

La réduction des rejets avicoles et porcins par la sélection

S. MIGNON-GRASTEAU¹, M. BOURBLANC^{2,3,4,5}, B. CARRÉ¹, J.-Y. DOURMAD^{8,9}, H. GILBERT^{6,7},
H. JUIN¹⁰, J. NOBLET^{8,9}, F. PHOCAS^{6,7}

¹ INRA, UR83 Recherches Avicoles, F-37380 Nouzilly, France

² INRA, UMR1273 Mutations des Activités, des Espaces et des Formes d'Organisation dans les Territoires Ruraux, F-63122 Saint-Genès Champanelle, France

³ AgroParisTech, Mutations des Activités, des Espaces et des Formes d'Organisation dans les Territoires Ruraux, F-75231 Paris, France

⁴ CEMAGREF, Mutations des Activités, des Espaces et des Formes d'Organisation dans les Territoires Ruraux, 24 avenue des Landais, F-63172 Aubière, France

⁵ VetAgroSup, Mutations des Activités, des Espaces et des Formes d'Organisation dans les Territoires Ruraux, Site de Marmilhat, F-63370 Lempdes, France

⁶ INRA, UMR1313 Génétique Animale et Biologie Intégrative, F-78352 Jouy-en-Josas, France

⁷ AgroParisTech, Génétique Animale et Biologie Intégrative, 16 rue Claude Bernard, F-75231 Paris, France

⁸ INRA, UMR1079 Systèmes d'Elevage Nutrition Animale et Humaine, F-35590 Saint-Gilles, France

⁹ Agrocampus Ouest, Systèmes d'Elevage Nutrition Animale et Humaine, F-35000 Rennes, France

¹⁰ INRA, UE1206 EASM, Saint-Pierre d'Amilly, F-17700 Surgères, France

Courriel : sgrasteau@tours.inra.fr

Jusqu'à présent, la réduction des effluents avicoles et porcins a été réalisée soit *a posteriori* via leur traitement, soit en amont en ajustant les régimes alimentaires des animaux. Cet article analyse les améliorations à attendre, à la fois en termes de quantité et de composition des rejets, d'une voie jusqu'ici beaucoup moins explorée : la sélection génétique.

Pendant très longtemps, les rejets animaux ont été considérés uniquement pour leurs apports fertilisants. Ce n'est qu'assez récemment qu'une prise de conscience a eu lieu, du fait qu'un excès d'éléments fertilisants tels que l'azote, le phosphore ou certains métaux constituaient une source de pollution (Williams 1995). Les conséquences de ces excès, notamment en termes de qualité de l'eau, ont fait évoluer la législation vers une meilleure prise en compte des risques environnementaux liés à l'élevage (tableau 1).

Le problème des rejets est tout d'abord quantitatif, en raison de la concentration des élevages dans l'ouest de la France. En effet, les effluents retournant au sol proviennent à plus de 90% de l'élevage, les 10% restants étant dus à l'industrie et aux collectivités (Levasseur et Aubert 2006). Avec une production de 2 millions de tonnes de viande en 2005, l'élevage avicole français a produit 2,97 millions de tonnes de fumier et 6,02 millions de tonnes d'excreta et de lisier (CORPEN 2006a). La production porcine génère quant à elle 19,8 millions de tonnes d'excreta, contenant 143 000 tonnes d'azote,

33 200 tonnes de phosphore et 76 000 tonnes de phosphates (Dourmad *et al* 1999).

Si l'on regarde la répartition par espèce, la réduction des rejets en aviculture et en élevage porcin peut sembler un problème mineur car ceux-ci représentent seulement 10,5% des rejets totaux liés à l'élevage, contre 77% pour l'élevage bovin (Levasseur et Aubert 2006). Cependant, en France, les productions avicoles et porcines sont très fortement concentrées dans le grand ouest. Ainsi, les régions Bretagne et Pays de Loire regroupent 55% de l'élevage du poulet de chair et 75% de l'élevage porcin (Agreste 2008). La Bretagne, qui représente seulement 6% de la surface agricole totale, regroupe à elle seule 56% des élevages porcins, 40% des élevages de poulets de chair et 50% des élevages de poules pondeuses (Dourmad *et al* 1999, Agreste 2008). De ce fait, si, avec 80 porcs produits par km² et par an, la charge moyenne annuelle française est relativement faible par rapport à la moyenne européenne (140 porcs/km²/an), celle observée en Bretagne est de l'ordre de 720 porcs/km²/an (Dourmad *et al* 1999). Dans le département des

Côtes d'Armor, la capacité d'épandage des terres des fermes avicoles et porcines ne représente respectivement qu'environ 25 et 45% des productions d'effluents de ces fermes (Djaout *et al* 2008).

Au-delà de cet aspect purement quantitatif, la composition des rejets est également à prendre en compte, et particulièrement sa teneur en azote, en phosphore et en oligoéléments. Pour ce qui concerne l'eau, le risque principal est lié au lessivage de l'azote et au ruissellement du phosphore. Leur accumulation contribue à l'eutrophisation de l'environnement, à une diminution de la biodiversité, à un développement excessif d'algues ou de microorganismes, ce qui peut rendre l'eau impropre à la consommation humaine ou à l'utilisation par l'industrie (CORPEN 2006a). Or, porcs et volailles excrètent 55 à 80% de l'azote ingéré, et leurs rejets sont particulièrement concentrés en azote et en phosphore : 40 à 76 g N/kg de MS, 16 à 21 g P/kg de MS (FAO 2006).

Pour ce qui concerne les sols, le risque est lié à l'accumulation des métaux comme le cuivre et le zinc qui

Tableau 1. Historique de l'évolution des mesures concernant les rejets animaux.

Date	Événement
1964	Loi sur l'Eau précisant les mesures de protection des captages d'eau et créant les agences financières de bassin (aujourd'hui « Agences de l'eau »)
1969	Création de l'association de Protection du Saumon en Bretagne (aujourd'hui «Eaux et Rivières de Bretagne»)
1971	Création du Ministère de l'Environnement (0,1% du budget de l'État).
1972	Conférence mondiale sur l'environnement de Stockholm qui donnera lieu à la création du Programme des Nations Unies pour l'environnement pour coordonner les activités des Nations Unies dans le domaine de l'environnement
1975	Directive 75/440/CEE sur la qualité de l'eau (limitation à 50 mg de nitrates/l pour l'eau potable)
1976	Directive 76/464/CEE concernant la pollution causée par certaines substances dangereuses déversées dans le milieu aquatique
1976	Loi 76-663 relative aux ICPE (Installations classées pour la protection de l'environnement) avec obligation de déclaration préfectorale pour les élevages hors-sol, demande d'autorisation au préfet pour l'installation d'activités présentant des «dangers ou des inconvénients» pour le voisinage, la salubrité publique
1979	Directive 80/68/CEE concernant la protection des eaux souterraines contre la pollution causée par certaines substances dangereuses
1988	Séminaire ministériel sur la politique communautaire de l'eau soulignant la nécessité d'une législation communautaire sur la qualité écologique
1990	Création de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)
1990	Début du programme Bretagne eau pure , à l'initiative du Conseil régional de Bretagne
1991	Création des Directions Régionales de l'Environnement (DIREN) dont les missions comprennent entre autres l'application de la législation sur l'environnement
1991	Séminaire ministériel sur les eaux souterraines soulignant la nécessité d'agir afin d'éviter une dégradation à long terme de la qualité des eaux douces et une diminution des quantités disponibles
1991	Directive 91/676/CEE «nitrates» limitant l'épandage d'azote à 170 kg/ha
1992	Traité de Maastricht stipulant (art. 174) que la politique communautaire de l'environnement doit contribuer à la poursuite des objectifs que constituent la préservation, la protection et l'amélioration de la qualité de l'environnement ainsi que l'utilisation prudente et rationnelle des ressources naturelles, et doit être fondée sur les principes de précaution et d'action préventive et sur le principe de la correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement ainsi que sur le principe du pollueur-payeur
1993	Définition de «zones vulnérables»
1993	Définition des bonnes pratiques d'épandage et de stockage des fertilisants dans le code rural
1994	Classement de l'intégralité de la Bretagne en zone sensible
1995	Rapport sur l'environnement dans l'Union européenne de l'Agence européenne de l'environnement, confirmant la nécessité d'une action visant à protéger les eaux dans la Communauté, tant au point de vue qualitatif que quantitatif
1996	Directive n° 96/61/CE relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution.
1996	Arrêté préfectoral 96-DAS-130 mentionnant la limite de l'épandage du phosphore à 100 kg/ha
2000	Directive cadre européenne sur l'eau définissant pour de nombreux critères le bon état écologique des eaux de surface et souterraines et fixant l'objectif d'obtenir un «bon état écologique» de ses rivières, de ses lacs et de ses eaux littorales d'ici 2015
2001	Première condamnation de la France pour non-respect de la directive «nitrates»
2005	Publication du décret du livre V du code de l'environnement portant sur la limitation des risques de pollution
2005	Arrêté fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les élevages soumis à autorisation au titre du livre V du code de l'environnement (distance par rapport aux habitations et cours d'eau, le traitement des effluents)
2005	Loi constitutionnelle 2005-205 consacrant le droit de l'environnement dans l'ordre juridique français en intégrant ses principes dans la Constitution
2007	Seconde condamnation de la France pour non-respect de la directive «nitrates»
2009	Annonce un plan de 74,4 millions d'euros pour la mise aux normes de 1800 installations agricoles et la baisse des pollutions dans neuf bassins bretons – Arrêt du captage d'eau des rivières les plus polluées
2009	Le Grenelle de l'environnement promet d'accélérer la réduction de l'usage des phosphates et nitrates de 40% d'ici à 2012-2014 sur les zones les plus fragiles

peut à terme affecter la fertilité des sols et/ou leur fonctionnement microbien dans des délais variables allant de quelques dizaines à une centaine d'années selon les pratiques (Dourmad et Jondreville 2008). Même si ces métaux sont présents en quantité limitée dans les rejets animaux, ils représentent un réel problème car les animaux rejettent entre 80 et 99% de la quantité ingérée, les régimes étant très souvent largement excédentaires par rapport aux besoins des animaux (Nys 2001, Jondreville *et al* 2002, Revy *et al* 2003). De fait, dès 2003, la teneur maximale autorisée de ces éléments dans les régimes a été diminuée de moitié.

