieurs maladies à l'échelle d'un troupeau est multifactorielle. Entrent en jeu la source et la

virulence des agents pathogènes, les conditions climatiques, des pratiques d'élevage telles que la densité et les successions d'animaux sur les pâtures, la disponibilité des ressources alimentaires, la résistance et la tolérance intrinsèque de l'animal à l'apparition de troubles infectieux ou parasitaires et l'utilisation de traitements préventifs ou curatifs n'engendrant pas de résistance des agents pathogènes aux molécules médicamenteuses.

Dans les systèmes à bas intrants, les traitements sont limités alors que l'accès accru au pâturage ou au parcours augmente le risque d'exposition à divers pathogènes, notamment les parasites gastro-intestinaux (Moréno-Romieux *et al* 2015). Malgré l'importance des efforts de recherche dédiés à la génétique de la santé animale, de nombreux points restent à élucider. En particulier, la possibilité d'obtenir des animaux résistants à tout agent pathogène et la nature des critères de sélection qui permettraient une amélioration de cette résistance générale ne sont pas encore clairement établies. Trois approches différentes ont été étudiées. Elles sont très brièvement évoquées ici et plus largement décrites par Davies *et al* (2009) et Bishop et Woolliams (2014).

La première approche est fondée sur une sélection génétique directement dirigée vers la résistance à une maladie spécifique. Cette stratégie est intéressante pour les maladies à forte incidence et impact économique conséquent, telles que les mammites pour les ruminants laitiers ou les infections par des parasites gastro-intestinaux pour les petits ruminants et les volailles. Si une telle sélection a montré son efficacité en volailles (Pinard-van der Lan *et al* 2003), en porcs (Kadowaki *et al* 2012) et en ruminants (Morris 2007, Rupp *et al* 2009), elle rencontre néanmoins un écueil important : l'identification des agents pathogènes les plus problématiques. En effet, sélectionner sur la résistance à tous les agents pathogènes pris un à un n'est pas possible, et améliorer la résistance à un seul agent pathogène n'implique pas nécessairement que l'on améliore la résistance générale de l'individu. Or, il est très difficile de définir quel est l'agent pathogène à combattre en priorité, car celui-ci dépend des conditions de production et il est rare qu'un seul agent prédomine dans une filière donnée (Davies *et al* 2009).

Une deuxième approche est de sélectionner simultanément sur plusieurs agents pathogènes majeurs en ciblant les mécanismes communs de réponse des animaux tels que ceux du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) dont l'importance a été mise en évidence en volailles (Lamont *et al* 2003), porcs

(Warner *et al* 1986) et bovins (Ellis 2004). Toutefois, il faut veiller à maintenir une forte diversité du CMH afin de préserver la capacité des populations à répondre à la variabilité et l'évolution rapide des agents pathogènes.

Une troisième approche, plus globale, consiste à améliorer l'immunocompétence générale des animaux en sélectionnant sur un ensemble de caractères représentatifs des différentes facettes de la réponse immunitaire mobilisée pour résister aux infections, comme la production d'anticorps, la réponse cellulaire et l'activité phagocytaire. Une forte variabilité génétique de ces réponses immunes a été observée chez les porcs (Flori *et al* 2011), les volailles (Lamont *et al* 2003) et les bovins (Thompson-Crispi *et al* 2012). Cependant, l'efficacité d'une telle approche pour améliorer la santé générale des animaux d'élevage reste controversée (Wilkie et Mallard 1999, Lamont *et al* 2003).

2.2 / Quels nouveaux critères de sélection pour améliorer l'efficacité d'utilisation des ressources alimentaires par les animaux ?

a) Économiser les ressources naturelles

Pour soutenir le développement durable des productions animales, il faut limiter la compétition pour l'usage des terres avec les cultures directement consommables par l'Homme et réduire l'empreinte écologique des élevages en optimisant l'utilisation des ressources alimentaires. La production d'effluents (matières non digérées, déchets du métabolisme) est inversement liée à l'efficacité de transformation des aliments. Valoriser des ressources alimentaires locales ou régionales, peu concurrentielles de l'alimentation humaine, nécessite de connaître et renforcer l'adéquation entre les potentialités du milieu et les besoins des animaux. Cette adéquation peut être envisagée à trois niveaux d'organisation : le territoire (hors de notre périmètre d'étude centrée sur l'animal), le système de production et l'animal. À l'échelle du système, l'éleveur cherche à mettre en phase (via les cycles de reproduction des femelles et la complémentarité entre types d'animaux) la vie du troupeau, et la demande alimentaire qui en découle, avec la disponibilité souvent saisonnée des ressources alimentaires. À l'échelle de l'animal, l'éleveur recherche des individus capables de se satisfaire durablement des ressources alimentaires disponibles et de leurs fluctuations saisonnières. Dans les deux cas, on recherche le point d'équilibre entre l'offre alimentaire et les besoins du troupeau.

Pour améliorer l'efficacité d'utilisation des aliments, on sait depuis longtemps

sélectionner sur l'indice de consommation (ratio de la quantité d'aliment consommée et la quantité de lait, de viande ou d'œufs produite), la consommation résiduelle (écart entre la consommation réelle et la consommation théorique estimée d'après les performances de production) ou encore l'efficacité digestive, dès lors que l'on peut mesurer de manière fiable les quantités ingérées. Une synthèse des questions scientifiques et des verrous technologiques autour de l'amélioration de l'efficacité alimentaire des animaux (Phocas *et al* 2014b) explicite l'état des connaissances et les problèmes génériques ou spécifiques des filières pour développer de nouveaux critères de sélection.

Si la littérature relative à l'efficacité alimentaire est pléthorique dans toutes les filières, les références concernant des animaux mis dans des conditions d'élevage où les ressources sont limitantes (en quantité ou en qualité) sont bien plus rares. L'amélioration de l'efficacité alimentaire a en effet été classiquement réalisée dans des environnements où les animaux étaient alimentés avec des rations peu fibreuses, riches en énergie, et très digestibles. Dans une perspective agro-écologique, la question n'est donc pas vraiment sur la mesure de l'efficacité alimentaire elle-même, mais plutôt la composition de la ration utilisée pour cette mesure. Il s'agit de rechercher des animaux valorisant mieux l'herbe et les fourrages pour les ruminants, et acceptant des aliments locaux de moindre qualité énergétique et protéique pour les monogastriques. De nouvelles ressources alimentaires riches en protéines comme les insectes ou les algues sont actuellement envisagées (Becker 2007, Makkar *et al* 2014). Il faut en évaluer le bilan environnemental et l'impact sur l'efficacité des productions animales.

Une autre question essentielle pour toutes les espèces concerne l'efficacité de l'utilisation protéique et minérale des aliments. L'essentiel des travaux ont été conduits en supposant que les apports en acides aminés et en minéraux ne limitent pas la couverture des besoins d'entretien et de production des animaux. Or, pour réduire les rejets azotés dans l'environnement et accroître l'autonomie protéique des élevages, il est nécessaire d'explorer les possibilités d'amélioration de l'efficacité protéique des animaux. Toutefois, très peu de résultats sont disponibles dans la bibliographie, même si certains laissent présager d'une variabilité entre animaux à la fois en termes d'efficacité digestive et métabolique (de Verdal *et al* 2013b).

b) Améliorer l'impact environnemental de l'élevage

À efficacité alimentaire constante, on peut chercher à réduire la quantité des

rejets animaux. Pour les émissions de gaz à effet de serre (Herrero *et al* 2016), cela concerne essentiellement le méthane et le protoxyde d'azote provenant des effluents issus de toutes les filières, et le méthane entérique des ruminants.

La connaissance de la composition des rejets et des émissions est indispensable pour leur bonne valorisation comme fertilisant ou pour la production d'énergie. Ainsi, l'amélioration de la composition des rejets, par exemple en améliorant l'équilibre du ratio azote/phosphore des rejets des monogastriques (de Verdal *et al* 2013a) en fonction de leur utilisation ultérieure est une piste de recherche de nouveaux critères de sélection prometteuse.

Chez les ruminants, il existe un dilemme entre favoriser la valorisation des régimes essentiellement à base de fourrages et réduire les émissions de méthane. En effet, les ruminants produisent d'autant plus de méthane qu'ils sont nourris avec plus de fourrages et moins de concentrés. Cependant, à régime alimentaire donné, il existe une variabilité individuelle des émissions chez les bovins (de Haas *et al* 2011, Bell *et al* 2014) et les ovins (Pinares-Patino *et al* 2013). Bell *et al* (2011) ont modélisé et comparé l'impact environnemental (production d'équivalent- CO_2 des animaux) dans des systèmes laitiers avec pâturage estival et un apport de concentré modéré (25%), ou sans pâturage et avec un fort apport de concentré (50%). Dans les deux systèmes, le seul moyen de réduire significativement les émissions de CO_2 individuelles est de réduire l'ingéré à production constante, ce qui équivaut à diminuer la consommation alimentaire résiduelle et donc à rechercher des animaux plus efficaces.

2.3 / Évaluer les interactions G×E pour sélectionner des animaux plus robustes

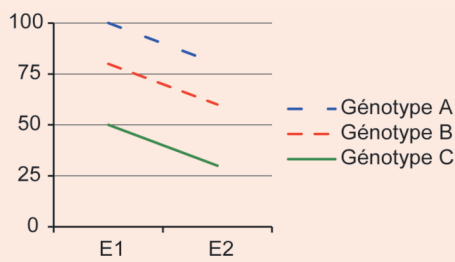
La sélection dans des milieux protégés tend à augmenter la sensibilité à l'environnement. En effet, les animaux les plus productifs en situation de ressources non limitantes sont sélectionnés au détriment d'animaux moins productifs, mais dont les performances pourraient être plus stables en situation limitante. À un même génotype peuvent correspondre des expressions phénotypiques variées associées à des environnements différents, ce qui traduit l'existence d'interactions G×E qui ne sont généralement pas considérées dans l'évaluation génétique classique. Les quatre principales sources d'interactions sont le mode d'élevage, le climat, l'alimentation, et surtout le niveau de « pression sanitaire ». Ces interactions se traduisent par deux phénomènes différents (encadré). Le premier induit seulement une variance

des performances différente d'un environnement à un autre, ce qui conduit à des effets d'échelle et des réponses à la sélection plus ou moins fortes et éloignées de la réponse attendue. Le second entraîne un reclassement des génotypes selon les environnements où ils s'expriment : les meilleurs génotypes dans un milieu E1 ne sont pas les meilleurs dans un milieu E2. Il s'agit alors d'inclure ces interactions dans la définition des objectifs et critères de sélection des populations, ainsi que dans la sélection et l'utilisation des reproducteurs. Une question majeure est donc d'évaluer l'importance des interactions G×E selon les espèces, les environnements et les aptitudes animales, ce qui implique de conduire de nouvelles études scientifiques en particulier dans les pays tempérés (Phocas *et al* 2015). Une manière de quantifier l'interaction G×E (cf. encadré) est la corrélation génétique entre les caractères mesurés dans des milieux différents. Plus la corrélation génétique est faible, moins la sélection réalisée dans un milieu se révélera efficace dans l'autre milieu.

