



**HAL**  
open science

## Intégrer les changements d'échelle pour améliorer l'efficacité des productions animales et réduire les rejets

Philippe Faverdin, Jaap J. van Milgen

### ► To cite this version:

Philippe Faverdin, Jaap J. van Milgen. Intégrer les changements d'échelle pour améliorer l'efficacité des productions animales et réduire les rejets. *INRA Productions Animales*, 2019, 30 (2), pp.305-322. 10.20870/productions-animales.2019.32.2.2499 . hal-02410526

**HAL Id: hal-02410526**

**<https://hal.science/hal-02410526>**

Submitted on 13 Dec 2019

**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

# Intégrer les changements d'échelle pour améliorer l'efficacité des productions animales et réduire les rejets

Philippe FAVERDIN, Jaap VAN MILGEN  
PEGASE, INRA, Agrocampus Ouest, 35590, Saint-Gilles, France  
Courriel : [philippe.faverdin@inra.fr](mailto:philippe.faverdin@inra.fr)

■ Rechercher des animaux et des conduites permettant de produire en consommant moins de ressources alimentaires est une voie prometteuse pour répondre aux défis de l'élevage. Quels sont les gains possibles que l'on peut attendre de systèmes d'élevage plus efficaces ? Peut-on améliorer l'efficacité pour tous les défis simultanément ou existe-t-il des dilemmes ? Cette revue discute les avancées dans ce domaine en insistant sur l'importance d'étudier le changement d'échelle dans les solutions proposées pour garantir les bénéfices espérés.

## Introduction : L'élevage en perte de légitimité

Aujourd'hui, le contexte de l'élevage a beaucoup évolué et il vit une tension de plus en plus grande entre, d'une part, le citoyen qui y voit souvent de la souffrance animale, des émissions polluantes, une forte emprise sur les terres arables et une concurrence pour l'alimentation humaine et, d'autre part, le consommateur qui reste très demandeur des produits animaux pour améliorer son alimentation. L'élevage est passé historiquement d'une position d'auxiliaire des systèmes de culture et de transformateur de ressources non consommables à une position de premier consommateur des produits des systèmes de culture. Les engrais, la motorisation et la spécialisation des systèmes ont été des moteurs de cette évolution. La question de la durabilité de l'élevage n'est donc pas tant d'assurer la pérennité des systèmes d'élevage tels qu'ils sont aujourd'hui, que de voir comment l'élevage peut contribuer au développement durable dans le

contexte d'une population de 9 milliards d'êtres humains sur une planète dont la finitude des ressources devient palpable.

L'enjeu est donc de résoudre la tension importante dans ce contexte entre produire plus et produire mieux, avec moins de nuisances. La publication du rapport FAO « *Livestock's Long Shadow* » (FAO, 2006) a mis en évidence l'impact de l'élevage sur l'environnement. La mesure de l'importance du changement climatique et du rôle potentiel de l'élevage dans les émissions de gaz à effet de serre a fait émerger un problème environnemental nouveau et global, faisant suite aux impacts plus locaux ou territoriaux déjà connus de l'eutrophisation, de l'acidification et de la biodiversité. Cet impact est encore plus fort pour les ruminants en raison des fermentations entériques et des émissions de méthane, puissant gaz à effet de serre (GES), qu'elles génèrent. Le poids de l'élevage sur l'occupation des sols apparaît également très important, mais ces analyses ne pondèrent pas les sols suivant leur potentiel agronomique, ne distinguant

souvent même pas les terres arables des autres. L'étude Agrimonde (rapport INRA-CIRAD, 2009) et le livre de Daniel Nahon (2012) insistent sur la finitude des terres labourables et les limites d'expansion des surfaces cultivées compte tenu de la dégradation actuelle des sols cultivés. Réduire l'emprise de l'élevage sur les terres labourables est donc un enjeu majeur, mais leur rôle dans la conservation de ces sols, de leur matière organique et de leur biodiversité est essentiel.

L'amélioration de l'efficacité des productions animales est une piste intéressante à la fois pour diminuer l'utilisation des ressources en compétition en particulier avec l'alimentation humaine et réduire les impacts sur l'environnement. À ce titre elle a été et est encore largement explorée ces dernières années, notamment à l'échelle animale dans de grands projets nationaux (« *Beefefficiency* » aux USA, Deffilait et Beefalim en France) ou internationaux (projets européens « *Feed-a-Gen* » et « *GenTore* »). Cependant il convient de resituer les gains d'efficacité possibles

à des échelles plus agrégées pour en évaluer la performance. Cette revue discutera dans un premier temps la difficulté de la notion même d'efficacité et de son évaluation. Les pistes d'amélioration de l'efficacité alimentaire dans le domaine de la production de viande et de lait seront ensuite évoquées pour évaluer les marges de progrès et les limites de ces approches. Les pistes pour essayer de réduire les rejets à risque vers l'environnement seront ensuite abordées. Enfin, la dernière partie se proposera d'étudier dans quelle mesure il est possible ou non de retrouver lorsque l'on change d'échelle vers des niveaux plus globaux les effets bénéfiques des stratégies proposées à des échelles animal-troupeau pour améliorer l'efficacité alimentaire et réduire les impacts sur l'environnement.