Enfin, la dégradation bactérienne de l'azote pendant le stockage ou la transformation en compost aboutit à la production d'ammoniac et de protoxyde d'azote. Les émissions d'ammoniac contribuent à l'acidification et à l'eutrophisation des milieux, ainsi qu'au dépeuplement des forêts (Portejoie *et al* 2004, CORPEN 2006b). L'ammoniac est aussi impliqué dans l'apparition de troubles respiratoires chez les animaux et les éleveurs et contribue à la production d'odeurs (Ritz *et al* 2004, CORPEN 2006a). Le protoxyde d'azote est un gaz à effet de serre dont le pouvoir de réchauffement climatique est particulièrement élevé (plus de 300 fois celui du CO₂). Au total, ces pertes gazeuses peuvent représenter la moitié des rejets azotés des animaux.

La prise de conscience des problèmes liés aux rejets animaux a abouti à la mise en place de normes européennes pour l'épandage des effluents. La directive européenne «nitrates» (91/676/CEE) limite ainsi l'épandage d'azote à 170 kg/ha. En 2002, selon ces normes, près de 60% des cantons bretons se retrouvaient en situation d'excédent structurel (Agreste 2005) ce qui a conduit à mettre en place des mesures restrictives sur les épandages. Malgré ces mesures, la France a tout de même été condamnée à deux reprises, en 2001 et en 2007, pour non respect de cette directive.

La mise en œuvre de limites réglementaires à l'épandage du phosphore est plus récente. Elle n'a d'abord concerné qu'un département français avec un seuil d'épandage fixé à 100 kg P₂O₅/ha, mais la jurisprudence s'oriente maintenant vers un objectif d'équilibre de la fertilisation. Le rapport N/P des effluents devient alors un élément déterminant. Ceci est plus particulièrement problématique pour les monogastriques, qui, contrairement aux ruminants, ne disposent pas de l'équipement enzymatique approprié pour digérer le phosphore phytique et rejet-

tent donc 60 à 80% du phosphore ingéré (Heuser *et al* 1943, Sauveur 1989, Jondreville et Dourmad 2005, CORPEN 2006a). Ainsi, selon ces réglementations, les surfaces nécessaires à l'épandage de l'azote rejeté par un élevage de 40 000 dindes dans un bâtiment de 2000 m² seraient de 49 ha, mais celles nécessaires à l'épandage du phosphore rejeté seraient de 92 ha (Puybasset 2008), alors que la surface moyenne des exploitations bretonnes n'était que d'environ 60 ha en 2007 (Agreste 2008). L'application des normes actuelles sur le phosphore placerait ainsi 74% des exploitations avicoles françaises en situation d'excédent structurel (Le Douarin 2008). Pour les effluents avicoles, respecter les normes d'apport de phosphore limiterait à 70 kg/ha les apports d'azote organique, ce qui est généralement insuffisant pour les cultures et impliquerait paradoxalement de devoir fournir un apport complémentaire d'engrais chimique. Les effluents porcins sont mieux équilibré en N et P que les effluents de volailles, mais le phosphore reste limitant si l'on raisonne par rapport aux besoins des plantes. De plus, la question du déséquilibre en azote et phosphore se pose dans les élevages où des installations de traitement visant à éliminer de l'azote ont été mises en place afin de respecter la directive «nitrates».

La problématique liée aux rejets des porcs et des volailles est donc double. D'une part, les rejets contiennent des éléments dont les quantités et les équilibres posent problème à la fois pour leur utilisation en tant que fertilisant et pour leur impact environnemental. D'autre part, porcs et volailles retiennent mal la plupart des éléments incriminés, et cette capacité est variable selon les individus. Ces deux aspects laissent donc place à la fois à des possibilités d'action technique au niveau des élevages, mais également en termes de sélection pour améliorer les capacités de rétention des animaux.

Differentes stratégies ont été envisagées pour réduire la charge des effluents d'élevage, en azote, en phosphore ou en éléments traces métalliques. Les principales concernent la réduction des apports à la source, le plus souvent par des voies nutritionnelles, l'exportation des effluents vers d'autres exploitations ou d'autres régions et le traitement des effluents. Différentes synthèses ont été consacrées à ces approches et nous n'en retiendrons ici que les principales conclusions, de façon à mieux mettre en perspective les voies génétiques de réduction des rejets animaux qui seront abordées par la suite.

1 / La réduction des effluents par des voies non génétiques

1.1 / L'approche nutritionnelle

De nombreux travaux ont été conduits au cours de ces dernières années afin de réduire l'excrétion d'azote, de phosphore, de cuivre et de zinc par les porcs et les volailles. Les voies envisagées consistent d'une part à mieux ajuster les apports aux besoins des animaux et d'autre part à améliorer la biodisponibilité de ces nutriments dans les aliments. L'alimentation par phases combinée à une amélioration de l'équilibre en acides aminés du régime permet de réduire les rejets d'azote de 9 à 17% chez les porcs (Dourmad *et al* 2009, Guingand *et al* 2010) et de 15 à 35% chez les volailles (Leclercq 1996, Van Cauwenbergh et Burnham 2001, Travé *et al* 2005, Guingand *et al* 2010). L'intérêt environnemental des formules à taux protéique réduit est reconnu (CORPEN 2003, 2006), une diminution d'un point de taux protéique entraînant une réduction des rejets azotés de 5 à 10% chez les volailles (Guingand *et al* 2010). De plus l'utilisation de régimes moins riches en protéines permet aussi de réduire de façon significative les émissions d'ammoniac (- 12% par point de taux protéique, Guingand *et al* 2010). Il est important de noter que le développement de telles stratégies de réduction des rejets azotés nécessite une très bonne connaissance de la valeur des matières premières, en particulier la digestibilité des acides aminés, et de l'évolution des besoins des animaux en fonction de la croissance ou du stade physiologique. Ceci est maintenant réalisable grâce au développement de modèles de prédiction des besoins et de tables de valeur de digestibilité iléale des acides aminés, tels qu'InraPorc® ou Inavi (Sauvant *et al* 2004).

L'alimentation par phases s'avère également efficace pour réduire l'excrétion de phosphore (Jondreville et Dourmad 2005, Narcy *et al* 2009). Chez le porc, cette réduction de l'excrétion de phosphore peut atteindre 19 à 31% selon l'âge de l'animal (Guingand *et al* 2010). Cependant chez les monogastriques la faible digestibilité du phosphore reste le principal problème, même si elle peut être significativement améliorée grâce à l'incorporation de phytases d'origine microbienne et l'utilisation de phosphates hautement digestibles (Meschy *et al* 2008). L'ajout de phytases microbiennes permet de pallier l'absence de phytase endogène des animaux, et donc de réduire les apports de phosphore de l'aliment (et par suite

dans les rejets) de 25 à 40% selon la quantité de phosphore et de calcium du régime (Dourmad *et al* 2009, Narcy *et al* 2009). L'intégration de l'ensemble des connaissances disponibles a récemment permis d'améliorer les systèmes d'évaluation de la valeur des aliments et des besoins des animaux, en passant du phosphore total au phosphore digestible apparent chez le porc ou au phosphore disponible chez le poulet (Meshy *et al* 2008) et de bien maîtriser l'utilisation des phytases exogènes. Il existe une grande variabilité entre les matières premières concernant la disponibilité du phosphore. Ainsi, à taux de phosphore équivalent (0,3%), les parts de phosphore digestible de l'orge et du maïs sont respectivement de 45 et 25% (Tran et Skiba 2005). De même, les plantes contiennent une part variable de phytase végétale facilitant l'absorption du phosphore. L'activité phytasique est ainsi 23 fois plus élevée dans le blé que dans le maïs (Narcy *et al* 2009). Chez le porc, la digestibilité du phosphore varie certes entre blé et maïs, mais également entre variétés de blé (de 47 à 56%) et entre variétés de maïs (de 23 à 54%) selon Skiba *et al* (2004). Certains gènes du poïs ont même été identifiés pour leur effet sur la digestibilité du poïs pour les poulets en croissance (Wiseman *et al* 2006). La présence de phytases et la forme du phosphore, phytique ou non, sont donc susceptibles de largement faire varier la disponibilité du phosphore des matières premières. De nouvelles valeurs alimentaires ont été publiées pour les matières premières destinées aux animaux d'élevage (Sauvant *et al* 2004) et ceci permet, parallèlement à la meilleure connaissance des besoins des animaux (InraPorc, Lescoat *et al* 2005, Narcy *et al* 2009), de sécuriser la formulation d'aliments à teneur réduite en phosphore.