a) Interactions G×E chez les ruminants

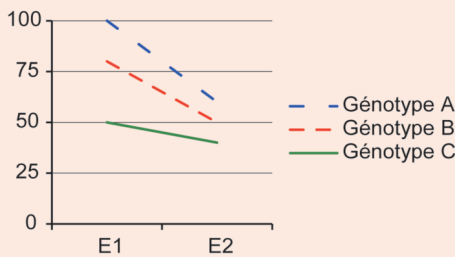
Pour proposer une offre génétique mieux adaptée à la conduite des animaux dans des systèmes peu contrôlés, l'étude des interactions G×E est nécessaire pour apprécier l'aptitude d'un animal à se satisfaire de ressources alimentaires variables en qualité et quantité. Quelques expérimentations de long terme visent à évaluer différents types d'animaux, décrits par leur race ou leur potentiel génétique, dans des milieux contrastés en termes d'apports nutritifs. Les interactions étudiées s'intéressent à l'expression phénotypique des caractères de production et parfois, de reproduction ou de santé. Il existe aussi des études portant sur les performances observées en élevages commerciaux de bovins qui visent à étudier ces mêmes interactions entre milieux identifiés par des descripteurs environnementaux tels que la géographie, le climat, le niveau de production ou la conduite de la reproduction. Les systèmes d'élevage ovin varient aussi considérablement entre pays et régions européennes. Cependant, les ovins étant considérés comme robustes vis-à-vis des variations de leur environnement d'élevage, peu d'études ont évalué les interactions G×E sur leur productivité ou leur santé (Gavojdian *et al* 2014). Des races ovines telles que la Lacaune ont pourtant une diffusion internationale et sont donc élevées dans des conditions d'élevage très contrastées. Récemment, McLaren *et al* (2015) ont montré qu'en race Texel certains génotypes étaient très sensibles à l'environnement alors que d'autres étaient très robustes.

Encadré. Les différentes modalités d'interaction G \times E représentées pour les environnements E1 et E2.



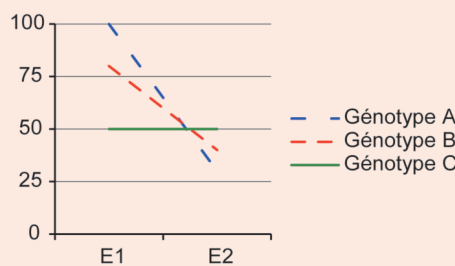
Cas 1 : absence d'effet G \times E sur les performances

- La variabilité génétique est la même sous E1 et E2
 - Les génotypes se classent de la même manière sous E1 et E2
- L'héritabilité des performances est similaire sous E1 et E2
La corrélation génétique est de 1 entre performances sous E1 et sous E2



Cas 2 : effet d'échelle G \times E sur les performances

- La variabilité génétique est plus faible sous E2 que sous E1
 - Les génotypes se classent de la même manière sous E1 et E2
- L'héritabilité des performances peut être différente sous E1 et E2
La corrélation génétique est de 1 entre performances sous E1 et sous E2
Des sensibilités environnementales différentes sont observées entre génotypes



Cas 3 : effet de reclassement G \times E sur les performances

- La variabilité génétique peut être différente sous E1 et E2
 - Les génotypes se classent de manière différente sous E1 et E2
- L'héritabilité des performances peut être différente sous E1 et E2
La corrélation génétique est $< 0,80$ entre performances sous E1 et sous E2
Des sensibilités environnementales très différentes sont observées entre génotypes. Ici par exemple le génotype C est très robuste (= non sensible au changement d'environnement), le génotype A est très sensible

De manière générale, la littérature indique que les interactions G \times E chez les bovins laitiers sont très faibles pour les caractères de production car les corrélations génétiques estimées entre environnements sont souvent très élevées ($> 0,80$). Cette absence d'interactions significatives est observée non seulement entre pays aux conditions d'élevage très différentes (Mark 2004), mais aussi à l'intérieur d'un pays entre élevages de niveaux de production différents (Calus et Veerkamp 2003), ou différant par leurs conditions pédoclimatiques (Haile-Mariam *et al* 2008) ou encore par leur conduite (Boettcher *et al* 2003, Kearney *et al* 2004). Une conséquence de la faible intensité de ces interactions est l'absence de reclassement important des reproducteurs sur les caractères de production selon le milieu d'élevage (Huquet *et al* 2012) pour les principales races laitières utilisées en France (Holstein, Montbéliarde et Normande). En races allaitantes Charolaise et Limousine, Pabiou *et al* (2014) ont trouvé une corrélation génétique moyenne de 0,75 entre pays européens pour le poids au sevrage, ce qui est inférieur à la moyenne de 0,88 observées entre pays pour la production laitière (Mark 2004), mais suffisamment élevé pour s'affranchir de la conduite de programmes de sélection distincts dont l'efficacité serait limitée par leur dimensionnement modeste (Mulder *et al* 2006).

La littérature concernant l'expression des caractères de fertilité, santé, et survie des bovins est rare mais tend à montrer un niveau d'interactions G \times E plus important que pour les caractères de production. Les vaches allaitantes de races continentales, qui ont un potentiel génétique élevé pour la croissance musculaire, ont une moindre fertilité que celles de races britanniques, seulement quand elles sont élevées dans des milieux peu favorables à l'expression de leur potentiel de croissance (Morris *et al* 1993). En race Holstein, il semble en particulier exister une interaction G \times E pour des caractères de reproduction, tels que l'intervalle vêlage – première insémination, selon le niveau de production moyen des élevages ou leur degré d'intensification. Ces interactions sont très variables entre études, de relativement conséquentes (corrélations génétiques autour de 0,6) entre conditions extrêmes observées en Australie (Haile-Mariam *et al* 2008) ou au Canada (Boettcher *et al* 2003), à beaucoup plus modérées (corrélations autour de 0,8) dans les systèmes laitiers du Royaume-Uni (Strandberg *et al* 2009) ou même inexistantes entre élevages à l'herbe et élevages en stabulation des États-Unis (Kearney *et al* 2004).

La saisonnalité de la production fourragère, en quantité comme en qualité, incite à mettre en phase la demande ali-

mentaire du troupeau avec la disponibilité de la ressource. C'est ainsi que les systèmes bovins ou ovins basés sur le pâturage, laitiers ou allaitants, optimisent cette synchronisation par la pratique de mises bas groupées en fin d'hiver/début du printemps. En effet, les besoins des femelles reproductrices sont maximaux quelques semaines après la mise bas, ce qui correspond alors à la période de pleine production des prairies et à une herbe dont la valeur nutritive est naturellement cohérente avec les besoins des animaux, en énergie comme en protéines. L'aptitude d'un animal à mettre bas à un moment choisi, donc à se reproduire chaque année sur une période de temps limitée, revêt un caractère « vital » (Baumont *et al* 2014) souvent évalué dans les expérimentations sur les interactions G \times E (Fulkerson *et al* 2008). Chez les vaches laitières, cette aptitude varie selon les races et est au moins partiellement en opposition avec le potentiel laitier. La réponse dépend du degré de sous-alimentation au regard des besoins liés au potentiel génétique de production de l'animal. La mobilisation importante des réserves corporelles pour pallier l'écart entre les apports nutritionnels et les besoins de l'animal liés à son potentiel génétique, notamment son potentiel laitier, aura pour conséquence une incapacité à assurer une gestation en temps limité. Dans l'expérimentation INRA du

Pin-au-Haras, qui compare des vaches Holstein et Normandes conduites selon des systèmes d'alimentation contrastés dits « Haut » et « Bas » (Delaby et Fiorelli 2014), les vaches Normandes ont une aptitude à se reproduire dans une période de reproduction limitée à 90 jours comparable quel que soit le niveau d'apports nutritifs (respectivement 70 et 68% de re-vêlages dans les deux systèmes). À l'opposé, les vaches Holstein ont une capacité à se reproduire très diminuée avec un niveau bas d'alimentation (47 vs 57% avec le niveau haut). Cette influence différente du milieu sur la fonction de reproduction des deux races n'est pourtant pas systématique. Ainsi, Fulkerson *et al* (2008) en Australie ou Delaby *et al* (2009) en France n'ont pas mis en évidence d'interactions nettes entre différents génotypes et niveaux d'apports nutritifs dans le cas de systèmes conduits en vêlages groupés de printemps.

b) Interactions $G \times E$ chez les monogastriques

Du fait de la structuration des filières monogastriques en différents étages, les animaux sélectionnés sont élevés dans des conditions généralement très différentes de celles des animaux de production. Les premiers sont conduits, donc évalués, dans des conditions très contrôlées et optimisées (température, aliment...), alors que leurs descendants commerciaux sont élevés dans des conditions parfois très différentes et surtout variables d'un élevage à l'autre.

Des interactions significatives ont été mises en évidence chez le poulet label (Mignon-Grasteau 2007) pour lequel le milieu de production, avec accès à un parcours extérieur, est très différent des conditions de sélection (en claustration). De Verdal *et al* (2013b) ont également révélé une interaction entre le régime alimentaire et le niveau génétique sur l'efficacité digestive : si les corrélations génétiques entre régimes blé et maïs sont élevées pour la digestibilité des protéines et des lipides (0,84-0,88), elles sont moindres pour la digestibilité de l'énergie et l'amidon (0,63-0,73). Chez le porc, des interactions $G \times E$ significatives sur la croissance peuvent être observées entre lots en conditions d'élevage standard (Hermesch *et al* 2015). Wallenbeck *et al* (2009) ont étudié les interactions $G \times E$ en comparant élevages porcins conventionnel et biologique. Ils ont observé une interaction $G \times E$ pour la vitesse de croissance et l'épaisseur de gras dorsal. La corrélation de rang des index des verrats évalués en systèmes conventionnel et biologique étant seulement de 0,48 pour la croissance et 0,42 pour l'adiposité, les auteurs concluent à l'intérêt d'une évaluation génétique spécifique pour l'élevage biologique.

Ces résultats ne sont toutefois pas complètement généralisables. Les sélectionneurs réalisent, en complément des contrôles de performances en élevage de sélection, des mesures en conditions d'élevage plus proches de la production. Même si des interactions $G \times E$ sont mises en évidence, elles relèvent souvent d'effets d'échelle et les génotypes standards gardent globalement une supériorité de performances par rapport aux races locales quel que soit le système d'élevage, y compris pour l'élevage biologique chez le porc (Brandt *et al* 2010).