## 1. L'efficacité : de quoi parle-t-on ?

### ■ 1.1. Définition

L'efficacité est définie généralement comme un ratio entre produits et ressources. Un processus est d'autant plus efficace qu'il est capable de produire plus à partir des mêmes ressources ou

de produire autant en réduisant les ressources utilisées. Cependant, on peut définir de très nombreuses efficacités suivant les produits et ressources (ou impacts) que l'on considère et les unités que l'on utilise (matière sèche, énergie, protéines, euros...). La notion d'efficacité ne prend donc pleinement son sens que dans un cadre plus large d'analyse systémique. Dans leur analyse du problème du système alimentaire mondial, Rastoin et Gherzi (2010) rappellent la pertinence du modèle du triangle de la performance de Gilbert (figure 1) qui place l'efficacité comme un des éléments clés, mais pas unique, de l'amélioration de la performance. Celle-ci doit se raisonner en regard de la pertinence des moyens utilisés et de l'efficacité obtenue.

La pertinence consiste à mettre en adéquation les objectifs avec les ressources et moyens disponibles. L'efficacité permet d'utiliser avec le meilleur rendement les ressources disponibles pour une activité en fonction de cette pertinence. Enfin l'efficacité permet de mesurer l'écart entre les résultats et les objectifs recherchés. Ce triangle, souvent considéré sous un angle purement économique, s'adapte bien à la question du système alimentaire et de la place

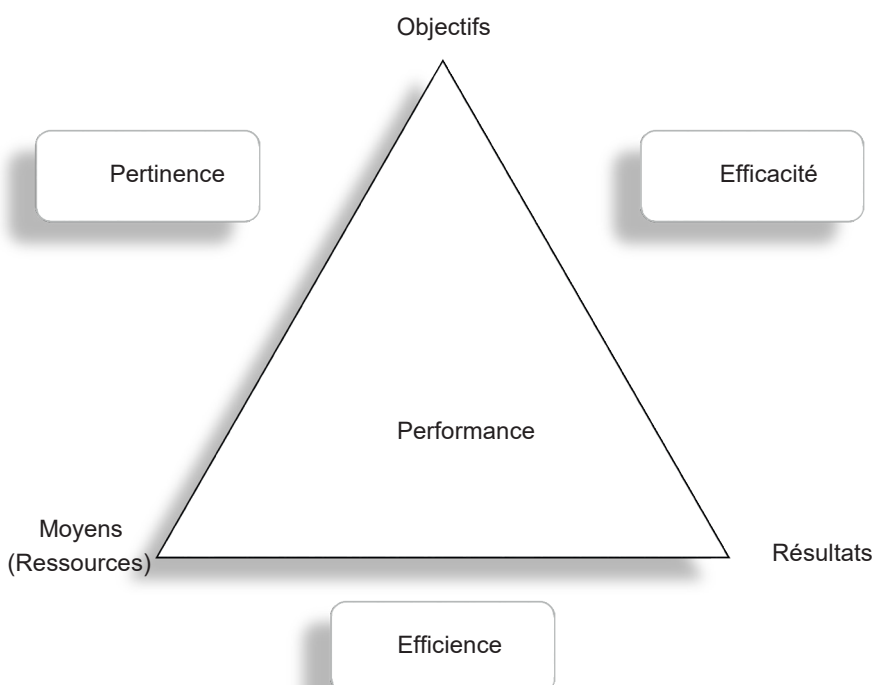
de l'élevage. C'est donc bien ces trois dimensions construites de façon cohérente qui doivent structurer demain la réflexion sur le positionnement de l'élevage et les systèmes d'élevage dans le défi de l'agroécologie face au système alimentaire mondial.

### ■ 1.2. Pertinence : Raisonner la place de l'élevage dans la valorisation des ressources

L'élevage a tendance à valoriser de plus en plus de ressources utilisables par l'Homme au nom d'une meilleure efficacité alors qu'il devrait d'abord servir à valoriser les ressources que l'Homme utilise peu ou pas à des fins alimentaires. Dans ce domaine, la première place revient clairement aux ruminants qui restent les seuls animaux à valoriser à des fins alimentaires des quantités importantes de biomasses cellulosiques que l'Homme ne sait pas valoriser autrement que pour la transformation énergétique. Cependant les monogastriques peuvent également valoriser de nombreuses ressources alimentaires non consommées par l'Homme. Dans l'alimentation humaine, la biomasse végétale concerne essentiellement les fruits (grains et graines, gousses, fruits), les racines et les tubercules des végétaux cultivés. Même ces produits destinés à la consommation humaine génèrent une part importante de coproduits, de sous-produits et de déchets non consommés par l'Homme. Les autres produits de la biomasse végétale, riches en cellulose, sont peu utilisés directement, mais représentent l'essentiel de la biomasse produite par la photosynthèse (FranceAgriMer, 2012).