Le cuivre et le zinc sont souvent incorporés en quantités bien supérieures aux stricts besoins des animaux, compte tenu de leurs effets comme facteurs de croissance ou encore en raison de l'utilisation de marges de sécurité importantes (Jondreville *et al* 2002, Revy *et al* 2003). En conséquence, ils se retrouvent en forte concentration dans les effluents, ce qui peut à terme entraîner une toxicité pour les plantes ou les microorganismes du sol (Jondreville *et al* 2003). La seule façon de réduire la teneur des effluents en ces éléments est d'en réduire l'incorporation dans les aliments. En 2003, les teneurs maximales autorisées dans les aliments ont largement été abaissées entraînant une réduction très significative des rejets (de plus de 50%). Toutefois, même si la situation a été largement améliorée par la nouvelle réglementation, les épandages de

cuivre et de zinc sont encore supérieurs aux capacités d'exportation des cultures et la rétention de ces deux éléments par les animaux reste très faible (moins de 5%).

1.2 / Le traitement et l'exportation des effluents

La mise en place de la directive «nitrates» a conduit de nombreux élevages en situation d'excédent d'azote à rechercher des surfaces d'épandage dans des exploitations voisines ou situées à plus longue distance, ou à développer des installations de traitements des effluents. Les effluents de volailles sont souvent exportés en dehors des zones en excédent structurel car leur teneur plus élevée en matière sèche les rend plus faciles à transporter. A l'inverse, les effluents porcins sont trois fois plus riches en eau que ceux des volailles, ce qui limite les possibilités de transport et en augmente le coût. Transporter les effluents à 100 km coûte ainsi 2,70 €/kg d'azote pour le lisier de porc, 0,41 €/kg d'azote pour le fumier de poulet de chair et 0,31 €/kg d'azote pour les fientes séchées de poules pondeuses. (Djaout *et al* 2008). L'intérêt, sur le plan économique et environnemental, du développement de plans d'épandage collectifs a été démontré par Paillat *et al* (2009) mais leur mise en place peut se heurter à des questions d'acceptabilité locale.

Le traitement des effluents s'est développé dans les élevages porcins, en particulier dans l'ouest de la France, du fait des faibles capacités d'épandage au niveau local. Quideau (2010) a estimé que 19% des effluents porcins passaient par une filière de traitement. Ces installations de traitement produisent une grande diversité de coproduits dont les caractéristiques sont variables selon les procédés retenus. Chez les volailles, les traitements utilisés sont variables en fonction de la production. Ainsi, chez les poules pondeuses, le séchage des fientes permet d'éliminer 40 à 65% de l'azote et de concentrer la matière sèche (80% du produit fini), ce qui facilite leur exportation. Les volailles de chair élevées au sol produisent un fumier plus propice au compostage. La plupart de ces filières de traitement éliminant une part importante de l'azote de l'effluent (50% pour le compostage, 70% pour le procédé de nitrification-dénitrification), les produits qui en sont issus présentent souvent un déséquilibre marqué par rapport aux besoins des cultures puisqu'ils sont très riches en phosphore ou en potassium. Ils présentent cependant l'avantage, pour certains d'entre eux comme les résidus de séparation de phase ou les boues séchées, de pouvoir être plus facilement exportés en dehors des zones d'élevage.

L'obligation à terme de viser l'équilibre de la fertilisation des sols, pour l'ensemble des éléments, en particulier le phosphore, pourrait remettre en cause certains de ces systèmes de traitements. En effet, une fertilisation équilibrée basée sur la quantité de phosphore conduira à des apports très faibles en azote organique pour toutes les filières pour lesquelles le traitement des rejets entraîne un abaissement important de la teneur des rejets en azote. Les analyses de cycle de vie représentent dans ce cadre un outil précieux pour intégrer les conséquences positives et négatives des choix de gestion des effluents. Ainsi, Lopez-Ridaura *et al* (2007) ont montré que, malgré son coût, le transfert d'effluents de porcs avait un impact environnemental plus réduit que le traitement, que ce soit pour l'eutrophisation, le changement climatique, l'acidification des sols ou la consommation d'énergie.

Ceci nous conduit à penser que, dans l'avenir, les filières de gestion des effluents devront limiter autant que possible les émissions de gaz nocifs pour l'environnement (NH_3 , N_2O , CH_4 ...) et devront également préserver et valoriser au mieux les éléments fertilisants. Dans un contexte d'accroissement du prix des fertilisants, cette démarche devrait aussi être intéressante au plan économique. En quelque sorte, il convient de rechercher des filières de gestion permettant de reconstruire le cycle des nutriments entre élevage et culture, tout en minimisant les fuites vers l'environnement.

2 / La réduction des rejets par la voie génétique

Si la réduction des rejets n'a jusqu'à récemment jamais fait l'objet d'études génétiques en tant que telle, de nombreux caractères influençant les rejets ont été intégrés dans les schémas de sélection. Les caractères explicitement sélectionnés sont généralement liés à une amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'aliment par l'animal : la diminution des rejets est alors une conséquence indirecte de cette meilleure efficacité. Lorsque l'animal ingère de l'aliment, il doit tout d'abord le digérer, puis utiliser les nutriments et l'énergie ainsi disponibles pour son métabolisme basal (besoins d'entretien), ses dépenses de production (croissance et/ou reproduction) ou son activité physique. Chez les animaux en croissance, la sélection a dans un premier temps visé la diminution de l'indice de consommation et l'augmentation du taux de muscle (ou la réduction de l'adiposité) de la carcasse. Plus récemment, il a également été montré que la capacité de l'animal à

digérer son aliment, évaluée par l'EMAn (Energie Métabolisable corrigée pour un bilan Azoté nul) présentait aussi une variabilité génétique chez le poulet (Mignon-Grasteau *et al* 2004). Par ailleurs, des résultats d'expériences de sélection portant sur la consommation résiduelle du porc ou de la poule pondeuse, ou sur la capacité du poulet de chair à digérer le blé semblent montrer que les deux critères peuvent être sélectionnées de façon relativement indépendante (Mignon-Grasteau *et al* 2009, Barea *et al* 2010) et que les facteurs influençant chacune des deux composantes peuvent être ciblés de façon spécifique. Enfin, une première étude vient tout récemment de montrer qu'il était aussi envisageable de sélectionner directement sur les rejets du poulet de chair (de Verdal *et al* 2010b).

2.1 / Sélection sur la vitesse de croissance

La sélection d'animaux à croissance rapide a été le premier outil d'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des aliments par les animaux. En effet, si en valeur absolue l'ingestion quotidienne des animaux à forte vitesse de croissance est augmentée, l'ingestion rapportée au gain de poids (indice de consommation) est diminuée. Ces animaux ont une période d'élevage – et donc d'excration – plus courte que les animaux à croissance lente. De plus, les besoins d'entretien de ces animaux, estimés relativement à leur poids métabolique moyen pendant la phase d'élevage sont également plus faibles. Ainsi, pour obtenir un poulet de même poids vif (2 kg), un poulet label à croissance lente excrètera 118 g d'azote en 81 jours, soit 2,3 fois plus qu'un poulet standard à croissance rapide en 35-40 jours (CORPEN 2006a). Chez le porc, Crocker et Robinson (2002) ont comparé une lignée paternelle sélectionnée pour la vitesse de croissance et l'épaisseur de lard dorsal et une lignée maternelle sélectionnée pour le nombre de porcelets nés vivants. Indépendamment du poids des animaux, l'excration quotidienne de phosphore, de cuivre, de zinc et de calcium était de 18 à 40% plus faible dans la lignée maternelle que dans la lignée paternelle.

Par ailleurs, chez les monogastriques, les animaux à fort potentiel de croissance ont besoin d'aliments concentrés en énergie et en nutriments pour exprimer ce potentiel. Ces aliments doivent être fabriqués à partir de matières premières de qualité, bien équilibrées en acides aminés (notamment en lysine, méthionine, thréonine et tryptophane) et présentant une proportion de phosphore d'origine minérale plus élevée. Ces aliments sont mieux assimilés que les aliments «dilués» distribués à des animaux à

croissance plus lente, d'où des rejets proportionnellement plus faibles. Par exemple, Havenstein *et al* (2003) ont montré que nourrir des poulets à croissance rapide avec un régime du type de ceux utilisés en 1957 aboutissait à un poids vif de 19 à 22% plus faible que lorsqu'ils étaient nourris avec un régime moderne. Les animaux à croissance rapide sont également plus sensibles aux régimes déficients. Par exemple, chez le porc, Alexander *et al* (2008) ont observé qu'une lignée à croissance rapide voyait la solidité de ses os et sa concentration plasmatique en vitamine D plus affectées par un déficit en phosphore qu'une lignée à croissance moins rapide. Chez le porc, l'effet de la sélection sur les rejets n'a pas été évalué directement, mais Tribout *et al* (2004) ont montré que la sélection pratiquée entre 1977 et 1998 en race Large White a conduit à des évolutions génétiques (ΔG) qui vont dans le sens d'une augmentation modérée du gain moyen quotidien en période d'engraissement ($\Delta G = 77 \pm 27 \text{ g/j}$), associée à une forte diminution de l'adiposité de la carcasse ($\Delta G = -5,2 \pm 0,7 \text{ mm}$ pour l'épaisseur de lard dorsal à 20 semaines d'âge) et à une amélioration très importante de la teneur en viande maigre de la carcasse ($\Delta G = 8,6 \pm 1,7 \text{ points}$).