3 / Sélectionner et valoriser la diversité des reproducteurs via différentes stratégies d'utilisation et d'accouplement adaptées à l'élevage en systèmes agro-écologiques

L'existence d'interactions pose la question du choix optimal du génotype suivant le milieu d'élevage. S'il peut exister des interactions $G \times E$ importantes à considérer dans l'évaluation et le classement des reproducteurs, ce sont généralement des effets d'échelle (encadré) qui sont observés entre environnements, ce qui signifie que, le plus souvent, les mêmes reproducteurs seront sélectionnés quelles que soient les conditions environnementales dans lesquelles sont mesurés les critères de sélection. Inclure les interactions $G \times E$ dans l'évaluation génétique et la sélection des animaux implique que l'on soit en mesure de mieux évaluer l'environnement cible. Toutefois, cet environnement peut être très difficile à caractériser. D'une part, définir un environnement cible implique d'évaluer de nombreux facteurs de variation (ressources alimentaires et en eau, conditions climatiques, qualité des sols, bâtiments, pression sanitaire, interactions sociales entre animaux...) et, en général, très peu de ces éléments sont connus. D'autre part, pour chacune des composantes de cet environnement, il peut y avoir de nombreuses situations très différenciées à évaluer, comme par exemple les diverses combinaisons « troupeau-année-saison » dans lesquelles les performances sont recueillies en élevage commercial.

L'utilisation et la gestion de la diversité sont des principes très importants en AE. Ces principes s'appliquent à toutes les échelles physiques (territoires, exploitations, ateliers de productions animales et végétales) et à tous les niveaux d'organisation du vivant (espèces, races/lignées intra-espèces et individus intra-population). L'amélioration génétique au travers du développement d'une large gamme de programmes de sélection

est une des voies importantes pour gérer et valoriser une des « formes » essentielles de la diversité : la diversité génétique des populations et des individus.

3.1 / Choix des races ou lignées en sélection et en production

Le choix des génotypes parentaux (races ou lignées) et de la stratégie d'utilisation des reproducteurs en race pure ou en croisement est une étape décisive pour développer un programme d'amélioration génétique performant. L'efficacité de la stratégie dépend du niveau de complémentarité entre races et des effets d'hétérosis attendus pour les caractères d'intérêt majeur. Une bonne caractérisation phénotypique des ressources génétiques disponibles constitue donc un préalable. Le choix dépend aussi fortement de la capacité à maintenir à long-terme un niveau amélioré soit dans la population croisée, soit dans les populations pures initiales pour les futurs besoins en croisement. Même quand un schéma en croisement est choisi, un programme de sélection en race pure des populations parentales doit être conduit en parallèle, sauf si le but recherché est la création d'une nouvelle race ou lignée composite. Les filières de ruminants et de monogastriques ont des stratégies d'utilisation des reproducteurs très différentes en termes d'exploitation de la variabilité entre races. Dans les filières de monogastriques, la production s'effectue quasi-exclusivement en croisement terminal à partir de lignées parentales elles-mêmes issues d'un ou plusieurs niveaux de croisement. En revanche, une large majorité de la production de lait et viande de ruminants en France s'effectue en race pure. Les programmes d'amélioration génétique sont donc conçus pour une valorisation en croisements en filières de monogastriques, alors qu'ils sont essentiellement conçus pour une valorisation en race pure chez les ruminants.

Peu d'études permettent de comparer réellement les races ou lignées conduites en systèmes de production agro-écologiques, et plus particulièrement les races locales. Cependant, les principes agro-écologiques promeuvent la valorisation des ressources locales et l'utilisation de races adaptées aux conditions locales, ce qui favorise généralement les races déjà présentes sur un territoire. Pour résoudre l'antagonisme entre performances de production et d'adaptation des animaux à des milieux moins maîtrisés, il est souvent mentionné que les races locales pourraient mieux convenir dans les systèmes agro-écologiques car elles nécessitent moins de ressources que les races intensivement sélectionnées pour produire. Toutefois,

les niveaux de production de ces races locales sont souvent inférieurs à ceux des races ou lignées nationales et internationales, ce qui les cantonne à des marchés de niche à haute valeur ajoutée pour assurer la rentabilité économique de leur élevage. Les effectifs sont alors trop faibles pour pouvoir mettre en œuvre un programme d'amélioration génétique. Quelques exemples comme ceux des races ovines laitières Lacaune et Manech montrent pourtant qu'un programme de sélection peut être efficace en race locale (Barillet *et al* 2016) quand un produit a un marché de taille suffisante et une forte valeur ajoutée comme les fromages de Roquefort et Ossau-Iraty. En filière avicole, la forte dégradation des performances de production, reproduction et survie des souches à croissance rapide quand elles sont élevées sur parcours ou avec des régimes sous-optimaux a amené en Norvège à recommander des souches à croissance plus lente comme celles utilisées en production Label Rouge ou des croisements entre lignées commerciales et races locales pour la production en élevage biologique (Brunberg *et al* 2014).

Avec le changement global, l'intérêt pour certaines capacités adaptatives des races locales va vraisemblablement augmenter (FAO 2015). Comme souligné par Marshall (2014), il serait nécessaire que ces ressources génétiques et leur caractérisation phénotypique dans leurs conditions d'élevage actuelles soient connues et disponibles pour tous, ce qui est rarement le cas. En effet, aucune base de données générale n'est actuellement opérationnelle pour rassembler les principales performances zootechniques des animaux (en termes de production, reproduction, longévité) bien que la FAO et certains pays essaient depuis de nombreuses années de mettre en place une telle base. Une alternative à l'utilisation de races déjà adaptées est l'introggression de nouveaux variants génétiques dans une race pour lui permettre de mieux s'adapter à l'environnement ciblé. Classiquement, l'introggression d'allèles d'une population donneuse à une population receveuse est réalisée par des programmes coûteux de backcross (croisements retour vers la population receveuse) répétés et combinée avec une sélection pour préserver les caractéristiques favorables de la population receveuse. Actuellement, les outils génomiques peuvent permettre d'accélérer ce processus (Tixier-Boichard *et al* 2015). Par exemple, l'introduction de gènes de résistance à la chaleur (Phocas *et al* 2016b) dans les races internationales ou les races locales des milieux tempérés pourrait permettre de maintenir les performances de production et reproduction quand les animaux sont exposés à des températures fréquem-

ment supérieures à 20-25°C. Les nouvelles technologies d'édition ciblée du génome offrent la perspective de modifications plus rapides et moins coûteuses, dont l'impact sur la variabilité génétique intra-race et les questionnements d'ordre éthique et réglementaire doivent être étudiés (Ducos *et al* 2017).

3.2 / Gestion de la diversité génétique intra-race ou lignée pure

Dans toutes les filières, trois approches peuvent être envisagées pour développer des stratégies de sélection et d'utilisation des reproducteurs adaptées aux enjeux agro-écologiques.

La *première stratégie* est simplement d'utiliser des animaux issus des programmes de sélection existants. Dans toutes les filières, cette option se révèle pertinente pour une grande majorité des éleveurs interrogés dans l'enquête réalisée en 2015 en France dans les filières ruminants, porc et volailles (Phocas *et al* 2015) qui considèrent que l'offre génétique actuelle permet une orientation agro-écologique. Toutefois, sans remettre en cause dans leurs fondements les programmes de sélection actuels, les éleveurs se sont aussi majoritairement prononcés pour des objectifs plus portés sur les caractères fonctionnels.

La *deuxième stratégie* consiste à choisir, parmi les candidats des programmes de sélection actuels, des reproducteurs différents pour les besoins spécifiques de certains éleveurs. En effet, si la gamme actuelle des caractères considérés dans les objectifs de sélection concerne des caractères importants pour tout éleveur quel que soit son système de production, il peut être intéressant de classer les reproducteurs sur des index de synthèse pondérant différemment les valeurs génétiques prédites de chaque caractère afin de répondre aux attentes spécifiques de certains éleveurs pour leur système de production. Dans ce cas, des index synthétiques de sélection adaptés aux objectifs individuels des éleveurs doivent leur permettre d'identifier les reproducteurs répondant à leurs besoins spécifiques. Une telle stratégie peut être développée par l'entremise de questionnaires web ainsi que proposés par Ahlman *et al* (2014) pour les bovins laitiers ou Wallenbeck *et al* (2015) pour les porcs.

La *troisième stratégie* repose sur le développement de programmes de sélection spécifiques pour des systèmes agro-écologiques. Trois verrous limitent la mise en œuvre de cette dernière option : *i*) la taille de la population disponible et la possibilité d'appui technique auprès des éleveurs peuvent être insuffisantes pour permettre une sélection technique efficace ; *ii*) le marché peut égale-

ment être trop limité pour amortir le coût d'un programme de sélection supplémentaire ; enfin, *iii*) développer un programme spécifique suppose d'être à même de définir le type d'animal recherché, alors qu'il n'existe pas un mais plusieurs types d'animaux adaptés aux systèmes agro-écologiques. Si un tel programme s'avérait toutefois pertinent, une politique d'aides publiques serait nécessaire.

a) Quelles stratégies de sélection développer pour les ruminants ?

La mise en œuvre d'un dispositif de sélection efficace est particulièrement coûteuse en filières de ruminants, étant donné les prolificités faibles et les intervalles de génération élevés. Globalement les trois-quarts des éleveurs interrogés (Phocas *et al* 2015) considèrent que l'offre génétique actuelle répond à leurs besoins pour conduire leur système de production agro-écologique, même si des améliorations (critères, types d'évaluations génétiques...) sont souhaitées. Dans ce contexte, il paraît plus pertinent de réorienter un programme de sélection plutôt que de proposer la création de nouveaux programmes. Ajoutons qu'une telle stratégie serait particulièrement contre-productive vis-à-vis des races locales et races à petits effectifs, en favorisant un peu plus les races dominantes qui seraient les seules à pouvoir s'engager dans la voie d'un nouveau programme (et sous réserve d'une mobilisation suffisante d'éleveurs partageant une vision commune).