Historiquement, les ruminants, tout en produisant de la viande, du travail et du lait, valorisent quant à eux les ressources cellulosiques, le cas échéant prélevées sur le « *saltus* » dans le cas du pastoralisme, et permettent de recycler la matière organique et transférer les éléments fertilisants vers les sols cultivés de l'« *ager* » afin d'accroître les rendements des cultures. Les monogastriques avaient un rôle essentiel dans la valorisation des déchets de l'alimentation humaine et de ressources naturelles peu exploitées par l'Homme

Figure 1. Le triangle de la performance (Rastoin et Gherzi, 2010).



comme les insectes ou les annélides. Si l'agriculture familiale était particulièrement à même d'utiliser ruminants, porcs et volailles pour jouer ce rôle dans le fonctionnement de l'agroécosystème, les systèmes d'élevages industriels ont considérablement réduit cette dimension, utilisant beaucoup plus de ressources alimentaires valorisables aussi par l'Homme. Il faut cependant nuancer ce propos car de nombreuses productions animales peuvent produire presque autant de protéines consommables qu'elles n'en consomment (Laisse *et al.*, 2018). Il convient donc de transposer ce principe de valorisation de bio-ressources peu ou pas consommées par l'Homme dans nos modes de production modernes en créant des circuits d'échanges de ressources, de diversification des assolements et d'organisation de l'occupation des territoires qui profitent des plus-values de l'élevage tout en préservant les cultures de rente pour l'Homme.

Pour raisonner la pertinence, il faut privilégier l'approche globale des impacts et de l'utilisation des ressources dans les territoires pour les objectifs de production souhaités (ou souhaitables) avant de concevoir les systèmes de productions et leur évaluation. De même, la capacité de résilience face aux impacts d'utilisation des ressources doit être prise en compte. La spécialisation des systèmes de production a conduit à optimiser chaque système spécialisé indépendamment de son environnement. Mais cette approche néglige la dimension systémique en considérant implicitement que la meilleure performance résulterait obligatoirement de la somme des systèmes unitaires les plus performants. Cette vision totalement agrégative était particulièrement adaptée à une recherche disciplinaire. Ce postulat a conduit à améliorer chacun des processus sans se préoccuper des conséquences sur les autres. S'il est peut-être pertinent dans un espace sans contraintes et avec peu d'interactions, il est clair que ce n'est pas le cas aujourd'hui. Pour la production bovine, il est difficile de conserver à une échelle globale les bénéfices techniques et environnementaux en partant des processus élémentaires à cause des interactions entre les entités du système global (Faverdin et Peyraud, 2010). Ce verrou rend peu

crédible une approche uniquement analytique du perfectionnement des processus pour améliorer l'efficacité des productions animales. L'évaluation multicritère est intéressante, mais elle montre ses limites à l'échelle du système de production sans une approche globale préalable, car elle prend difficilement en compte la dimension de l'allocation optimale de ressources ou de capacités productives d'un territoire. Les ressources en eau, l'utilisation des terres en fonction de leur potentiel et de leurs facteurs de risques, les charges maximales acceptables de polluants, les seuils minimaux de structures favorisant la biodiversité sont autant de contraintes qui ne peuvent s'envisager qu'à des échelles agrégées (territoriales, nationales, mondiales). Un système de production agricole peut ne pas apparaître inefficace analysé seul, mais peut trouver une place clé dans un territoire pour atteindre certains objectifs environnementaux, paysager ou de biodiversité. L'approche par bouquet de services (Ryschawy *et al.*, 2017) est sans doute une approche à privilégier pour passer du système de production au territoire et raisonner des allocations de ressources.

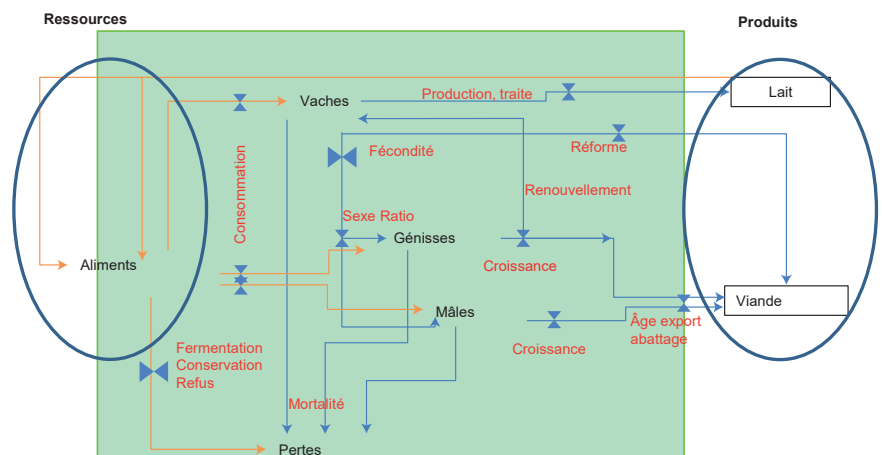
### ■ 1.3. Efficacité : Accroître l'efficacité de l'utilisation des ressources des systèmes d'élevage

Le volet précédent a permis d'assurer, d'une part la pertinence entre ressources et impacts et, d'autre part, de

définir les équilibres de production à atteindre pour une approche durable du territoire. Une fois définies les ressources que l'on peut allouer aux différents systèmes de production au sein des territoires, il devient intéressant d'améliorer l'efficacité de leur utilisation dans ces systèmes.