2.2 / Consommation résiduelle, indice de consommation

Le risque lié à une sélection sur la seule vitesse de croissance est d'augmenter fortement la consommation alimentaire. Ainsi, Deeb et Cahaner (2002) ont montré qu'en une seule génération de sélection sur le poids vif à 35 jours, la consommation alimentaire des poulets avait augmenté de 10%. Indirectement, cela augmente l'impact environnemental de ces animaux qui nécessitent la production d'une plus grande quantité de matière première. C'est pour cette raison que les efforts de sélection des volailles se sont plutôt focalisés sur l'indice de consommation ou sur la consommation résiduelle, c'est-à-dire la différence entre consommation réelle et consommation estimée d'après les besoins théoriques d'entretien et de production. Ces caractères sont relativement lourds à mesurer, car ils impliquent d'enregistrer la consommation alimentaire individuelle, mais leur sélection est relativement aisée car ils sont héritables (Pym 1990, Tixier-Boichard *et al* 1995, Schulze *et al* 2002, Schnyder *et al* 2002). Chez les volailles, cela implique néanmoins d'élever les animaux en cage individuelle, ce qui génère des mesures de consommation, d'indice de consommation et de consommation résiduelle affectées par la présence d'interactions entre génotype et environnement. Ainsi, chez le poulet de chair, Mignon-Grasteau *et al* (2006) ont

montré que le classement de candidats à la reproduction sur leur indice de consommation était totalement différent selon que la mesure du caractère était réalisée en cage individuelle ou au sol. Chez le porc en revanche, la mise au point d'automates d'alimentation permettant des enregistrements précis en loges collectives, c'est-à-dire dans des conditions proches de celles prévalant dans les élevages commerciaux a facilité ces mesures depuis les années 90. Cependant, chez le porc, c'est surtout la forte intensité de sélection contre l'adiposité et dans une moindre mesure pour la vitesse de croissance qui a été, jusqu'à présent, à l'origine de la réduction marquée de l'indice de consommation, la consommation alimentaire journalière ayant peu évolué.

Chez le poulet de chair, l'indice de consommation a été constamment amélioré depuis plus de cinquante ans. La moitié de cette amélioration est due à la génétique. Pour le poulet de chair, l'indice de consommation moyen est ainsi passé de 2,03 en 1984 à 1,85-1,87 en 2005 (Gallot 2007). En comparant des poulets de 2001 et de 1957, Havenstein *et al* (2003) ont montré que l'indice de consommation de 0 à 42 jours était de 1,58 pour les premiers contre 2,28 pour les seconds. Cependant, comme indiqué précédemment, ces animaux très performants ont besoin d'un régime riche pour exprimer leur potentiel. De fait, les animaux à croissance rapide de 2001, quand ils étaient nourris avec un régime de 1957, avaient un indice de 1,88 contre 1,58 avec un régime mieux adapté.

Chez la poule pondeuse, Bordas et Mérat (1984) ont sélectionné des lignées divergentes sur leur consommation résiduelle faible (R-) ou forte (R+). Après 19 générations de sélection, ces deux lignées ont une consommation résiduelle qui diffère de 25%. L'ensemble du métabolisme est affecté, car les deux lignées diffèrent également pour la thermogenèse alimentaire (+84% chez les R+, Gabarrou *et al* 1996), la thermotolérance, qui est meilleure chez les R+ (Bordas et Minvielle 1997), ou le ratio entre ressources affectées à l'entretien et ressources affectées à la production qui est de 1,90 chez les R+ contre 1,48 chez les R- (Strobel *et al* 2004). Plus récemment, chez le porc en croissance, Barea *et al* (2010) ont étudié les différences entre des porcs issus de deux lignées sélectionnées de façon divergente sur la consommation moyenne journalière résiduelle. Après 5 générations de sélection, la lignée basse a une consommation résiduelle inférieure de 153 g/j à celle de la lignée haute, ce qui représente une différence de 2,1 écart-type génétique.

Bouvarel *et al* (2006) ont montré qu'une baisse de 4,8% de l'indice de consommation des poulets standard réduit les rejets azotés de 9% et les rejets de phosphore de 14%. Cet impact est en partie associé à une modification de la pulsatilité de la sécrétion de l'hormone de croissance, plus forte chez les lignées à faible indice de consommation, ce qui améliore la capacité de rétention de l'azote et le métabolisme protéique et donc réduit l'excrétion d'azote (Buyse *et al* 1999).

Malgré l'importance économique du caractère, les recherches de QTL influençant l'indice de consommation ont donné relativement peu de résultats, en raison de la nature composite du caractère (Hansen *et al* 2005, Zhang *et al* 2005b, Sherman *et al* 2008). Chez le porc, Rothschild *et al* (2007) ont souligné que seuls 8 des 1675 QTL détectés chez le porc concernaient l'efficacité alimentaire, contre 16 pour l'ingestion, 224 pour la croissance et 404 pour l'engraissement. Duthie *et al* (2008) et Gilbert *et al* (2010) ont d'ailleurs trouvé, chez le porc, que des QTL d'indice de consommation co-localisaient avec des QTL affectant soit la composition corporelle (dépôt de protéines et/ou de lipides), soit la vitesse de croissance ou la consommation alimentaire. Plus récemment, des études réalisées chez le poulet de chair ont montré des liens entre l'indice de consommation et des variations de SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*, pour polymorphisme portant sur une seule base) dans des gènes régulateurs du métabolisme et de la répartition de l'utilisation de l'énergie, tels que la protéine de découplage aviaire ou le neuropeptide Y (Sherman *et al* 2008) ou dans des gènes impliqués dans la thermogénèse, l'homéostasie énergétique ou le comportement alimentaire (récepteur à la mélanocortine-3, Sharma *et al* 2008). Enfin, Ojano-Dirain *et al* (2007) ont pu détecter des différences d'expression de gènes impliqués dans le métabolisme énergétique mitochondrial entre des poulets à fort ou faible indice de consommation.

2.3 / Utilisation de l'énergie pour les dépôts corporels ou l'activité physique

Chez le porc comme chez le poulet, les animaux maigres sont plus efficaces que les animaux gras, ont un meilleur indice de consommation et des rejets azotés plus réduits (Geraert *et al* 1992, Kerenzvi *et al* 1992). De fait, pour déposer un gramme de protéines, il faut à peu près la même quantité d'énergie que pour déposer un gramme de tissu adipeux, mais à la dif-

férence des lipides le dépôt d'un gramme de protéines s'accompagne du dépôt de 3 à 4 g d'eau (Noblet *et al* 1991, Buyse *et al* 1999). Bouvarel *et al* (2006) ont ainsi estimé qu'une baisse de 1,5% de la fixation de protéines chez le poulet augmentait les rejets azotés de 10%. Chez le porc, Morel et Wood (2005) ont comparé l'excrétion azotée de porcs maigres, gras ou intermédiaires, et montré que les porcs gras retenaient 12% d'azote en moins que les maigres (45 vs 57%, avec une valeur de 53% pour les intermédiaires). Chez le porc, on peut également élever des mâles entiers plutôt que des mâles castrés. Ces derniers ont une rétention protéique 30% plus faible que les mâles entiers, et sont également plus gras (Dunshea *et al* 1993). Labroue *et al* (1997) ont également estimé que la corrélation génétique entre indice de consommation et composition corporelle était élevée et cohérente avec la meilleure efficacité des animaux maigres (0,30 à 0,51 entre indice et épaisseur de lard dorsal ; -0,66 à -0,43 entre indice et pourcentage de viande maigre). Des résultats très similaires sont rapportés par Gilbert *et al* (2007) pour les corrélations génétiques impliquant la consommation moyenne journalière résiduelle (-0,55 avec la teneur en viande maigre de la carcasse et 0,44 avec l'épaisseur de lard dorsal).

L'activité de l'animal peut également influencer son efficacité *via* le comportement alimentaire (durée et nombre des repas) et l'énergie dépensée pour se nourrir, mais aussi *via* l'activité physique non alimentaire, autre source de dépense énergétique (Noblet *et al* 2003). Chez le porc, la dissipation d'énergie sous forme de chaleur est due pour un tiers à l'activité physique, elle-même due pour 44% à l'activité alimentaire *via* le temps passé à manger et le nombre de repas (Archer *et al* 2003). Les animaux les plus efficaces ont généralement une activité physique non alimentaire plus faible que celle des animaux les moins efficaces. Par exemple, les poulets standards à faible indice de consommation passent plus de temps en position couchée que les poulets labels à fort indice (Bizeray *et al* 2000). Chez le porc, Labroue *et al* (1999) ont mis en évidence une forte différence de comportement alimentaire entre les porcs Piétrain et Large White : les premiers, qui sont 32% moins gras, font 44% de visites à la mangeoire et 11% de repas quotidiens en moins que les seconds. Intra-race, Gilbert *et al* (2009) ont montré chez le porc Large White que la corrélation génétique entre nombre de repas par jour et consommation moyenne journalière résiduelle suivait la même tendance (0,25).