Les éleveurs interrogés n'envisagent majoritairement pas de changer de races, se déclarant généralement satisfaits, voire attachés à la ou les races qu'ils ont choisi d'élever (Phocas *et al* 2015). En ovin allaitant en particulier, le choix des races selon le système fait partie intégrante des stratégies d'élevage et de l'offre génétique actuelle. Si la sélection des petits ruminants s'effectue toujours en race pure, l'utilisation des reproducteurs se fait soit en race pure (cas des ovins et caprins laitiers et de certaines races ovines allaitantes), soit en croisement. Le croisement (à 2 ou 3 voies) est largement pratiqué dans les races ovines allaitantes en France, comme à travers le monde. Il permet d'exploiter le potentiel des races prolifiques comme lignées maternelles et des races avec une bonne croissance et valeur de la carcasse comme lignées paternelles (Bittante *et al* 1996). Cette pratique permet d'accroître la productivité numérique du troupeau en agneaux sevrés qui est le facteur économique clé pour la production de viande ovine.

En revanche, en France, très peu d'éleveurs de bovins réalisent des croisements entre plusieurs races pour la constitution

de leur troupeau de vaches. En effet, le taux de vaches croisées conservées pour la reproduction est faible (< 10% en 2010), tant en races allaitantes que laitières. Toutefois la pratique du croisement est en augmentation en races bovines laitières. Bougoïn et Le Mézec (2010) chiffreraient l'augmentation de la part de femelles croisées à 33% entre 2005 et 2010. Pour partie, les croisements réalisés correspondent à des stratégies de changement de race par absorption ; pour une autre partie, ils répondent à des objectifs de rétablissement de certaines aptitudes (reproduction, valeur bouchère) au sein du troupeau. Pour des raisons historiques et d'association d'une race à une région particulière, les éleveurs de bovins choisissent en grande majorité d'élever des animaux de race pure. De plus, l'élevage des femelles en race pure facilite la gestion de la reproduction dans les troupeaux qui restent de taille faible (40 à 50 vaches en moyenne). Au contraire, dans tous les autres grands pays d'élevage allaitant (Australie, Brésil, Amérique du Nord), l'utilisation du croisement est fréquente, que ce croisement soit terminal ou pour la création de lignées maternelles (Golden *et al* 2009). Les races taurines continentales (Blonde d'Aquitaine, Charolaise, Limousine, Piémontaise...) sont fréquemment utilisées en croisement terminal sur des lignées maternelles de race pure (Angus, Hereford, zébus) ou croisées pour améliorer la croissance et la conformation des produits.

En pratique, les évaluations génétiques et génomiques des ruminants en France se font principalement sur les performances collectées dans les élevages adhérents au contrôle de performances (lait ou viande) sur les aptitudes fonctionnelles (fertilité, facilité de vêlage, prolificité, longévité, santé de la mamelle, aplombs) et de production (lactation, croissance et morphologie pré ou post sevrage), ou à partir de données d'abattoirs (viande bovine). En complément, une sélection sur les performances propres de croissance et de morphologie post-sevrage ainsi que sur la fonction sexuelle est effectuée en stations de contrôle individuel pour les mâles. Les évaluations génétiques en ferme fournissent ainsi des données objectives pour choisir les reproducteurs nécessaires au renouvellement non seulement intra-troupeau, mais aussi entre troupeaux. Le nombre et la diversité des milieux rencontrés entre élevages permettent d'identifier des reproducteurs adaptés à la gamme de conditions d'élevage rencontrées en France. Ceci est particulièrement vrai pour les petits ruminants : par exemple, un bouc améliorateur de race Saanen a des filles mesurées aussi bien dans des systèmes en bâtiment avec une alimentation basée sur une

forte proportion de concentrés que dans des systèmes très extensifs sur parcours dans le Sud Est de la France.

Le tableau 1, établi à dire d'experts par les auteurs de cette synthèse, décrit l'adéquation des programmes de sélection actuels aux principes de l'AE décrits par Dumont *et al* (2013). Au cours des deux dernières décennies, de nombreux nouveaux critères de sélection ont été intégrés dans les programmes de sélection. Il en résulte un rééquilibrage des objectifs de sélection en faveur des aptitudes d'adaptation aux conditions d'élevage variées. Le développement d'une génétique adaptée aux enjeux de l'AE est donc en marche. Toutefois, il est important d'encourager ces évolutions, en particulier par l'acquisition de références sur des aptitudes nouvelles. Les problématiques d'avenir requièrent des investissements techniques massifs (mesure de l'efficacité alimentaire avec une alimentation à base de fourrages grossiers, résistance aux agents pathogènes...) et intéressent l'ensemble des éleveurs et des systèmes. La mise en œuvre de critères de sélection sur la résistance aux parasites dans de nombreux pays et pour diverses races de petits ruminants au pâturage en est une illustration concrète (Hunt *et al* 2013).

En définitive, afin de permettre une meilleure valorisation de la diversité génétique parmi les reproducteurs mis sur le marché, nous recommandons de mieux accompagner les éleveurs dans l'utilisation des index, l'établissement de stratégies génétiques fines adaptées à leurs élevages (état génétique du troupeau ; potentialités et contraintes du milieu et du système), ce qui peut comprendre la proposition d'index de synthèse personnalisés pour répondre aux objectifs propres de chaque éleveur. Cet accompagnement des éleveurs concerne également les systèmes en croisement. Pour cela, il est nécessaire d'enrichir les références disponibles et en particulier d'aller vers des évaluations génétiques et génomiques multiraciales incluant des animaux croisés. Cela permettrait à la fois une optimisation fine du trinôme « objectif d'éleveur » - « système et potentialité du milieu » - « animal », et une diversité génétique accrue inter-élevages du fait de la diversité des systèmes agro-écologiques. Il s'agit aussi d'intégrer les interactions GxE significatives dans les évaluations génétiques en accompagnant le développement de connexions entre systèmes d'information génétique et bases de données de description des systèmes (systèmes alimentaires et fourragers en particulier) et des conditions pédo-climatiques. Enfin, au-delà de soutenir une valorisation de la diversité intra-race, il faut garantir un maintien d'une diversité inter-races, com-

posante essentielle pour l'adaptation à une diversité de milieux et de contextes de production. Il faut permettre au plus grand nombre de races, quelle que soit leur taille, de bénéficier des avancées techniques et notamment des nouvelles évaluations génétiques. Cela peut nécessiter un soutien spécifique aux races locales, mais il faut probablement aussi encourager ou favoriser les mutualisations scientifiques et techniques avec les grandes races.

b) Quelles stratégies de sélection pour les porcs et les volailles ?

Un petit nombre d'entreprises multinationales conduisent l'essentiel de la sélection porcine et avicole. Ces entreprises recommandent des conditions précises d'élevage pour que leurs lignées expriment complètement leur potentiel de production quel que soit le pays considéré. Toutefois, même dans le cas des volailles où le milieu de production est considéré comme particulièrement standardisé, il peut exister des différences liées aux matières premières incorporées dans la ration, aux types de bâtiment ou aux pratiques d'élevage. Ces différences ne sont pas toujours bien caractérisées, mais elles affectent les performances. Les entreprises de sélection mettent donc parfois en place des programmes intégrant des performances en provenance « d'élevages associés » répartis dans plusieurs endroits du globe pour évaluer l'adaptation des animaux à des conditions locales variées. Cette stratégie semble efficace pour la résistance à la chaleur tant en filière porcine qu'avicole. En filière porcine, l'utilisation de données issues de porcs croisés, collectées dans différents environnements de production, pour les évaluations génétiques permet aussi de mieux prendre en compte les interactions GxE et d'intégrer des caractères de santé et de rusticité des animaux.

À côté de ce système dominant, il existe encore dans certains pays (dont la France) quelques structures coopératives de sélection porcine ou avicole. Elles sont parfois en concurrence avec les grandes firmes multinationales mais, se concentrent le plus souvent sur la sélection ou la gestion de génotypes très particuliers comme les races locales de porcs et volailles ou celles utilisées pour les systèmes Label Rouge ou biologique en France. Ces structures nationales ont comme vocation principale de répondre à la demande des groupements de producteurs nationaux. Toutefois, elles ont montré ces dernières années un développement significatif de leur activité à l'international. En France, le marché de la sélection porcine reste majoritairement porté par de telles structures nationales issues du monde coopératif.

Tableau 1. Comment la sélection des ruminants s'inscrit-elle dans les principes de l'agro-écologie ?

Principes agro-écologiques	Intégration dans les objectifs de sélection ⁽¹⁾
<p>Principe 1 – Gestion intégrée de la santé animale (y compris le bien-être)</p> <ul style="list-style-type: none"> - prise en compte surtout au travers des caractères fonctionnels (longévité, reproduction, aplombs, mortalité/vigueur du jeune, morphologie et/ou santé de la mamelle (leucocytes dans le lait et sensibilité aux mammites cliniques), anomalies...) essentiellement en bovins, mais en cours de développement en ovins - en dehors de la résistance aux mammites, difficile à considérer pour le moment en raison de difficultés méthodologiques et de mise en œuvre (accès aux phénotypes, objectifs de sélection...) - peu de prise en compte de l'incidence de la sélection sur le bien-être animal 	***
<p>Principe 2 – Réduction de l'utilisation des intrants</p> <ul style="list-style-type: none"> - prise en compte indirecte au travers de la sélection en ferme des animaux, les éleveurs cherchant des animaux « économiques » c'est-à-dire produisant bien avec peu d'intrants (en particulier en ovins avec l'alimentation en lot) et via la sélection sur la croissance musculaire pour les bovins et ovins allaitants - peu de prise en compte directe car l'efficacité alimentaire n'est pas (en races laitières) ou peu sélectionnée directement (choix de reproducteurs mâles dans certaines races allaitantes) - pas de prise en compte directe de la capacité de mobilisation des réserves corporelles et de la valorisation des fourrages grossiers 	***
<p>Principe 3 – Réduction de la pollution et amélioration de l'efficacité métabolique des systèmes</p> <ul style="list-style-type: none"> - critère non considéré dans les programmes de sélection actuel, et envisagé plutôt comme un corollaire favorable découlant de la mise en œuvre du principe 2. - pas d'évaluation à l'échelle des systèmes (manque de méthodes) dans leur diversité 	**
<p>Principe 4 – Amélioration de la diversité pour améliorer la résilience des systèmes</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'amélioration progressive au cours du temps de chaque race par une sélection multicaractère est vue comme le moteur essentiel de l'adaptation des ruminants à leurs milieux d'élevage - le changement de race et l'utilisation du croisement (sauf en ovins allaitants) ne sont pas perçus comme des moyens d'améliorer la résilience des systèmes d'élevage et d'en faciliter une gestion plus agro-écologique. L'utilisation du croisement est en revanche importante pour accroître la résilience des systèmes d'élevage des ovins allaitants. - la variabilité entre animaux est gérée par les éleveurs pour l'exploiter au mieux, mais n'est généralement pas perçue comme un moyen d'améliorer la résilience des systèmes. En petits ruminants, cette gestion n'est pas individuelle mais effectuée par lot d'animaux. 	*
<p>Principe 5 – Préservation de la diversité biologique</p> <ul style="list-style-type: none"> - la variabilité génétique est généralement perçue comme un enjeu important mais à gérer collectivement à l'échelle des populations ; le choix des reproducteurs mâles s'effectue en tenant compte de leur originalité génétique, en particulier en caprins laitiers. - la préservation de la diversité des races locales et des systèmes de production associés est jugée importante ; en particulier la grande diversité des races ovines allaitantes permet une utilisation de races bien adaptées à leur environnement. 	***

⁽¹⁾ Le principe est fortement (***), moyennement (**) ou faiblement (*) pris en compte dans les objectifs des programmes de sélection actuels d'après les avis des experts (auteurs).