De nombreux paramètres techniques peuvent être impliqués dans l'efficacité alimentaire d'un système d'élevage. Ils concernent généralement les performances productives des animaux et du troupeau ainsi que les pertes alimentaires et d'animaux (figure 2). Ces paramètres sont souvent intéressants sur le plan économique et environnemental, car l'amélioration d'efficacité est généralement associée à une réduction des coûts et des émissions. Les principaux leviers d'action concernent les choix génétiques, la conduite de l'alimentation, la gestion de la reproduction et de la santé. VandeHaar (2012) a modélisé le fonctionnement d'un système d'élevage laitier pour montrer combien chaque levier de la conduite permettait de gagner sur l'efficacité énergétique et protéique globale du système de production. Les résultats de simulation (tableau 1) montrent que les gains d'efficacité de chaque levier sont modestes, mais qu'ils peuvent se combiner pour améliorer significativement l'efficacité globale du système. L'efficacité de conversion des aliments par les animaux eux-mêmes sera évoquée dans la seconde partie de cette

**Figure 2.** Exemple d'un système d'élevage laitier et des nombreux paramètres techniques (en rouge) qui sont susceptibles d'affecter l'efficacité du système de production.



**Tableau 1.** Impacts des changements de conduite sur les efficacités énergétiques et protéiques d'un système de production de lait aux USA (adapté de VandeHaar, 2012).

Efficiences	Énergétique (%)	Protéique (%)
Efficiences de base	21 <sup>1</sup>	28 <sup>2</sup>
Augmentation de la production de 10 % (950 L/an)	+ 0,7	+ 0,4
Augmentation de la longévité de 3 à 4 lactations	+ 0,6	+ 0,5
Diminution des besoins d'entretien de 10 %	+ 1,1	+ 1,2
Augmentation de l'efficacité digestive de 10 %	+ 1,2	+ 1,0
Réduction de l'âge au 1 <sup>er</sup> vêlage de 2 mois	+ 0,3	+ 0,3
Réduction de l'intervalle vêlage – vêlage de 1 mois	+ 0,4	+ 0,4
Réduction de 2 % de la teneur en protéines après 150 j de lactation	+ 0,0	+ 1,3

<sup>1</sup> Efficience calculée par le rapport entre l'énergie des aliments produits (lait, viande) rapportée à l'énergie brute consommée par les animaux.

<sup>2</sup> Efficience calculée par le rapport entre les protéines des aliments produits (lait, viande) rapportée à aux protéines consommées par les animaux.

revue. On peut aussi remarquer que les leviers de l'efficacité alimentaire ne concernent pas seulement l'alimentation, mais de nombreux éléments de la conduite d'élevage, en particulier la réduction des périodes improductives et des pertes.

Les pertes vont aussi avoir un impact important sur l'efficacité alimentaire. Le premier type de perte concerne les ressources alimentaires. En élevage de porcs, les systèmes de distribution d'aliment ont un impact sur le gaspillage d'aliments. Brumm et Gonyou (2001) considèrent qu'un taux de gaspillage de moins de 6 % est satisfaisant pour des « bons » nourrisseurs. Le poids de l'animal, la taille de groupe (par rapport aux nourrisseurs), la forme de distribution d'aliment (soupe ou sec), la restriction alimentaire ont un effet sur le gaspillage d'aliment. Pour les ruminants, la simple conservation des fourrages sous forme d'ensilage est associée à des pertes importantes, de l'ordre de 20 %, par rapport à la biomasse récoltée (pertes au champ, jus, fermentations, pertes

au silo, pertes à l'auge). L'autre type de « perte » concerne les pertes animales. L'efficacité alimentaire du troupeau porcin ou bovin viande diminue avec l'augmentation du taux de mortalité, mais aussi avec le stade auquel cette mortalité a lieu. Chez le porc, le taux de mortalité *in utero* et avant le sevrage est quantitativement important, mais les conséquences sur l'efficacité alimentaire sont beaucoup plus importantes si un porc meurt juste avant l'abattage. Dourmad *et al.* (2015) ont estimé qu'un porcelet sevré a eu besoin de 41,5 kg d'aliment, consommé par la truie. La mort d'un porc juste avant l'abattage représente une perte d'aliment d'environ 320 kg (y compris l'aliment consommé par la truie). En termes de pertes alimentaires, cette mortalité d'un porc à 115 kg est donc équivalente à une mortalité de presque 8 porcelets entre la naissance et le sevrage. Pour les bovins allaitants, la perte d'un veau est équivalente à la perte de la consommation alimentaire de sa mère pendant une année, soit près de 4 à 5 tonnes d'aliments.