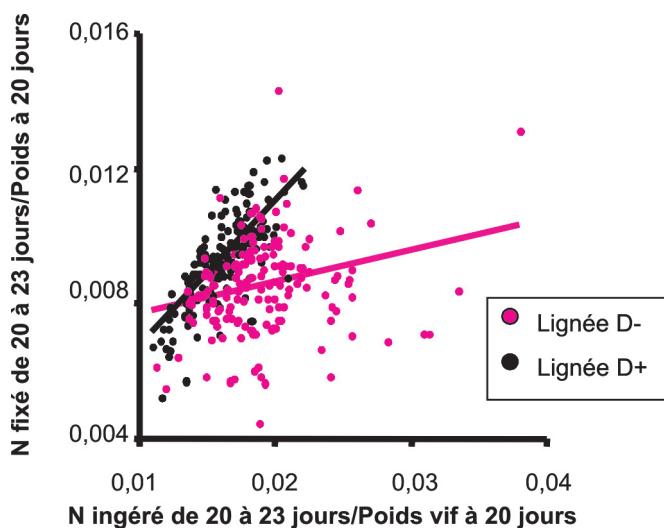
2.4 / Possibilités de sélection sur la capacité à digérer l'aliment

Il a été longtemps admis que les capacités de digestion des animaux ne dépendaient pas de facteurs génétiques (Pym 1990). Ce n'est que très récemment que des différences héritables d'assimilation de l'énergie et du phosphore ont été mises en évidence chez le poulet (Zhang *et al* 2003, Mignon-Grasteau *et al* 2004). Cette variabilité n'est toutefois observée que dans les cas où les animaux sont soumis à un challenge permettant la mise en évidence des animaux ayant des difficultés potentielles de digestion. A l'opposé, avec un régime favorable (à base de maïs par exemple), même les animaux ayant une capacité de digestion modeste digèrent relativement bien leur aliment. C'est probablement un des facteurs qui expliquent la faible héritabilité de la capacité à retenir le phosphore chez le poulet de chair (0,09) dans l'expérience de Zhang *et al* (2003) qui utilisait un régime favorable à base de maïs et de soja. De fait, après 3 générations de sélection divergente, la différence entre la lignée haute et la lignée basse n'était que de 8 à 11% selon le sexe (Zhang *et al* 2005a). A l'opposé, dans le cas de l'expérience de sélection sur la digestibilité du blé chez le poulet de chair, c'est une variété de blé particulièrement difficile à digérer, le Rialto, qui a été incorporée à fort taux (55%) dans le régime des animaux. De fait, dans ces lignées à forte (D+) ou faible (D-) capacité à digérer le blé, l'héritabilité de l'EMAn (utilisée comme indicateur de la digestibilité) est de 0,15 avec un régime à base de maïs et de 0,38 avec un régime à base de blé (Mignon-Grasteau *et al* 2004, 2010a, Carré *et al* 2008). Cette sélection a des conséquences importantes en termes d'excrétion brute. En effet, de Verdal *et al* (2010a) ont montré qu'après 10 générations de sélection, la quantité de fientes sèches excrétée par les D- est 2,1 fois plus élevée que celle des D+ à 3 semaines (âge à la sélection) et 2,3 fois plus élevée à 53 jours (âge auquel les poulets atteignent le poids commercial).

Chez les animaux de la lignée D-, les excréptions d'azote et de phosphore, rapportées à la consommation alimentaire sont plus élevées de respectivement 53,4 et 21,4% (de Verdal *et al* 2010b). Bien que plus faibles, des différences d'excrétion d'azote et de phosphore sont encore de 14,8% lorsque les animaux sont nourris avec du maïs (Mignon-Grasteau *et al* 2010b).

Dans ces deux lignées, le ratio de l'azote sur le phosphore excrété est de 3,46 pour les D+ et de 4,34 pour les D- (de Verdal *et al* 2010b). Cette différence

Figure 1. Quantité d'azote fixée par rapport au poids vif, en fonction de la consommation d'azote rapportée au poids vif, dans les lignées de poulets sélectionnées sur leur bonne (D+) ou mauvaise (D-) capacité à digérer le blé.



d'excrétion azotée serait due au fait que si un supplément d'ingestion azotée se traduit par une fixation d'azote supplémentaire chez les animaux D+, cela n'est pas vrai chez les D- qui excrètent en conséquence d'autant plus d'azote (cf. figure 1, Carré 2008). Compte tenu de la composition moyenne des fumiers de volailles et des déperditions d'azote au cours du stockage et de l'épandage qui représentent près de 50% de l'azote excrété par l'animal, le ratio N/P₂O₅ dans un fumier de ces animaux serait de 0,98 chez les D+ et de 1,2 chez les D-, ce qui est dans l'ordre de grandeur de 0,95 à 1,2 mentionné par le CORPEN (2006). Or les limites d'épandage étant respectivement de 170 kg N/ha et 100 kg P₂O₅ /ha, on peut considérer que la valeur optimale du ratio N/P₂O₅ dans le fumier serait de 1,7. Pour atteindre cet objectif, il faudrait limiter les pertes d'azote à 15% pour les D+ et 30% pour les D-. Chez le porc, ce ratio dans le lisier est de l'ordre de 1,7 à 1,9, l'optimum se situant autour de 2,5 à 3 compte tenu des possibilités d'abattement

d'azote et de phosphore avant épandage (Quideau 2010).

Enfin, concernant le phosphore, on peut noter que l'importance des rejets est due en grande partie à l'absence de phytase endogène chez les monogastriques, qui les empêche de convertir le phytate indigestible de l'aliment en phosphore assimilable. Golovan *et al* (2001) ont inséré le gène de l'enzyme manquante dans le génome du porc et ont créé la lignée de porcs transgéniques «Enviropig™» produisant cette enzyme au niveau salivaire. La digestion du phosphore est quasiment de 100% pour les porcs transgéniques, contre seulement 50% pour leurs congénères non transgéniques. La quantité de phosphore présente dans les rejets est diminuée de 56 à 75%, selon l'âge de l'animal. Outre l'avantage écologique de ces animaux, ils présentent un avantage économique, car ils n'ont pas besoin d'un aliment supplémenté en phosphate minéral ni en phytase. L'épandage des lisiers de ces porcs sur un sol argileux

génère une émission de CO₂ réduite de près de 20%, mais une augmentation des pertes azotées par dénitrification de 37% (Yang *et al* 2008), qui pourrait être due à la plus grande teneur en hydrates de carbone des lisiers des porcs transgéniques (Mao *et al* 2007). Elevée depuis 1999 à des fins strictement scientifiques, cette lignée de porcs transgéniques entre désormais dans une phase plus industrielle et est actuellement en attente d'autorisation d'utilisation pour la nutrition humaine en Amérique du Nord.

Plusieurs gènes influençant la digestibilité du phosphore ont pu être identifiés chez ces porcs, tels que l'α-amylase et le lysozyme-C1, respectivement 3,5 et 2 fois plus fortement exprimés au niveau de la glande parotide chez les porcs transgéniques que chez les conventionnels (Verschoor *et al* 2006). Suite à ces résultats, Guenther *et al* (2006) ont entamé des travaux pour créer une souche de cailles transgéniques, produisant la phytase au niveau du proventricule.

2.5 / Possibilités de sélection directe sur des caractéristiques liées aux rejets

Il a récemment été montré chez le poulet de chair que les rejets pouvaient être sélectionnés directement, car plusieurs de leurs caractéristiques sont fortement hérétibles (tableau 2). Par exemple, le coefficient d'utilisation digestive de la matière sèche ou CUD (c'est-à-dire la quantité de fientes sèches rapportée à la consommation alimentaire) a une héritabilité de 0,30, les excréptions d'azote et de phosphore ou le taux d'humidité des fientes ont une héritabilité comprise entre 0,24 et 0,26, et le poids total de fientes a une héritabilité de 0,47. L'héritabilité estimée pour le ratio de l'azote sur le phosphore excrété, bien que légèrement plus faible (0,19), est néanmoins parfaitement compatible avec la sélection (de Verdal *et al* 2010b). De fait, la comparaison des réponses attendues à la sélection montre

Tableau 2. Estimation des paramètres génétiques (héritabilités sur la diagonale, corrélations génétiques au-dessus de la diagonale) de caractères d'excrétion chez le poulet de chair (tiré de de Verdal *et al* 2010b).