L'une des conséquences de la standardisation de la production est que la sélection n'est réalisée de manière efficace que dans un nombre limité de races. Cela est particulièrement vrai en volailles où les génotypes commercialisés sont massivement issus de divers croisements entre quelques dizaines de lignées pures. Ainsi, six races de poules sont à l'origine des principaux croisements commerciaux : les races White Leghorn, Rhode Island Red, Rhode Island White et New Hampshire pour la production d'œufs et les races Cornish, White Plymouth Rock et New Hampshire pour le poulet de chair. Dans l'espèce

porcine, trois races sont principalement utilisées en France pour les lignées paternelles (Piétrain, Large-White mâle et Duroc) et deux races pour les lignées maternelles (Large White et Landrace) ainsi que des variétés « synthétiques » issues de croisements avec des races chinoises. Dans la filière porcine française, malgré l'augmentation régulière du nombre de truies en élevage biologique (+ 2% par an, source Agence BIO/OC), les éleveurs sont conscients que la taille du marché est actuellement insuffisante (0,4% de la production nationale, source IFIP) pour prendre en charge les coûts de développement de génotypes

spécifiquement adaptés à leurs systèmes (Phocas *et al* 2015). Ils considèrent cependant qu'un porc adapté à l'élevage conventionnel est suffisamment plastique pour répondre aux attentes de l'élevage biologique. Un bémol porte sur l'intérêt d'avoir des porcelets suffisamment lourds à la naissance pour une bonne adaptation aux contraintes alimentaires de la production biologique. L'étude de Rydhmer *et al* (2014) contredit ces avis et souligne qu'aucune des populations porcines sélectionnées n'est aujourd'hui totalement adaptée à l'élevage biologique. Toutefois, travailler la génétique porcine dans ce but semble

faisable, y compris en incluant la gestion d'une race locale.

En France, quelques filières locales, largement minoritaires en termes de production nationale bien que significatives sur certains territoires, s'appuient sur l'élevage d'animaux de races locales en lien avec des systèmes de production spécifiques généralement associés à des produits typiques à forte valeur ajoutée. Avec six races locales préservées, la France est le principal « réservoir » de diversité génétique porcine au niveau Européen (Laval *et al* 2000). En porc comme en volaille, le bas niveau de production cantonne les races locales à des marchés de niche sur des produits haut de gamme. Contrairement à la production conventionnelle, ces élevages sont conduits en race pure afin d'assurer à la fois la production et la préservation de la race. Dans cette logique, les structures gérant ces races locales n'envisagent pas de sortir de ces marchés de niche. Elles ne souhaitent donc ni diffuser ni croiser les races locales avec des génotypes plus productifs qui leur feraient perdre la différenciation de leurs produits.

Les tableaux 2 et 3, établis à dire d'experts par les auteurs de cette synthèse, décrivent l'adéquation des pro-

grammes de sélection porcine et avicole actuels aux principes de l'AE décrits par Dumont *et al* (2013). Bien qu'il y ait des limites techniques et économiques fortes au développement de programmes de sélection spécifiques de productions porcines et avicoles biologiques ou Label Rouge, il est possible de développer des stratégies permettant de valoriser les ressources génétiques disponibles pour proposer des animaux bien adaptés à des systèmes non conventionnels.

Une stratégie consiste simplement à proposer des croisements innovants en revisitant les lignées pures disponibles et leurs combinaisons possibles à trois ou quatre voies pour obtenir des produits terminaux qui correspondent au système de production ciblé. Même si les schémas de sélection en croisement offrent une grande flexibilité structurelle pour adapter les caractéristiques du produit terminal, cela nécessite cependant de maintenir un nombre suffisant de lignées en sélection en faisant continuellement évoluer leurs critères de sélection, notamment sur la robustesse, le bien-être et les maladies métaboliques.

Toutefois, à l'heure actuelle, la piste la plus intéressante pour l'élevage porcin

semble être la voie du choix « piloté » des reproducteurs parmi les candidats à la sélection issus des programmes conventionnels, à l'image de ce qui se fait en ruminants. À cette fin, il faudra disposer d'informations permettant de mieux caractériser les animaux en particulier sur des critères fonctionnels.

Par ailleurs, il existe certaines lignées déjà bien adaptées à des systèmes agro-écologiques. C'est le cas en particulier des lignées de poulets de chair à croissance lente de type « Label Rouge ». Ces souches sont moins exigeantes que les souches à croissance rapide et sont donc plus adaptées à des systèmes extensifs et des environnements moins contrôlés. La grande variété de souches disponibles en France pour les productions alternatives de type Label Rouge est un réel atout pour le positionnement français dans le développement de systèmes agro-écologiques (Fanatico *et al* 2007, Brunberg *et al* 2014).

Une dernière approche, parfois déjà mise en œuvre par les entreprises multinationales, pourrait être développée pour proposer une sélection différente pour chacun des environnements cibles. La stratégie consiste à sélectionner les lignées pures dans des milieux d'élevage

Tableau 2. Comment la sélection porcine française s'inscrit-elle dans les principes de l'agro-écologie ?

Principes agro-écologiques	Intégration dans les objectifs de sélection ⁽¹⁾
<p>Principe 1 – Gestion intégrée de la santé animale (y compris le bien-être)</p> <ul style="list-style-type: none"> - prise en compte surtout au travers des caractères fonctionnels (aplombs, anomalies...) - difficile à considérer pour le moment en raison de difficultés méthodologiques et de mise en œuvre (choix des phénotypes, objectifs de sélection...) - peu de prise en compte de l'incidence de la sélection sur le bien-être animal 	***
<p>Principe 2 – Réduction de l'utilisation des intrants</p> <ul style="list-style-type: none"> - critère largement pris en compte au travers de l'efficacité alimentaire - sélection basée uniquement sur des aliments hautement digestibles et équilibrés - pas de prise en compte de la réponse à des aliments moins digestibles voire carencés en certains nutriments 	***
<p>Principe 3 – Réduction de la pollution et amélioration de l'efficacité métabolique des systèmes</p> <ul style="list-style-type: none"> - critère pris en compte au travers de l'efficacité alimentaire de l'animal - pas d'évaluation à l'échelle des systèmes (manque de méthodes) dans leur diversité 	***
<p>Principe 4 – Amélioration de la diversité pour améliorer la résilience des systèmes</p> <ul style="list-style-type: none"> - utilisation de plusieurs races en croisement pour adapter les animaux en fonction du stade (reproduction, engraissement) et favoriser les effets d'hétérosis - choix des schémas de croisement en fonction des objectifs de production - la variabilité entre animaux est par contre peu valorisée et plutôt perçue comme un problème 	*
<p>Principe 5 –Préservation de la diversité biologique</p> <ul style="list-style-type: none"> - considération pas ou peu prise en compte dans les systèmes conventionnels - préservation de la diversité des races locales et des systèmes de production associées 	*

⁽¹⁾ Le principe est fortement (***), moyennement (***) ou faiblement (*) pris en compte dans les objectifs des programmes de sélection actuels d'après les avis des experts (auteurs).

Tableau 3. Comment la sélection avicole s'inscrit-elle dans les principes de l'agro-écologie ?

Principes agro-écologiques	Intégration dans les objectifs de sélection ⁽¹⁾
<p>Principe 1 – Gestion intégrée de la santé animale (y compris le bien-être)</p> <ul style="list-style-type: none"> - prise en compte surtout au travers des caractères fonctionnels (aplombs, anomalies...) - difficile à considérer pour le moment en raison de difficultés méthodologiques et de mise en œuvre (choix des phénotypes, objectifs de sélection...) - peu de prise en compte de l'incidence de la sélection sur le bien-être animal 	***
<p>Principe 2 – Réduction de l'utilisation des intrants</p> <ul style="list-style-type: none"> - critère largement pris en compte au travers de l'efficacité alimentaire - sélection basée principalement sur des aliments hautement digestibles et équilibrés, avec des variations de régimes selon les continents - prise en compte croissante de la réponse à des aliments moins digestibles, d'origine locale ou non concurrentiels vis-à-vis de l'alimentation humaine 	***
<p>Principe 3 – Réduction de la pollution et amélioration de l'efficacité métabolique des systèmes</p> <ul style="list-style-type: none"> - critère pris en compte au travers de l'efficacité alimentaire de l'animal - pas d'évaluation à l'échelle des systèmes (manque de méthodes) dans leur diversité 	***
<p>Principe 4 – Amélioration de la diversité pour améliorer la résilience des systèmes</p> <ul style="list-style-type: none"> - utilisation quasi-systématique du croisement pour adapter les animaux en fonction de l'objectif de production (production d'œufs, de viande, de filet) et de l'environnement (claustration, parcours, ...), favoriser les effets d'hétérosis et limiter les effets des corrélations génétiques défavorables - choix des schémas de croisement en fonction des objectifs de production - la variabilité entre animaux n'est pas valorisée et perçue comme un problème, l'hétérogénéité des lots est pénalisée 	*
<p>Principe 5 –Préservation de la diversité biologique</p> <ul style="list-style-type: none"> - incluse majoritairement au travers d'une gestion rigoureuse de la consanguinité dans les populations en sélection et le maintien chez les sélectionneurs de lignées pures non utilisées actuellement en production - en moindre mesure, préservation de la diversité des races locales et des systèmes de production associés pour des marchés de niche, mais risque de consanguinité dû à la très faible taille de ces populations 	**

⁽¹⁾ Le principe est fortement (***), moyennement (**) ou faiblement (*) pris en compte dans les objectifs des programmes de sélection actuels d'après les avis des experts (auteurs).

standardisés (similaires pour chacune des lignées grand-parentales) et maîtrisés (température, aliment, conditions sanitaires), puis à placer les troupeaux parentaux dans les différents environnements de production réels. Par exemple, l'élevage des populations parentales des animaux commerciaux directement dans les pays à climat chaud permet d'améliorer l'adaptation à la chaleur en sélectionnant les animaux les plus performants dans l'environnement de production (Ansah 2000).