C'est donc bien l'optimisation de l'ensemble du système d'élevage qui permet d'améliorer l'efficacité alimentaire, mais elle passe aussi par l'amélioration de processus plus élémentaires en vérifiant bien que leur performance est conservée dans les changements d'échelle. L'amélioration de l'efficacité des processus de transformation des ressources par les animaux et de réduction de leurs émissions a fait l'objet de développements importants en recherche ces dernières années en jouant à la fois sur la sélection génétique et sur les conduites alimentaires. Ces éléments seront évoqués plus en détails dans les parties 2 et 3 de cet article.

#### ■ 1.4. Efficacité : Développer des indicateurs et des outils adaptés pour évaluer la performance des systèmes par rapport aux objectifs attendus

Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles l'amélioration des processus à un niveau d'organisation donné ne permet pas d'obtenir les objectifs définis au départ (Faverdin et Peyraud, 2010). Piloter des systèmes agricoles sur des principes d'efficacité est bien plus complexe que de les piloter sur la production. Ce changement est encore plus complexe si cette notion d'efficacité n'est pas qu'économique, mais concerne également les ressources (utilisation de ressources par unité de produit) et les impacts (impacts par unité de produit, très utilisés dans les analyses de cycle de vie). Il est donc impératif de vérifier que les résultats obtenus sont bien en accord avec les objectifs recherchés au départ et que l'on a été efficace (figure 1). Des méthodes, des modèles, des indicateurs et des outils sont nécessaires pour aider au pilotage des systèmes de production et mesurer les progrès réalisés au travers des stratégies mises en place.

Les techniques d'évaluation multicritère se sont beaucoup développées et fournissent des approches originales pour étudier l'efficacité des systèmes de productions animales (Lairez *et al.*, 2015). L'étude des systèmes de production, observés ou modélisés, fournit un nombre de données et d'indicateurs

potentiels très conséquent pour évaluer la production, les facteurs de production, les impacts et l'économie. Un trop grand nombre d'indicateurs rend très difficile l'interprétation des performances des systèmes de production. L'analyse de cycle de vie offre une possibilité intéressante d'agréger les différents indicateurs dans de grands indicateurs d'impacts. Mais cette transformation génère encore beaucoup d'indicateurs (voire les multiplie) pour évaluer les systèmes et repérer les conduites les plus intéressantes. Parmi toutes les méthodes d'analyse multicritère, les méthodes d'analyse des frontières d'efficacité sont intéressantes car elles permettent de ne comparer que des systèmes comparables entre eux sur une échelle unique d'efficacité tout en prenant en compte plusieurs entrées et plusieurs sorties dans la même analyse. Cette approche a été réalisée sur les systèmes laitiers français en essayant de construire un indicateur d'éco-efficacité à partir des indicateurs d'analyse de cycle de vie (énergies non renouvelables, surface, émissions de GES, eutrophisation, acidification) et des différentes productions (lait, viande, cultures) (Soteriades *et al.*, 2016a). Certains développements de la méthode d'analyse de frontière permettent aussi de voir comment les différentes dimensions de la performance (productions, impacts, ressources) peuvent être associées positivement ou négativement pour tendre vers le meilleur résultat. Il est intéressant de voir que l'intensification des systèmes à l'animal ou à l'hectare tend à réduire cet indice d'éco-efficacité alors que l'autonomie des systèmes l'améliore (Soteriades *et al.*, 2016b). Couplées à des outils de modélisation, ces analyses d'efficacité pourraient également permettre de comparer différents scénarios à des échelles assez larges (territoire, région) et constituer des outils intéressants pour la décision et boucler sur les évolutions d'allocations à prévoir dans le cadre de la pertinence.

## 2. Améliorer l'efficacité alimentaire des animaux

L'analyse du triangle de performance a montré l'importance de l'étape d'efficacité pour accroître la performance. Un

des challenges importants a consisté à améliorer l'efficacité de conversion des aliments par les animaux eux-mêmes. L'utilisation de la diversité génétique pour sélectionner les animaux les plus efficaces pour convertir les aliments dans un produit animal (lait ou viande principalement) est intéressante car elle peut assez rapidement concerner de grands effectifs. Mais pour sélectionner les animaux, il faut définir le critère utilisé et essayer de comprendre les modifications biologiques associées pour mieux en cerner les intérêts et les limites.