	Poids d'excreta	Humidité des fientes	N/P dans les fientes	Poids excrétré/Cons. alimentaire	N excrétré/Cons. alimentaire	P excrétré/Cons. alimentaire
Poids d'excreta	0,47	- 0,39 0,26	0,51 - 0,53 0,19	0,95 - 0,23 0,45 0,30	0,81 - 0,29 0,42 0,90 0,25	0,35 0,20 - 0,39 0,50 0,66 0,24
Humidité des fientes						
N/P dans les fientes						
Poids excrétré/ Cons. alimentaire						
N excrétré/ Cons. Alimentaire						
P excrétré/ Cons. alimentaire						

que sélectionner sur l'EMAn ou le CUD aboutirait à une réduction comparable des rejets (en quantité totale, en azote et en phosphore), ce qui est logique compte tenu de la très forte corrélation génétique entre ces deux caractères (0,99, Mignon-Grasteau *et al* 2004). Sélectionner sur l'EMAn ou le CUD permet de réduire les rejets plus efficacement qu'une sélection sur l'indice de consommation : de 37 à 40% pour les rejets totaux et azotés et de 207 à 209% pour les rejets phosphorés (de Verdal *et al* 2010b). Les corrélations génétiques entre ces caractères et le poids vif montrent enfin que cette sélection affecterait peu la vitesse de croissance des animaux.

Hormis les effets génétiques additifs directs, l'excrétion est également soumise à des effets génétiques non additifs comme l'hétérosis, qui sont particulièrement importants à prendre en compte chez le porc et les volailles, pour lesquels les animaux commerciaux sont issus de croisements entre diverses lignées. On peut citer par exemple les travaux de Crocker et Robinson (2002) qui ont comparé une lignée paternelle (Hampshire × Duroc), une lignée maternelle (Landrace × Large White) et leur croisement F1. Ces auteurs ont rapporté la présence d'effets d'hétérosis de 5,1, 16,6, 10,9, 8,4, 14,6 et 3,6% pour l'excrétion respectivement de l'azote, du phosphore, du zinc, de fer, du cuivre et du potassium. Ils ont même observé un effet de surdominance pour le calcium, les animaux F1 excrétant 14% de plus que la lignée paternelle. Lorsque l'excrétion est rapportée à la consommation alimentaire, ces effets d'hétérosis disparaissent pour l'azote et le fer, et persistent à des niveaux plus faibles pour les autres éléments (de 2,7% pour le potassium à 12,5% pour le phosphore). La

surdominance observée pour le calcium est en revanche encore plus élevée, les animaux F1 excrétant 27% de plus que la lignée paternelle.

Conclusion

La problématique posée par les rejets animaux va devenir de plus en plus crucial dans les années à venir, car l'augmentation considérable de la population mondiale va aboutir à une demande croissante en protéines animales. Il sera donc particulièrement important de disposer d'animaux plus efficaces produisant une quantité moindre d'effluents dont la composition soit compatible avec les normes d'épandage. Les solutions proposées à l'heure actuelle reposent sur l'alimentation, les conditions de logement, le traitement des rejets et l'amélioration génétique. Les différentes stratégies alimentaires permettent globalement d'espérer une réduction des rejets de 10 à 20% pour l'azote, de 20 à 40% pour le phosphore. L'amélioration des conditions de logement a pour principale conséquence une réduction des émissions d'ammoniac, de 5 à 60% selon les méthodes employées. Le traitement des rejets permet également de résorber une part considérable de l'azote excrétré (50% pour le compostage, 70% pour la nitrification-dénitrification). Enfin, la sélection d'animaux à croissance rapide, ayant une meilleure capacité de digestion, une meilleure efficacité alimentaire ou avec un engrangement réduit ont abouti à des réductions de rejets de 10 à 50% pour l'azote et le phosphore (jusqu'à 75% dans le cas des porcs transgéniques). Certaines de ces solutions sont déjà utilisées en élevage, notamment les stratégies nutritionnelles, de logement

et de traitement des rejets, ainsi que la sélection d'animaux maigres et efficaces. Néanmoins, plusieurs pistes permettent d'envisager des progrès supplémentaires, comme la sélection directe sur l'aptitude à digérer des aliments moins riches tout en maintenant un fort potentiel de croissance, qui sera un défi à relever pour limiter la compétition entre l'Homme et l'animal pour l'accès aux céréales et oléagineux. Sélectionner directement sur les caractéristiques des rejets permettra de travailler directement sur le rapport azote/phosphore, qui n'est pas pris en compte suffisamment dans les techniques actuelles de réduction des rejets, essentiellement focalisées sur la résorption de l'azote. La sélection génomique permet également d'envisager une sélection plus facile sur des caractères peu étudiés en raison de la lourdeur de leur mesure, car elle autorise la sélection des animaux sur leur seule information génomique. D'autre part, un atout supplémentaire de la sélection génomique sera de permettre l'évaluation des reproducteurs des lignées pures à partir des données de leurs descendants croisés, ce qui est particulièrement pertinent pour le porc et les volailles.

La stratégie la plus appropriée sera vraisemblablement une combinaison de solutions non génétiques consistant à améliorer l'alimentation et les conditions d'élevage, mais aussi des solutions génétiques, qu'elles soient indirectes via l'amélioration de l'efficacité digestive et métabolique des animaux ou directes via une sélection des animaux sur les caractéristiques de leurs rejets. Enfin, l'utilisation des analyses de cycle de vie améliorera l'évaluation de l'impact des stratégies retenues, en élargissant l'échelle d'évaluation au-delà de l'animal ou de l'exploitation.

Références

- Agreste, 2005. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dechet2005.pdf>
- Agreste, 2008. Statistiques sur l'aviculture, www.agreste.agriculture.gouv.fr.
- Alexander L.S., Qu A., Cutler S.A., Mahajan A., Lonergan S.M., Rothschild M.F., Weber T.E., Kerr B.J., Stahl C.H., 2008. Response to dietary phosphorus deficiency is affected by genetic background in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 86, 2585-2595.
- Archer G.S., Friend T.H., Piedrahita J., Nevill C.H., Walker S., 2003. Behavioral variation among cloned pigs. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 81, 321-331.
- Barea R., Dubois S., Gilbert H., Sellier P., van Milgen J., Noblet J., 2010. Energy utilization in pigs selected for high and low residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 88, 2052-2072.
- Bizeray D., Leterrier C., Constantin P., Picard M., Faure J.M., 2000. Early locomotor behaviour in genetic stocks of chickens with different growth rates. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 68, 231-242.
- Bordas A., Mérat P., 1984. Correlated responses in a selection experiment on residual feed-intake of adult Rhode-Island Red cocks and hens. *Ann. Agric. Fenniae*, 23, 233-237.
- Bordas A., Minvielle F., 1997. Réponse à la chaleur de poules pondeuses issues de lignées sélectionnées pour une faible (R-) ou forte (R+) consommation résiduelle. *Genet. Sel. Evol.*, 29, 279-290.
- Bouvarel I., Travel A., Lescoat P., Lessire M., Perrot P., Bastianelli D., Hervouet C., Marichal V., Chevalier D., 2006. Approche multiple des relations nutrition-rejets chez la volaille. Rapport OFIVAL-ADAR, 54p.
- Buyse J., Leenstra F.R., Zeman M., Rahimi G., Decuyper E., 1999. A comparative study of different selection strategies to breed leaner meat-type poultry. *Poult. Avian Biol. Rev.*, 10, 121-142.
- Carré B., 2008. Les rejets en productions animales : contextes, origines des variations, réductions par sélection génétique. Séminaire «Rejets» du projet COSADD, 26-27 mai 2008, Paris, France.
- Carré B., Mignon-Grasteau S., Juin H., 2008. Breeding for feed efficiency and adaptation to food. *World Poult. Sci. J.*, 64, 377-390.
- CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote - phosphore - potassium - cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produite. Rapport du groupe Porc, CORPEN, 41p.