3.3 / Gestion de la diversité génétique intra-troupeau

Valoriser la diversité génétique intra-élevage est une approche proposée par les écologues pour accroître la résilience des systèmes de production soumis à des aléas de nature climatique ou économique (Altieri *et al* 2015). Il s'agit de gérer au sein d'un même système une diversité d'espèces ou, intra-espèce, des

profils génétiques variés. Si cette approche est appliquée en productions végétales depuis quelques années, elle n'en est qu'à un stade préliminaire en productions animales. L'illustration type des bénéfices espérés concerne la gestion de la santé animale à l'échelle de l'exploitation. L'évolution des agents pathogènes et de leurs effets sur la santé des animaux peut en effet être limitée par la diversité des hôtes qui empêche le développement d'un agent hautement spécifique et infectieux (Springbett *et al* 2003). Par exemple, le pâturage mixte de diverses espèces herbivores peut réduire la charge parasitaire des pâtures par effet de dilution en agents pathogènes spécifiques à chacune (Alexandre *et al* 2010). La complémentarité de la sélection alimentaire entre espèces est également intéressante pour mieux exploiter les ressources pâturées (d'Alexis *et al* 2014). En outre, on peut faire l'hypothèse que la variabilité individuelle des performances des animaux est un facteur clé

de résilience de la réponse du troupeau aux fluctuations du milieu. Des modélisations intégrant une diversité de profils de performances des femelles au sein d'un troupeau étayent l'hypothèse que la variabilité individuelle de ces performances peut contribuer au maintien du niveau de production de troupeaux de ruminants (Tichit *et al* 2011, Blanc *et al* 2013).

Cependant, cette stratégie de valorisation de l'hétérogénéité (espèces, races, profils génétiques ou physiologiques) des animaux n'emporte jusqu'ici pas l'adhésion de la grande majorité des éleveurs interrogés (Phocas *et al* 2015). Ils y voient un frein à une conduite aisée du troupeau. À l'inverse, les éleveurs souhaitent donc plutôt limiter la diversité des animaux de leur élevage. En effet, la diversité génétique intra-élevage n'est pas favorisée par les marchés qui recherchent des lots d'animaux homogènes à l'achat, que ce soit pour l'engraissement ou pour

l'abattage. En revanche, le maintien d'une diversité forte entre élevages fait consensus pour favoriser le maintien d'une diversité génétique à long terme au sein des races. Comme cela est promu depuis longtemps en productions végétales (Altieri *et al* 2015), il faut aussi recommander qu'une diversité génétique animale suffisante soit préservée ou instaurée localement en maintenant des espèces et races variées afin de limiter les risques de dissémination des agents pathogènes.

Conclusion

L'agro-écologie s'inscrit dans le cadre conceptuel du développement durable qui vise à conjuguer les performances économique, environnementale et sociale de l'agriculture. Il s'agit de prendre simultanément en compte la rentabilité économique des exploitations, les attentes sociales des éleveurs (travail, revenus et reconnaissance), les besoins du marché et les attentes de la société vis-à-vis de l'environnement et du bien-être animal. Les systèmes agro-écologiques peuvent être économiquement intéressants soit parce qu'ils correspondent à une demande sociétale importante qui confère une forte valeur ajoutée à leurs produits, soit parce que des ressources locales sont disponibles en abondance et permettent de limiter significativement le recours aux intrants de synthèse et aux achats d'aliments.

Pour promouvoir la transition vers des systèmes agro-écologiques, les stratégies d'amélioration génétique développées doivent préserver une diversité génétique suffisante intra- et entre populations, et encourager l'utilisation de races dont les performances sont bien adaptées à une production locale et durable. Ainsi, il ne s'agit pas de rechercher un animal type pour les systèmes agro-écologiques, mais des animaux aux profils variés, adaptés à la diversité des milieux et des conduites d'élevage. Les programmes

de sélection doivent donc évoluer dans toutes les filières afin qu'un nombre plus important de génotypes soient disponibles pour répondre à une gamme de besoins accrue par la transition agro-écologique. Orienter la sélection vers plus de robustesse, santé et efficacité alimentaire des animaux en situation de ressources limitantes (en quantité et en qualité) est nécessaire pour toutes les filières animales. Au-delà de la difficulté de mise en œuvre de nouveaux critères de sélection répondant à ces objectifs, les limites des dispositifs génétiques actuels au regard des enjeux de l'agro-écologie sont : le faible niveau de production des races locales, le peu de comparaisons de races et croisements objectivées en systèmes non conventionnels et l'absence d'intégration par les éleveurs de la diversité génétique des animaux intra-élevage comme une dimension favorable à la résilience de leur système de production. Il s'agit donc de mieux caractériser les races/lignées locales sur une large gamme de caractères (production, reproduction, santé, qualité des produits) pour évaluer la robustesse de ces animaux et les comparer aux races/lignées internationales dans des systèmes de production à faibles intrants. Il faut également développer des évaluations génétiques en croisement avec intégration des interactions entre génotypes et environnements d'élevage. Il faut enfin proposer des stratégies de sélection pour des populations en mélanges de diverses races/lignées ou pour une utilisation en croisement permettant de mieux répondre aux besoins des systèmes à faible niveau d'intrants. Le développement des innovations en génomique et pour le phénotypage à haut débit devrait à terme permettre de repenser les critères de sélection et de les diversifier, tout en raccourcissant les délais entre la définition des objectifs et l'amélioration effective des cheptels. Soutenir les efforts de constitution de populations de référence d'animaux phénotypés et génotypés, y compris en races locales, est donc important pour donner les moyens d'avancer significa-

tivement dans la diversification du choix des reproducteurs.

Faciliter ces évolutions passe par le financement de programmes de R&D sur des critères de sélection intégrant les interactions Génotype-Environnement et concernant la santé et la valorisation de ressources alimentaires peu concurrentes de l'alimentation humaine. Cela nécessite aussi la formation des éleveurs et techniciens à l'utilisation des outils de sélection existants (et à venir) pour savoir choisir, parmi les reproducteurs mis sur le marché, une génétique adaptée à leur objectif et à leur système de production pour une optimisation du trinôme « objectif de l'éleveur » - « système de production et potentialités du milieu » - « animaux ». Le développement d'une telle démarche soutiendrait plus largement l'essor de systèmes agro-écologiques que la mise en place de programmes spécifiques qui auraient du mal à être réellement efficaces. Enfin, soulignons que définir un programme de sélection ou un génotype qui serait dédié aux systèmes agro-écologiques implique de définir à la fois les conditions d'élevage type et l'animal idéal pour ces systèmes. Un tel processus de standardisation nous semble antinomique avec l'essence même de l'AE dont l'objet est de valoriser les complémentarités et les interactions entre les différentes ressources disponibles à tous les niveaux d'organisation.

Remerciements

Les auteurs de ce texte remercient le Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Forêt pour le financement de l'étude (SSP-2014-061) qui a conduit à la réflexion et la synthèse bibliographique concernant la génétique comme levier de développement de l'agro-écologie en productions animales. Un remerciement particulier s'adresse à Daniel Guéméné qui a apporté l'expertise du SYSAAF en sélection avicole.

Références

- Ahlman T., Ljung M., Rydhmer L., Röcklinsberg H., Strandberg E., Wallenbeck A., 2014. Differences in preferences for breeding traits between organic and conventional dairy producers in Sweden. *Livest. Sci.*, 162, 5-14.
- Alexandre G., González-García E., Lallo C.H.O., Ortega-Jimenez E., Pariacote F., Archimède H., Mandonnet N., Mahieu M., 2010. Goat management and systems of production: Global framework and study cases in the Caribbean. *Small Rum. Res.*, 89, 193-206.
- Alhady I.A., Shini S., Al Jassim R.A.M., Gaughan J.B., 2012. Physiological responses of Australian Merino wethers exposed to high heat load. *J. Anim. Sci.*, 90, 212-220.
- Altieri M.A., 2002. Agroecological principles and strategies for sustainable agriculture. In *Agroecological Innovations: Increasing food production with participatory development* (N.T. Uphoff Ed.), Earthscan Publication Ltd, London, U.K., 40-46.
- Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A., Lana M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, 869-890.
- Ansah G.A., 2000. Matching genetic potential for performance with field conditions. The layer industry worldwide. In: *Proc. 21th World Poultry Congr.*, Montreal, Canada, electronic publication.
- Azoulay Y., Druyan S., Yadgary L., Hadad Y., Cahaner A., 2011. The viability and performance under hot conditions of featherless broilers versus fully feathered broilers. *Poult. Sci.*, 90, 19-29.
- Barillet F., Lagriffoul G., Marnet P.G., Larroque H., Rupp R., Portes D., Bocquier F., Astruc J.M., 2016. Objectifs de sélection et stratégie raisonnée de mise en œuvre à l'échelle