### ■ 2.1. Comment mesurer l'efficacité alimentaire des animaux dans un objectif de sélection ?

La première étape de l'amélioration a été obtenue par la sélection sur la productivité des animaux. Plus les gains de poids journalier ou les productions de lait par animal augmentaient, plus l'efficacité alimentaire, définie comme le ratio entre la production réalisée et la quantité d'aliments consommée, augmentait. Le ratio inverse, l'indice de consommation (kg d'aliment consommé/kg gain de poids) est plus souvent utilisé comme un indicateur de l'inefficacité alimentaire. Depuis des années, l'indice de consommation en production de viande ou de lait ne cesse de diminuer. En porcs par exemple, les valeurs voisines de 3,2 au milieu des années 1970 ont baissé pour atteindre des valeurs de 2,6 maintenant (Knap et Wang, 2012). Une grande partie de cette amélioration est due au fait que les animaux sont devenus plus maigres. En lait, il fallait 8,95 MJ d'énergie par kg de lait à la sortie de la dernière guerre mondiale contre seulement 3,85 MJ en 2005 aux USA (Capper *et al.*, 2009).

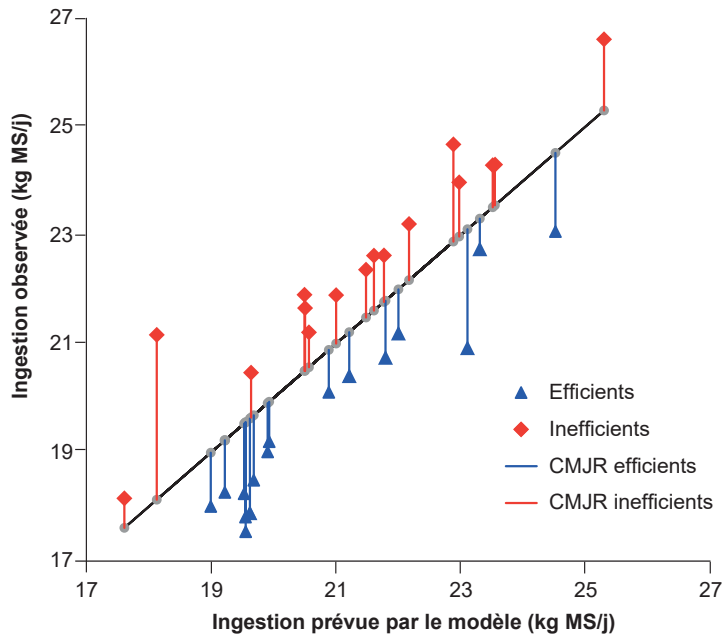
Cependant, l'indicateur indice de consommation n'est pas indépendant de la vitesse de croissance ou de la production de lait journalière et demeure très peu corrélé à l'ingestion des animaux. Par ailleurs, pour la production de viande, la densité énergétique des lipides est beaucoup plus importante que la densité énergétique des protéines (39,8 vs 23,8 kJ/g) et le dépôt de protéines est associé au dépôt d'eau,

ainsi pour 1 kg de protéines déposées, entre 2,5 et 3,5 kg d'eau seront également déposés. Il ressort de ce calcul que raisonner l'indice de consommation sur la base du poids vif n'est pas la même chose que de raisonner en énergie déposée et cela montre des limites de ce critère pour évaluer l'efficacité. Pour mieux caractériser l'efficacité individuelle, il est apparu intéressant d'utiliser d'autres indicateurs, moins ou pas liés à la productivité de l'animal, en particulier l'ingestion résiduelle.

L'ingestion résiduelle ou la Consommation Moyenne Journalière Résiduelle d'aliment (CMJR, ou RFI en anglais pour « *Residual Feed Intake* ») reflète la différence entre la consommation réelle et la consommation prévue sur la base de la performance réalisée. Des animaux ayant une CMJR élevée consomment plus pour des performances équivalentes et, en conséquence, sont donc moins efficaces (figure 3). Cet indicateur est de plus en plus utilisé et si l'on ne pouvait recenser dans le « *Web of Science* » ([www.webofknowledge.com](http://www.webofknowledge.com)) que 40 publications avec ce mot clé en 2008, il y en avait 169 en 2018. Pour les animaux en croissance, le modèle d'ingestion est expliqué par le gain de poids, la composition du gain (principalement en porcs, *via* le pourcentage de viande maigre et l'épaisseur de lard dorsal) et les besoins d'entretien (Gilbert *et al.*, 2017a). Pour des femelles laitières, si les approches basées sur la CMJR semblent également pertinentes, elles nécessitent de longues périodes de mesures d'ingestion pour prendre en compte la dynamique de la lactation, même si les travaux récents montrent que les mesures en milieu de lactation sont les plus représentatives de l'ensemble du cycle. Le modèle de calcul des CMJR pour les vaches laitières utilise le lait et la composition du lait, le poids et de façon moins systématique les variations de poids ou d'état corporel pour tenir compte des variations des réserves (Løvendahl *et al.*, 2018).

L'utilisation de ces indicateurs montre une variabilité importante de la CMJR dans la plupart des espèces. Suivant les études, les modèles statistiques utilisés et les espèces, on note un coefficient de variation de 5 à 14 %. Ce coefficient de

**Figure 3.** Illustration de la mesure de l'efficacité par la consommation moyenne journalière résiduelle d'aliments pour des vaches laitières (données issues de Fischer et al., 2018a).