- CORPEN, 2006a. Estimation des rejets d'azote, de phosphore, de potassium, de calcium, de cuivre et de zinc par les élevages avicoles, 55p.
- CORPEN, 2006b. Les émissions d'ammoniac et de gaz azotés à effet de serre en agriculture, 97p.
- Crocker A.W., Robinson O.W., 2002. Genetic and nutritional effects on swine excreta. *J. Anim. Sci.*, 80, 2809-2816.
- Deeb N., Cahaner A., 2002. Genotype-by-environment interaction with broiler genotypes differing in growth rate. 3. Growth rate and water consumption of broiler progeny from weight-selected versus nonselected parents under normal and high ambient temperatures. *Poult. Sci.*, 81, 293-301.
- Directive du Conseil n° 91/676/CEE du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles. JOCE, L 375, 31 décembre 1991.
- Djaout F., Le Goffe P., Tauber M., 2008. Comment appliquer la directive nitrates et à quel coût ? Une modélisation spatiale du marché de l'épandage. Working Paper SMART - LEREKO 08-02, 40p.
- Dourmad J.Y., Jondreville C., 2008. Improvement of balance of trace elements in pig farming systems. In: Trace elements in animal production systems. Schlegel P., Durosoy S., Jongbloed A. (Eds). Wageningen Academic Publishers, 139-142.
- Dourmad J.Y., Guingand N., Latimier P., Sève B., 1999. Nitrogen and phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 199-211.
- Dourmad J.Y., Rigolot C., Jondreville C., 2009. Influence de la nutrition sur l'excrétion d'azote, de phosphore, de cuivre et de zinc des porcs, et sur les émissions d'ammoniac, de gaz à effet de serre et d'odeurs. *INRA Prod. Anim.*, 22, 41-48.
- Dunshea F.R., King R.H., Campbell R.G., Sainz R.D., Kim Y.S., 1993. Interrelationships between sex and ractopamine on protein and lipid deposition in rapidly growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 71, 2919-2930.
- Duthie C., Simm G., Doeschl-Wilson A., Kalm E., Knap P.W., Roehe R., 2008. Quantitative trait loci for chemical body composition traits in pigs and their positional associations with body tissues, growth and feed intake. *Anim. Genet.*, 39, 130-140.
- FAO, 2006. Livestock's Long shadow: environmental issues and options. LEAD, FAO (Eds), 390p.
- Gabarrou J.F., Geraert P.A., François N., Guillaumin S., Picard M., Bordas A., 1996. Energy balance of laying hens selected for residual food consumption. *Brit. Poult. Sci.*, 39, 79-89.
- Gallot, S., 2007. Stagnation des résultats technico-économiques et du coût de production du poulet standard et de la dinde moyen depuis la fin des années 90. *Journ. Rech. Avicole*, 28-29 mars 2007, Tours, France, 22-26.
- Geraert P.A., Guillaumin S., Zuprizal, 1992. Effect of high ambient-temperature on dietary metabolizable energy values in genetically lean and fat chickens. *Poult. Sci.*, 71, 2113-2116.
- Gilbert H., Bidanel J.P., Gruand J., Caritez J.C., Billon Y., Guillouet P., Lagant H., Noblet J., Sellier P., 2007. Genetic parameters for residual feed intake in growing pigs, with emphasis on genetic relationships with carcass and meat quality traits. *J. Anim. Sci.*, 85, 3182-3188.
- Gilbert H., Al Aïn S., Bidanel J.P., Lagant H., Billon Y., Guillouet P., Noblet J., Sellier P., 2009. Sélection divergente sur la consommation alimentaire résiduelle du porc en croissance : effets corrélatifs sur le comportement alimentaire. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, 2-4 février 2009, Paris, France, 31-32.
- Gilbert H., Riquet J., Gruand J., Billon Y., Fève K., Sellier P., Noblet J., Bidanel J.P., 2010. Detecting QTL for feed intake traits and other performance traits in growing pigs in a Piétrain-Large White backcross. *Animal*, 4, 1308-1318.
- Golovan S.P., Meidinger R.P., Ajakaiye A., Cottrill M., Wiederkehr M.Z., Barney D.J., Plante C., Pollard J.W., Fan M.Z., Hayes M.A., Laursen J., Hjorth J.P., Hacker R.R., Phillips J.R., Forsberg C.W., 2001. Pigs expressing salivary phytase produce low-phosphorus manure. *Nature Biotech.*, 19, 741-745.
- Guenther G.G., Hylle L.M., Sthal C.H., Koutsos E.A., Peterson D.G., 2006. Developments of methods for the production of transgenic quail expressing *E. Coli* phytase gene. *Transgenic Res.*, 15, 116.
- Guingand N., Dolle J.B., Aubert C., 2010. Guide des bonnes pratiques d'élevage. Rapport du RMT «Elevages et environnement», IFIP (Ed), 303p.
- Hansen C., Yi N.J., Zhang Y.M., Xu S.Z., Gavora J., Cheng H.H., 2005. Identification of QTL for production traits in chickens. *Anim. Biotechnol.*, 16, 67-79.
- Havenstein G.B., Ferket P.R., Qureshi M.A., 2003. Growth, livability, and feed conversion of 1957 versus 2001 broilers when fed representative 1957 and 2001 broiler diets. *Poult. Sci.*, 82, 1500-1508.
- Heuser G.F., Norris L.C., McGinnis J., Scott M.L., 1943. Further evidence of the need for supplementing soybean meal chick rations with phosphorus. *Poult. Sci.*, 22, 269-270.
- InraPorc® <http://www.rennes.inra.fr/inraporc/>
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Jondreville C., Revy P.S., Jaffrezic F., Dourmad J.Y., 2002. Le cuivre dans l'alimentation du porc : oligo-élément essentiel, facteur de croissance et risque potentiel pour l'homme et l'environnement. *INRA Prod. Anim.*, 15, 247-265.
- Jondreville C., Revy P.S., Dourmad J.Y., 2003. Dietary means to better control the environmental impact of copper and zinc by pigs from weaning to slaughter. *Livest. Prod. Sci.*, 84, 147-156.
- Kerenzvi S., Nitsan Z., Nir I., Cahaner A., Zoref Z., 1992. Effect of different dietary levels of protein on fat deposition in broilers divergently selected for high or low abdominal adipose-tissue. *Brit. Poult. Sci.*, 33, 517-524.
- Labroue F., Guéblez R., Sellier P., 1997. Genetic parameters of feeding behaviour and performance traits in group-housed Large White and French Landrace growing pigs. *Genet. Sel. Evol.*, 29, 451-468.
- Labroue F., Guéblez R., Meunier-Salaün M.C., Sellier P., 1999. Feed intake behaviour of group-housed Piétrain and Large White growing pigs. *Ann. Zootech.*, 48, 247-261.
- Leclercq B., 1996. Les rejets azotés issus de l'aviculture : importance et progrès envisageables. *INRA Prod. Anim.*, 9, 91-101.
- Le Douarin P., 2008. Le manque de surface peut freiner toute la filière chair. *Réussir Aviculture*, 139, 2p.
- Lescoat P., Travel A., Nys Y., 2005. Lois de réponse des volailles de chair à l'apport de phosphore. *INRA Prod. Anim.*, 18, 193-201.
- Levasseur P., Aubert C., 2006. Contexte, atouts et faiblesses des effluents porcins et avicoles destinés à être exportés. *TechniPorc*, 29, 3-11.
- Lopez-Ridaura S., van der Werf H., Paillat J.M., Le Bris B., 2007. Transférer ou traiter ? Evaluation environnementale de deux modes de gestion du lisier excédentaire par analyse de cycle de vie. *Journ. Rech. Porcine Fr.*, Paris, France, 39, 7-12.
- Mao J., Ajakaiye A., Lan Y., Olk D.C., Ceballos M., Zhang T., Fan M.Z., Forsberg C.W., 2007. Chemical structures of manure from conventional and phytase transgenic pigs investigated by advanced solid-NMR spectroscopy. *J. Agric. Food Chem.*, 56, 2131-2138.
- Meschy F., Jondreville C., Dourmad J.Y., Nys Y., 2008. Maîtrise des rejets de phosphore dans les effluents d'élevage. *INRA Prod. Anim.*, 21, 79-86.
- Mignon-Grasteau S., Muley N., Bastianelli D., Gomez J., Péron A., Sellier N., Millet N., Besnard J., Hallouin J.M., Carré B., 2004. Heritability of digestibilities and divergent selection for digestion ability in growing chicks fed a wheat diet. *Poult. Sci.*, 83, 860-867.
- Mignon-Grasteau S., N'Dri A.L., Sellier N., Tixier-Boichard M., Beaumont C., 2006. Genotype by environment interaction in slow growing chickens. 8th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Belo Horizonte, 13-18 août, 4p.
- Mignon-Grasteau S., Carré B., Gilbert H., Noblet J., 2009. Génétique et utilisation de l'aliment chez le poulet et le porc : conséquences sur les rejets dans l'environnement. Séminaire final du projet COSADD, Paris, 24 novembre 2010, 4p.
- Mignon-Grasteau S., Juin H., Sellier N., Bastianelli D., Gomez J., Carré B., 2010a. Genetic parameters of wheat- or corn-based diets in chickens. 9th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Leipzig, 1-6 août, 4p.
- Mignon-Grasteau S., Lafeuille O., Dourmad J.Y., Bastianelli D., Arnould C., Phocas F., Carré B., 2010b. Consequences of selection for digestibility on feeding activity and excretion. 13th European Poultry Conference, Tours, France, 4p.
- Morel P.C.H., Wood G.R., 2005. Optimisation of nutrient use to maximize profitability and minimise nitrogen excretion in pig meat production systems. *Acta Hort.*, 674, 269-275.
- Narcy A., Jondreville C., Letourneau-Montminy M.P., Magnin M., Nys Y., 2009. Voies nutritionnelles d'économie de phosphore chez le poulet. *Journ. Rech. Avicole*, Saint-Malo, France, 115-123.