- des populations de brebis laitières françaises. In : Anomalies génétiques. Boichard D. (Ed). Dossier, INRA Prod Anim., 29, 19-40.
- Baumont R., Lewis E., Delaby L., Prache S., Horan B., 2014. Sustainable intensification of grass-based ruminant production. 25th Gen. Meet. Europ. Grassland Fed., Aberystwyth, U.K.
- Becker E.W., 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotech. Adv.* 25, 207-210.
- Bell M.J., Wall E., Russell G., Simm G., Scott A.W., 2011. The effect of improving cow productivity, fertility and longevity on the global warming potential of dairy systems. *J Dairy Sci.*, 94, 3662-3678.
- Bell M.J., Potterton S.L., Gaignon J., Saunders N., Wilcox R.H., Hunter M., Goodman J.R., Garnsworthy P.C., 2014. Variation in enteric methane emissions among cows on commercial dairy farms. *Animal*, 8, 1540-1546.
- Berman A., 2011. Invited review: are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates? *J. Dairy Sci.*, 94, 2147-2158.
- Bishop S.C., Woolliams J.A., 2014. Genomics and disease resistance studies in livestock. *Livest. Sci.*, 166, 190-198.
- Bittante G., Gallo L., Carnier P., Cassandro M., Mantovani R., Pastore E., 1996. Effects on fertility and litter traits under accelerated lambing scheme in crossbreeding between Finn sheep and an Alpine sheep breed. *Small Rum. Res.*, 23, 43-50.
- Blanc F., Ollion E., Puillet L., Delaby L., Ingrand S., Tichit M., Friggens N.C., 2013. Évaluation quantitative de la robustesse des animaux et du troupeau : quels principes retenir ? *Renc. Rech. Rum.*, 20, 265-272.
- Boettcher P.J., Fatehi J., Schutz M.M., 2003. Genotype x Environment Interactions in Conventional versus Pasture-Based Dairies in Canada. *J. Dairy Sci.*, 86, 383-389.
- Bougoin M.H., Le Mézec P., 2010. Le croisement entre races laitières en France vu par les bases de données. *Renc. Rech. Rum.*, 17, 464.
- Brandt H., Werner D.N., Baulain U., Brade W., Weissmann F., 2010. Genotype-environment interactions for growth and carcass traits in different pig breeds kept under conventional and organic production systems. *Animal*, 4, 535-544.
- Brunberg E.I., Grova L., Serikstad G.L., 2014. Genetics and welfare in organic poultry production: a discussion on the suitability of available breeds and hybrids. In: *Bioforsk report*. Bioforsk (Ed), 9, 1-28.
- Calus M.P.L., Veerkamp R.F., 2003. Estimation of environmental sensitivity of genetic merit for milk production traits using a random regression model. *J. Dairy Sci.*, 86, 3756-3764.
- d'Alexis S., Sauvant D., Boval M., 2014. Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *J. Agric. Sci.*, 152, 655-666.
- Davies G., Genini S., Bishop S.C., Giuffra E., 2009. An assessment of opportunities to dissect host genetic variation in resistance to infectious diseases in livestock. *Animal*, 3, 415-436.
- de Haas Y., Windig J.J., Calus M.P.L., Dijkstra J., de Haan M., Bannink A., Veerkamp R.F., 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *J. Dairy Sci.*, 94, 6122-6134.
- Delaby L., Faverdin P., Michel G., Disenhaus C., Peyraud J.L., 2009. Effect of different feeding strategies on lactation performance of Holstein and Normande dairy cows. *Animal* 3, 891-905.
- Delaby L., Fiorelli J.L., 2014. Elevages laitiers à bas intrants: Entre traditions et innovations. In : Numéro spécial, Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ? Ingrand S., Baumont R. (Eds). INRA Prod. Anim., 123-134.
- de Verdal H., Mignon-Grasteau S., Bastianelli D., Mème N., Le Bihan-Duval E., Narcy A., 2013a. Reducing the environmental impact of poultry breeding by genetic selection. *J. Anim. Sci.*, 91, 613-622.
- de Verdal H., Narcy A., Bastianelli D., Mème N., Urvois S., Collin A., Le Bihan-Duval E., Mignon-Grasteau S., 2013b. Genetic variability of metabolic characteristics in chickens selected for their ability to digest wheat. *J. Anim. Sci.*, 91, 2605-2615.
- Dockès A.C., Magdelaine P., Daridan D., Guillaumin A., Rémondet M., Selmi A., Gilbert H., Grasteau S., Phocas F., 2011. Attentes en matière d'élevage des acteurs de la sélection animale, des filières de l'agroalimentaire et des associations. In : Numéro spécial, Amélioration génétique. Mulsant P., Bodin L., Coudurier B., Deretz S., Le Roy P., Quillet E., Perez J.M. (Eds). INRA Prod. Anim., 24, 285-296.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ellis S., 2004. Review: The cattle major histocompatibility complex: is it unique? *Veterinary Immunol. Immunopathol.*, 102, 1-8.
- Fanatico A.C., O'Connor-Dennie T., Owens C.M., Emmert J.L., 2007. Performance of alternative meat chickens for organic markets: Impact of genotype, methionine level, and methionine source. *J. Anim. Sci.*, 85, 522-523.
- FAO, 2015. Coping with climate change. The roles of genetic resources for food and agriculture. Rome, Italy.
- Flori L., Gao Y., Laloë D., Lemonnier G., Leplat J.J., Teillaud A., Cossalter A.M., Laffitte J., Pinton P., de Vaureix C., Bouffaud M., Mercat M.J., Lefevre F., Oswald I.P., Bidanel J.P., Rogel-Gaillard C., 2011. Immunity traits in pigs: substantial genetic variation and limited covariation. *PLOS One* 6, e22717. doi: 10.1371/journal.pone.0022717
- Fric D., Spengler Neff A., 2014. Adéquation de l'élevage aux conditions locales. Actes des Journ. Techn. Sélection animale en AB à Châteauroux, 45-53. http://www.itab.asso.fr/downloads/jt-select-animale/actes_compiles_pdf2.pdf
- Fulkerson W.J., Davison T.M., Garcia S.C., Hough G., Goddard M.E., Dobos R., Blockey M., 2008. Holstein-Friesian dairy cows under a predominantly grazing system: Interaction between genotype and environment. *J. Dairy Sci.*, 91, 826-839.
- Gavojdian D., Kusza S., Javor A., 2014. Implications of Genotype by Environment Interactions in Dairy Sheep Welfare. *Anim. Sci. Biotech.*, 47, 289-295.
- Gliessman S.R., 2006. Animals in agroecosystems. In *Agroecology: the ecology of sustainable food systems*, 2nd Edition, 269-285, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Golden B.L., Garrick B.J., Benyshek L.L., 2009. Milestones in beef cattle genetic evaluation. *J. Anim. Sci.*, 87, E3-E10.
- Guillou M., Guyomard H., Huyghe C., Peyraud J.L., 2013. Le projet agro-écologique : Vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement, rapport pour le MAAF, juin 2013. http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Agroecologie_Rapport_double_performance_pour_le_MAAF_note_principale_et_annexes_VF_cle899e18.pdf
- Haas E., Bapst B., 2004. Swiss organic farmer survey: which path for the organic cow in the future?. In *Proceedings of the 2nd SAFO workshop*, Witzenhausen, Germany, 35-41. <http://orgprints.org/00003168/>
- Haile-Mariam M., Carrick M.J., Goddard M.E., 2008. Genotype by environment interaction for fertility, survival, and milk production traits in Australian dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 91, 4840-4853.
- Hermesch S., Li L., Doeschl-Wilson A.B., Gilbert H., 2015. Selection for productivity and robustness traits in pigs. *Anim. Prod. Sci.*, 55, 1437-1447.
- Herrero M., Henderson B., Havlik P., Thornton P.K., Conant R. T., Smith P., Wirsenius S., Hristov A.N., Gerber P., Gill M., Butterbach-Bahl K., Valin H., Garnett T., Stehfest E., 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate change*, PUBLISHED ONLINE: 21 MARCH 2016 | DOI: 10.1038/NCLIMATE2925
- Hunt P.W., Kijas J., Ingham A., 2013. Understanding parasitic infection in sheep to design more efficient animal selection strategies. *Vet. J.*, 197, 143-152.
- Huquet B., Leclerc H., Ducrocq V., 2012. Modelling and estimation of genotype by environment interactions for production traits in French dairy cattle. *Genet. Select. Evol.*, 44, 1-14.
- IFOAM 2014. Organic Animal Husbandry across the world: Towards an action plan for development and strengthening of organic animal husbandry. In: *Proc. IAHA-Preconference and Workshop, IFOAM 18th Organic World Congr.*, Istanbul, Turkey.
- Kadowaki H., Suzuki E., Kojima-Shibata C., Suzuki K., Okamura T., Onodera W., Shibata, Kano H., 2012. Selection for resistance to