Le modèle d'ingestion est construit à partir des variables explicatives de production de lait (énergie du lait), de poids métabolique ( $\text{poids\_vif}^{0.75}$ ) et de variation de poids sur la période. Les vaches ayant un résidu positif (en rouge) sont moins efficaces que celles qui ont un résidu négatif (en bleu) puisque leur ingestion observée est supérieure à ce que le modèle prévoit.

variation semble cependant plus faible pour les femelles laitières (6 %) que pour les animaux en croissance, bovins ou porcs (8 à 14 %). Les travaux récents de Fischer *et al.* (2018a) montrent que la variabilité de CMJR associée à l'effet animal représente une faible proportion des quantités ingérées chez la vache laitière, contrairement aux autres espèces. Ceci peut sans doute s'expliquer par la part et la stabilité du coût énergétique de la fonction lactation lorsque l'on prend en compte la composition du lait dans la consommation d'énergie. Face à l'importance du métabolisme de la glande mammaire, les variations de dépenses d'entretien représentent une part beaucoup plus faible des dépenses énergétiques. L'héritabilité de ce caractère varie beaucoup suivant les études (0,05 à 0,4), mais il semble assez facile de sélectionner des animaux sur ce caractère. Chez les porcs, l'INRA a conduit une expérience de sélection divergente sur la CMJR sur neuf générations de porcs (Gilbert *et al.*, 2017a ; Gilbert *et al.*, 2017b). La sélection a résulté en une différence importante entre les deux lignées en consommation alimentaire (435 g/j). En pratique, la sélection permettrait de gagner de

l'ordre de 10 % sur la consommation d'aliments pour des animaux en croissance, mais probablement moins sur les femelles laitières. La faible corrélation entre l'efficacité calculée en début de lactation et celle observée sur toute la lactation (Fischer, 2017 ; Løvendahl *et al.*, 2018).

D'autres approches analogues basées sur la production résiduelle au lieu de l'ingestion résiduelle ont été proposées à partir de modèles destinés à expliquer la production (lait ou gain de poids) à partir de variables décrivant l'ingestion et le poids de l'animal. Les résidus de ces modèles sont très liés à l'indice de consommation et à la production de lait (Løvendahl *et al.*, 2018) ou au gain de poids (Arthur *et al.*, 2001) et assez peu à la consommation. Ces modèles semblent apporter moins de valeur ajoutée que ceux sur l'ingestion.

## ■ 2.2. Quels mécanismes biologiques expliquent l'amélioration de l'efficacité alimentaire des animaux ?

Il est intéressant de comprendre les mécanismes pouvant expliquer cette

meilleure transformation de l'aliment par l'animal. Globalement, il y a trois grands types de mécanismes liés au devenir de l'énergie ingérée qui permettent d'expliquer ces différences de CMJR : la digestibilité, le métabolisme et son rendement, et les diverses formes d'utilisation de l'énergie.

La digestion de la ration est la première étape d'utilisation de l'énergie ingérée et elle peut varier entre animaux. La variation de la digestibilité pourrait expliquer une partie de la variation de la CMJR (Nkrumah *et al.*, 2006 ; Richardson et Herd, 2004). Parmi les phénotypes associés aux variations de CMJR, les composantes du comportement alimentaire semblent souvent associées, même s'il reste à faire le lien avec les modifications digestives (Fischer *et al.*, 2018b). Cependant, peu d'études ont spécifiquement étudié la variation de la digestibilité chez les bovins, principalement en raison de la difficulté et du coût requis pour mesurer ce caractère. De plus, les résultats disponibles ne permettent généralement pas de conclure parce que la précision de la mesure est faible. Récemment, de nouvelles techniques d'étude des communautés microbiennes ont montré des différences dans la population microbienne du rumen entre les bovins à CMJR élevées et faibles. Des différences significatives dans la morphologie du tractus intestinal, avec des modifications cellulaires de l'épithélium dans les cryptes de l'intestin grêle à la fois dans le duodénum et dans l'iléon, ont été observées chez des bouvillons plus efficaces (Montanholi *et al.*, 2013). Chez les porcs, les résultats ne montrent pas de différence entre deux lignées divergentes sur les CMJR (Montagne *et al.*, 2014), même si la capacité digestive semble avoir une composante génétique chez le porc (Noblet *et al.*, 2013) ainsi que chez les volailles (de Vernal *et al.*, 2011). Globalement, la digestion semble plus expliquer les variations de CMJR chez les bovins (Herd et Arthur, 2009) que chez les monogastriques (Gilbert *et al.*, 2017a).