- Noblet J., Karege C., Dubois S., 1991. Influence of growth potential on energy requirements for maintenance in growing pigs. In: Energy Metabolism of Farm Animals. Wenk C., Boessinger M. (Eds). ETH, Zurich, Switzerland. EAAP Publ., 58, 107-110.
- Noblet J., van Milgen J., Carré B., Dimon P., Dubois S., Rademacher M., van Cauwenbergh S., 2003. Effect of body weight and dietary crude protein on energy utilisation in growing pigs and broilers. In: Progress in Research on Energy and Protein Metabolism. Souffrant W.B., Metges C.C. (Eds). 109, 205-208
- Nys Y., 2001. Oligo-éléments, croissance et santé du poulet de chair. INRA Prod. Anim., 14, 171-180.
- Ojano-Dirain C., Toyomizu M., Wing T., Cooper M., Bottje W.G., 2007. Gene expression in breast muscle and duodenum from low and high feed efficient broilers. Poult. Sci., 86, 372-381.
- Paillat J.M., Lopez-Ridaura S., Guerrin F., van der Werf H., Morvan T., Leterme P., 2009. Simulation de la faisabilité d'un plan d'épandage de lisier de porc et conséquences sur les émissions gazeuses au stockage et à l'épandage. Journ. Rech. Porcine Fr., 41, 271-276.
- Portejoie S., Dourmad J.Y., Martinez J., Lebreton Y., 2004. Effect of lowering dietary crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs. Livest. Prod. Sci., 91, 45-55.
- Puybasset A., 2008. Faire face aux nouvelles règles sur le phosphore. Réussir Aviculture, 139, 41-42.
- Pym R.A.E., 1990. Nutritional genetics. In: Poultry Breeding and Genetics. Crawford R.D. (Ed). Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, 847-876.
- Quideau P., 2010. Les effluents d'élevage, les coproduits de traitement et leurs incidences environnementales. In : Elevages et environnement. Espagnol S., Leterme P. (Eds). Quae-Educagri, Versailles, France, 119-185.
- Revy P.S., Jondreville C., Dourmad J.Y., Nys Y., 2003. Zinc in pig nutrition: the essential trace element and potential adverse effect on environment. INRA Prod. Anim., 16, 3-18.
- Ritz C.W., Fairchild B.D., Lacy M.P., 2004. Implications of ammonia production and emissions from commercial poultry facilities: a review. J. Appl. Poult. Res., 13, 684-692.
- Rotshchild M.F., Hu Z.L., Jiang Z., 2007. Advances in QTL mapping in pigs. Int. J. Biol. Sci., 3, 192-196.
- Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. 2^{ème} Edition revue et corrigée. Sauvant D., Perez J.M., Tran G. (Eds), INRA Editions, Paris, France, 301p.
- Sauveur B., 1989. Phosphore phytique et phytase dans l'alimentation des volailles. INRA Prod. Anim., 2, 343-351.
- Schnyder U., Hofer A., Labroue F., Künzi N., 2002. Multiple trait model combining random regressions for daily feed intake with single measured performance traits of growing pigs. Genet. Sel. Evol., 34, 61-81.
- Schulze V., Roehe R., Lorenzo Bermejo J., Looft H., Kalm E., 2002. Genetic associations between observed feed intake measurements during growth, feed intake curve parameters and growing-finishing performances of central tested boars. Livest. Prod. Sci., 73, 199-211.
- Sharma P., Bottje W., Okimoto R., 2008. Polymorphisms in uncoupling protein, melanocortin 3 receptor, melanocortin 4 receptor, and pro-opiomelanocortin genes and association with production traits in a commercial broiler line. Poult. Sci., 87, 2073-2086.
- Sherman E.L., Nkrumah J.D., Murdoch B.M., Moore S.S., 2008. Identification of polymorphisms influencing feed intake and efficiency in beef cattle. Anim. Genet., 39, 225-231.
- Skiba F., Callu P., Castaing J., Paboeuf F., Chauvel J., Jondreville C., 2004. Variabilité intra-matière première de la digestibilité du phosphore des céréales et des pois chez le porc en croissance. Journ. Rech. Porcine Fr., 36, 9-16.
- Strobel E., Franke E., Männer K., 2004. Energy exchange in white laying hens with differences in residual food consumption. Arch. Geflügelk., 68, 62-70.
- Tixier-Boichard M., Boichard D., Groeneveld E., Bordas A., 1995. Restricted maximum likelihood estimates of genetic parameters of adult male and female Rhode Island Red chickens divergently selected for residual feed consumption. Poult. Sci., 74, 1245-1252.
- Tran G., Skiba F., 2005. Variabilité inter et intra-matière première de la teneur en phosphore total et phytique et de l'activité phytasique. INRA Prod. Anim., 18, 159-168.
- Travel A., Bouvarel I., Aubert C., Chagneau A.-M., Hallouis J.M., Juin H., Relandau C., Buttin P., Broz J., Lessire M., 2005. Réduction des rejets en azote et phosphore par voie alimentaire chez le dindon en finition à performances constantes. Journ. Rech. Avicole, 345-349.
- Tribout T., Caritez J.C., Gogué J., Gruand J., Bouffaoud M., Billon Y., Péry C., Griffon H., Brenot S., Le Tiran M.H., Bussières F., Le Roy P., Bidanel J.P., 2004. Estimation, par utilisa-
- tion de semence congelée, du progrès génétique réalisé en France entre 1977 et 1998 dans la race porcine Large White : résultats pour quelques caractères de production et de qualité des tissus gras et maigres. Journ. Rech. Porcine Fr., 36, 275-282.
- Van Cauwenbergh S., Burnham D., 2001. New developments in amino acid and protein nutrition of poultry as related to optimal performance and reduced nitrogen excretion. 13th Eur. Symp. Poultry Nutrition, 30 septembre-4 octobre, Blankenberge, Belgique, 141-149.
- Verdal H. de, Narcy A., Le Bihan-Duval E., Mignon-Grasteau S., 2010a. Excretion and gastro-intestinal development in chickens divergently selected on their capacity to digest wheat. In: 13th European Poultry Conference, 23-27 août 2010, Tours, France, 4p.
- Verdal H. de, Narcy A., Le Bihan-Duval E., Chapuis H., Bastianelli D., Même N., Mignon-Grasteau S., 2010b. Selection for excretion traits in chicken. 9th World Congr. Genet. Applied to Livestock Production, 1-6 août 2010, Leipzig, 4p.
- Verschoor C., Wlaters S., Forsberg C.W., Phillips J.P., Golovan S.P., 2006. Differential expression of proteins in the parotid gland of the Enviropig™. Transgenic Res., 15, 128.
- Williams P.E.V., 1995. Animal production and European pollution problems. Anim. Feed Technol., 53, 135-144.
- Wiseman J., Al-Marzooqi W., Hedley C., Wang T.L., Welham T., Domoney C., 2006. The effects of genetic variation at r, rb and Tri loci in *Pisum sativum* L. on apparent ileal digestibility of amino acids in young broilers. J. Sci. Food Agric., 86, 436-444.
- Yang X.M., Drury C.F., Zhang T.Q., Ajakaiye A., Forsberg C.W., Fan M.Z., Philip J.P., 2008. Short-term carbon dioxide emissions and denitrification losses from soils amended with low-P manure from genetically modified pigs. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 80, 153-160.
- Zhang W., Aggrey S.E., Pesti G.M., Edwards H.M., Bakall R.I., 2003. Genetics of phytate phosphorus bioavailability: Heritability and genetic correlations with growth and feed utilization traits in a randombred chicken population. Poult. Sci., 82, 1075-1079.
- Zhang W., Aggrey S.E., Pesti G.M., Bakall R.I., Edwards H.M., 2005a. Genetic analysis on the direct response to divergent selection for phytate phosphorus bioavailability in a randombred chicken population. Poult. Sci., 84, 370-375.
- Zhang Y.M., Xu S.Z., Gavora J., Cheng H.H., 2005b. Identification of QTL for production traits in chickens. Anim. Biotechnol., 16, 67-79.

Résumé

Du fait de leur forte concentration dans certaines zones en France, les productions avicoles et porcines sont associées à de nombreux problèmes environnementaux dus à l'épandage de leurs rejets. Outre la quantité brute de rejets, leur composition, notamment en azote, phosphore et oligoéléments, est une source de pollution des eaux et des sols. Jusqu'ici, les solutions envisagées pour réduire ces rejets portaient soit sur le traitement *a posteriori* des rejets, soit sur la réduction des rejets en amont, essentiellement en modifiant les régimes alimentaires des animaux. La sélection d'animaux produisant moins de rejets n'était en revanche envisagée que comme un sous-produit de l'amélioration de l'efficacité alimentaire de l'animal. Le but de cette synthèse est donc de faire un tour d'horizon des différentes voies d'amélioration génétique permettant de réduire quantitativement les rejets ou d'améliorer leur composition pour produire un fertilisant organique écologique. La sélection indirecte de caractères liés à l'efficacité de la digestion ou au métabolisme de l'animal est abordée dans un premier temps. Dans un deuxième temps, nous présentons les premiers résultats montrant qu'il est possible de sélectionner directement sur la composition des rejets.

Abstract

Reducing manure in poultry and pig productions by selection

Since they are highly concentrated in some areas in France, poultry and pig production are associated to numerous environmental problems, as a consequence of their manure spreading. Beyond the raw quantity of manure, manure composition, especially in nitrogen, phosphorus, and oligo-elements, is a major source of water and soil pollution. Until now, solutions used to reduce manure quantities were either a posteriori treatments of excreta or reducing waste via modifications of the animals' diets. Selecting for animals naturally producing fewer excreta was on the contrary not considered, except as a sub-product of selection for an improved efficiency of animals. The aim of this review was thus to give some new insight into alternative ways to reduce manure quantities or to improve their quality by genetic selection. In a first step, indirect selection of traits linked to digestion efficiency or metabolism is planned. In a second step, we present results showing that it is possible to directly select on manure characteristics.

MIGNON-GRASSTEAU S., BOURBLANC M., CARRÉ B., DOURMAD J.-Y., GILBERT H., JUIN H., NOBLET J., PHOCAS F., 2010. La réduction des rejets avicoles et porcins par la sélection. Inra Prod. Anim., 23, 415-426.