- swine mycoplasma pneumonia over 5 generations in Landrace pigs. *Livest. Sci.*, 147, 20-26.
- Kearney J.F., Schutz M.M., Boettcher P.J., Weigel K.A., 2004. Genotype×environment interaction for grazing vs. Confinement. II. Health and Reproduction Traits. *J. Dairy Sci.*, 87, 510-516.
- Lamont S.J., Pinard-van der Laan M.H., Cahaner A., Van Der Poel J.J., Parmentier H.K., 2003. Selection for disease resistance: direct selection on the immune response. In: *Poult. Genet., Breed. Biotechnol.*, Muir W.M., Aggrey S.E. (Eds). CABI, 399-418.
- Laval G., Jannuccelli N., Legault C., Milan D., Groenen M.A.M., Giuffra E., Andersson L., Nissen P.H., Jorgensen C.B., Beeckmann P., Geldermann H., Foulley J.L., Chevalet C., Ollivier L., 2000. Genetic diversity of eleven European pig breeds. *Genet. Select. Evol.*, 32, 187-203.
- Leenhouders J.I., Ten Napel J., Hanenberg E.H.A.T., Merks J.W.M., 2011. Breeding replacement gilts for organic pig herds. *Animal*, 5, 615-621.
- Littlejohn M.D., Henty K.M., Tiplady K., Johnson T., Harland C., Lopdell T., Sherlock R.G., Li W., Lukefahr S.D., Shanks B.C., Garrick D.J., Snell R.G., Spelman R.J., Davis S.R., 2014. Functionally reciprocal mutations of the prolactin signaling pathway define hairy and slick cattle. *Nature Communications*, 5, 5861.
- Makkar H.P.S., Tran G., Heuzé V., Ankers P., 2014. Review: State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 197. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008
- Mark T., 2004. Applied genetic evaluations for production and functional traits in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 87, 2641-2652.
- Marshall K., 2014. Optimizing the use of breed types in developing country livestock production systems: a neglected research area. *J. Anim. Breed. Genet.*, 131, 329-340.
- McLaren A., Brotherstone S., Lambe N.R., Conington J., Mrode R., Bunge L., 2015. The effects of different farm environments on the performance of Texel sheep. *Animal*, 9, 1624-1634.
- Mercks J.W.M., Mathur P.K., Knol E.F., 2012. New phenotypes for new breeding goals in pigs. *Animal*, 6, 535-543.
- Mignon-Grasteau S., 2007. Prise en compte des interactions entre génotype et environnement sans les productions avicoles. *Journ. Rech. Avicole*, 7, 386-393.
- Moreno-Romieux C., Salle G., Jacquet P., Blanchard A., Chylinski C., Cabaret J., François D., Saccareau M., Astruc J.M., Bambou J.C., Mandonnet N., 2015. La résistance génétique au parasitisme chez les petits ruminants : un enjeu de durabilité pour les productions à l'herbe. *Renc. Rech. Rum.*, 22, 11-18.
- Morris C.A., Baker R.L., Hickey S.M., Johnson D.L., Cullen N.G., Wilson J.A., 1993. Evidence of genotype by environment interaction for reproductive and maternal traits in beef cattle. *Anim. Prod.*, 56, 69-83.
- Morris C.A., 2007. A review of genetic resistance to disease in *Bos taurus* cattle. *Vet. J.*, 174, 481-491.
- Mulder H.A., Veerkamp R.F., Ducro B.J., van Arendonk J.A.M., Bijma P., 2006. Optimization of dairy cattle breeding programs for different environments with genotype by environment interaction. *J. Dairy Sci.*, 89, 1740-1752.
- Nauta W.J., Baars T., Groen A.F., Veerkamp R.F., Roep D., 2001. Animal breeding in organic farming. Discussion paper. <http://orgprints.org/4824/1/4824.pdf>
- Nielsen H.M., Amer P.R., Byrne T.J., 2014. Approaches to formulating practical breeding objectives for animal production systems. *Acta Agric. Scand. A*, 64, 22-12.
- Pabiou T., Nilforooshan M., Laloë D., Hjerpe E., Venot E., 2014. Across country genetic parameters in beef cattle for interbreed weaning weight genetic evaluation. In: 10th Proc. WCGALP, Vancouver, BC, Canada.
- Phocas F., Bobe J., Bodin L., Charley B., Dourmad J.Y., Friggens N.C., Hocquette J.F., Le Bail P.Y., Le Bihan-Duval E., Mormède P., Quére P., Schelcher F., 2014a. Des animaux plus robustes : un enjeu majeur pour le développement durable des productions animales nécessitant l'essor du phénotypage fin et à haut débit. In : *Phénotypage des animaux d'élevage*. Phocas F. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 27, 181-194.
- Phocas F., Agabriel J., Dupont-Nivet M., Geurden I., Médale F., Mignon-Grasteau S., Gilbert H., Dourmad J.Y., 2014b. Le phénotypage de l'efficacité alimentaire et de ses composantes, une nécessité pour accroître l'efficacité des productions animales. In : *Phéno-typage des animaux d'élevage*. Phocas F. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 27, 235-248.
- Phocas F., Brochard M., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Ducrot C., Dumont B., Ezanno P., Foucras G., Frappat B., González-García E., Hazard D., Lamothe L., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C., Tixier-Boichard M., 2015. Outils et leviers pour favoriser le développement d'une génétique animale adaptée aux enjeux de l'agro-écologie. Rapport de l'étude n° SSP-2014-061 commanditée par le Ministère de l'Agriculture, l'Alimentation et la Forêt, 120p. <http://agriculture.gouv.fr/outils-et-leviers-pour-favoriser-le-developpement-d'une-genetique-animale-adaptee-aux-enjeux-de-lagro>
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Gonzales-Garcia E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C.R., Tixier-Boichard M., Brochard M., 2016a. Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes. I. Selection goals and criteria. *Animal*, 10, 1749-1759.
- Phocas F., Belloc C., Bidanel J., Delaby L., Dourmad J.Y., Dumont B., Ezanno P., Fortun-Lamothe L., Foucras G., Gonzales-Garcia E., Hazard D., Larzul C., Lubac S., Mignon-Grasteau S., Moreno C.R., Tixier-Boichard M., Brochard M., 2016b. Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes. II. Breeding strategies. *Animal*, 10, 1766-1776.
- Pinard-van der Laan M.H., Lillehoj H.S., Zhu J.J., 2003. Genetic resistance and transmission of avian parasites. In: *Poult. Genet. Breed. Biotechnol.*, Muir W.M., Aggrey S.E. (Eds). Wallingford: CABI, 329-326.
- Pinares-Patiño C.S., Hickey S.M., Young E.A., Dodds K.G., MacLean S., Molano G., Sandoval E., Kjestrup H., Harland R., Hunt C., Pickering N.K., McEwan J.C., 2013. Heritability estimates of methane emissions from sheep. *Animal*, 7, 316-321.
- Rauw W.M., Kanis E., Noordhuizen-Stassen E.N., Grommers F.J., 1998. Undesirable side effects of selection for high production efficiency in farm animals: a review. *Livest. Prod. Sci.*, 56, 15-33.
- Renaudeau D., Mandonnet N., Tixier-Boichard M., Noblet J., Bidanel J.P., 2004. Atténuer les effets de la chaleur sur les performances des porcs : la voie génétique. *INRA Prod. Anim.*, 17, 93-108.
- Rozzi P., Miglior F., Hand K.J., 2007. A Total Merit Selection Index for Ontario Organic Dairy Farmers. *J. Dairy Sci.*, 90, 1584-1593.
- Rupp R., Bergonier D., Dion S., Hygoneng M.C., Aurel M.R., Robert-Granié 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.
- Rydhmer L., Gourdière J.L., De Greef K., Bonneau M., 2014. Evaluation of the sustainability of contrasted pig farming systems: breeding programmes. *Animal*, 8, 2016-2026.
- Santos B.F.S., McHugh N., Byrne T.J., Berry D.P., Amer P.R., 2015. Comparison of breeding objectives across countries with application to sheep indexes in New Zealand and Ireland. *J. Anim. Breed. Genet.*, 132, 144-154.
- Sölkner J., Grausgruber H., Okeyo A.M., Ruckebauer P., Wurzing M., 2008. Breeding objectives and the relative importance of traits in plant and animal breeding: a comparative review. *Euphytica*, 161, 273-282.
- Springbett A.J., MacKenzie K., Wooliams J.A., Bishop S.C., 2003. The contribution of genetic diversity to the spread of infectious diseases in livestock populations. *Genetics*, 165, 1465-1474.
- Strandberg E., Brotherstone S., Wall E., Coffey M.P., 2009. Genotype by environment interaction for first-lactation female fertility traits in UK dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 92, 3437-3446.
- Thomas M., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Tichit M., González-García E., Dourmad J.Y., Dumont B., 2014. Agro-écologie et écologie industrielle : deux alternatives complémentaires pour les systèmes d'élevages de demain. In: *Numéro spécial, Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ?* Ingrand S., Baumont R. (Eds). INRA Prod. Anim., 27, 89-100.
- Thompson-Crispi K.A., Sewalem A., Miglior F., Mallard B.A., 2012. Genetic parameters of adaptive immune response traits in Canadian Holsteins. *J. Dairy Sci.*, 95, 401-409.
- Tichit M., Puillet L., Sabatier R., Teillard F., 2011. Multicriteria performance and sustainability in livestock farming systems: functional diversity matters. *Livest. Sci.*, 139, 161-171.
- Tixier-Boichard M., Verrier E., Rognon X., Zerjal T., 2015. Farm animal genetic and genomic resources from an agroecological

perspective. *Frontiers in Genetics*, 6, article 153. doi: 10.3389/fgene.2015.00153.

Wallenbeck A., Rydhmer L., Lundeheim N., 2009. GxE interactions for growth and carcass leanness: Re-ranking of boars in organic and conventional pig production. *Livest. Sci.*, 123, 154-160.

Wallenbeck A., Rydhmer L., Röcklinsberg H., Ljung M., Strandberg E., Ahlman T., 2015. Preferences for pig breeding goals among orga-

nic and conventional farmers in Sweden. *Organic Agriculture* DOI 10.1007/s13165-015-0125-3

Warner C.M., Meeker D.L., Rothschild M.F., 1986. Genetic control of immune responsiveness: A review of its use as a tool for selection for disease resistance. *J. Anim. Sci.*, 64, 394-406.

Wilkie B., Mallard B., 1999. Selection for high immune response: an alternative approach to

animal health maintenance? *Vet. Immunol. Immunopathol.*, 72, 231-235.

Zerjal T., Gourichon D., Rivet B., Bordas A., 2013. Performance comparison of laying hens segregating for the frizzle gene under thermo-neutral and high ambient temperatures. *Poult. Sci.*, 92, 1474-1485.

Résumé

L'agro-écologie utilise les processus naturels et les ressources locales plutôt que des intrants chimiques pour assurer la production tout en limitant l'impact environnemental de l'agriculture. A cette fin, des innovations en génétique sont nécessaires pour disposer d'animaux productifs et adaptés à des contextes locaux variés. Pour toute filière d'élevage, réorienter les programmes de sélection actuels semble plus utile que développer des programmes spécifiques qui peineront à être efficaces en termes de coûts et de progrès génétiques attendus. Améliorer la robustesse des animaux vise à promouvoir leurs capacités d'adaptation en intégrant de nombreux critères de sélection, en particulier de reproduction, santé, et d'adaptation à des ressources alimentaires peu digestibles et au changement climatique. Cela amène à considérer les interactions génotype-environnement dans la prédiction des valeurs génétiques et à évaluer les performances des animaux dans des systèmes à bas intrants pour sélectionner ceux qui sont adaptés à des conditions limitantes. La standardisation tant des animaux que des conditions d'élevage paraît antinomique avec les principes de l'agro-écologie prônant une adaptation des animaux aux ressources et contraintes locales dans des systèmes peu artificialisés et très liés à leur environnement physique. Il n'y a donc pas UN animal type agro-écologique, mais DES animaux aux profils variés permettant de répondre aux attentes de l'agro-écologie. Face à la diversité des milieux et des systèmes d'élevage, il faut conserver une diversité génétique importante intra-race, mais aussi préserver la diversité génétique entre races. Cela nécessite une caractérisation phénotypique et génétique des races locales. Enfin, il s'agit de favoriser l'appropriation par les éleveurs et les techniciens d'élevage des outils et des ressources génétiques disponibles pour répondre à leurs besoins.

Abstract

Which animal breeding programs for agro-ecological livestock farming systems?

Agroecology uses natural processes and local resources rather than chemical inputs to ensure production while limiting the environmental footprint of agriculture. In this context, breeding innovations are necessary to obtain animals that are both productive and adapted to a broad range of local contexts. Whatever the animal sector, reorienting current breeding programmes seems to be more useful than developing programmes dedicated to agroecological systems that will struggle to be really effective in terms of costs and expected genetic progress. Breeding for robustness aims to promote individual adaptive capacities by considering various selection criteria including reproduction, health, and adaptation to rough feed resources, warm climate or fluctuating environmental conditions. It leads considering genotype-environment interactions in the prediction of breeding values. Animal performance should be evaluated in low-input systems in order to select those animals adapted to limiting conditions. Standardization of both animals and breeding conditions appears contradictory to the agroecological paradigm that calls for an adaptation of animals to local opportunities and constraints in weakly artificialized systems tied to their physical environment. There is thus not a single agroecological animal type, but animals with various profiles that meet the expectations of agroecology. As well as supporting the value of within-breed diversity, we must preserve between-breed diversity to maintain numerous options for adaptation to a variety of production environments and contexts. This may involve to phenotypically and genetically characterize local breeds. Last but not least, improved assimilation by farmers and farm technicians of available genetic resources and breeding tools is necessary.

PHOCAS F., BELLOC C., BIDANEL J., DELABY L., DOURMAD J.-Y., DUMONT B., EZANNO P., FORTUN-LAMOTHE L., FOUCRAS G., FRAPPAT B., GONZALEZ-GARCIA E., HAZARD D., LARZUL C., LUBAC S., MIGNON-GRASTEAU S., MORENO C.-R., TIXIER-BOICHARD M., BROCHARD M., 2017. Quels programmes d'amélioration génétique des animaux pour des systèmes d'élevage agro-écologiques ? *INRA Prod. Anim.*, 30, 31-46.