Une source d'économie d'énergie possible concerne des modifications significatives du métabolisme basal. Chez le porc en croissance et chez la poule pondeuse, les lignées CMJR – ont une

production de chaleur réduite à jeun. Des différences liées au métabolisme oxydatif peuvent expliquer ce résultat et conduisent à des différences de coût énergétique de l'entretien (Barea *et al.*, 2010). Chez les bovins à viande, Richardson et Herd (2004) attribuaient une part importante des différences de CMJR à des modifications de turnover protéique. Montanholi *et al.* (2008) ont mesuré par thermographie des températures plus élevées, en particulier au niveau des joues et du museau, chez des taurillons à CMJR élevée. Les différences de niveau d'ingestion sont également de nature à réduire les coûts énergétiques liés à la digestion comme l'ont confirmé des différences de poids des viscères (Labussière *et al.*, 2015). Ces résultats confirment que l'existence de différences dans le métabolisme susceptibles d'expliquer les écarts d'efficacité.

Le troisième grand type de différence associée aux différences de CMJR concerne les formes d'utilisation de l'énergie. Une première forme d'économie consiste à mettre plus de dépôts protéiques (et de l'eau associée) que lipidiques dans la croissance des animaux. Chez les bovins à viande, les travaux de Richardson et Herd (2004) sur des sélections divergentes de bovins basées sur la consommation résiduelle d'aliment n'attribuaient à la composition corporelle qu'une faible part des gains possibles. Cependant chez les porcs, les lignées CMJR – (plus efficaces) ont un taux de maigre supérieur, ce qui contribue à améliorer les rendements en carcasse, mais aussi à dégrader certains caractères de qualité de la viande (Gilbert *et al.*, 2017a). L'autre forme d'utilisation d'énergie souvent observée de façon plus importante chez les animaux inefficients est une augmentation de l'activité physique. Le coût énergétique de la station debout peut être élevé et a été bien quantifié chez la truie (Noblet *et al.*, 1993). Cette augmentation de l'activité physique a été bien observée sur les lignées de porcs sélectionnées sur leur CMJR + et – (Meunier-Salaün *et al.*, 2014), avec moins de temps passé debout et moins d'interactions sociales pour les animaux efficaces. Des constatations similaires sur le temps passé debout et sur les déplacements ont été faites également chez les bovins à viande (Richardson et

Herd, 2004) et chez les vaches laitières (Fischer *et al.*, 2018b).

Il existe donc de nombreux mécanismes susceptibles d'expliquer des différences d'efficacité alimentaire entre animaux. Par conséquent on peut se demander si sélectionner sur l'efficacité alimentaire peut avoir des effets négatifs ou positifs sur des fonctions d'intérêt autres que la production.

### ■ 2.3. Sélectionner sur l'efficacité alimentaire peut-il réduire la robustesse des animaux ?

Il est souvent suggéré que les animaux les plus efficaces en termes de croissance ou de production de lait pourraient être moins robustes et donc plus sensibles aux facteurs de stress. Cette idée est basée sur l'hypothèse que les ressources allouées à la croissance ne peuvent pas être utilisées pour d'autres fonctions comme la reproduction ou le système immunitaire ou peuvent utiliser de façon plus intense les réserves corporelles.

L'expérience conduite à l'INRA sur la sélection divergente de la CMJR des porcs n'a pas permis de confirmer cette hypothèse. Les deux lignées répondaient de façon similaire à un challenge inflammatoire provoqué artificiellement en termes de fièvre, concentration de haptoglobines (une protéine de phase aiguë et indicateur d'inflammation) et dynamique de consommation alimentaire (Merlot *et al.*, 2016), même si les stratégies métaboliques pour y arriver différaient entre les deux lignées. Bien au contraire, sélectionner les animaux pour l'efficacité semble les rendre plus robustes. Les animaux plus efficaces étaient affectés moins longtemps par un challenge inflammatoire (Labussière *et al.*, 2015) et leur état était moins altéré par des conditions sanitaires dégradées (Chatelet *et al.*, 2018). Les résultats obtenus à l'INRA sur la sélection divergente de la CMJR étaient similaires à ceux d'une expérience conduite à l'« Iowa State University » (Young et Dekkers, 2012).

La sélection de la CMJR chez les animaux en croissance conduit généralement à des animaux plus maigres. Les vaches laitières présentent une forte

aptitude à mobiliser leurs réserves corporelles. On peut craindre que la sélection de la CMJR conduise à des vaches ayant moins de réserves corporelles ou les sollicitant plus, avec des risques potentiels sur la santé et la reproduction. Les travaux récents de Hardie *et al.* (2017) montrent que lorsque seuls la production de lait et le poids sont introduits dans le modèle de la CMJR, il existe un lien entre l'efficacité et des gènes candidats impliqués dans la gestion des réserves (leptine, récepteurs adrénérgiques). On peut donc craindre de renforcer le caractère maigre des vaches laitières si on sélectionne l'efficacité sans introduire ce caractère dans le modèle. Le développement de nouvelles méthodes à haut débit de mesure de l'état corporel des vaches laitières par imagerie 3D (Fischer *et al.*, 2015) offre des perspectives intéressantes pour mieux appréhender ce caractère et l'introduire dans les équations de calcul de la CMJR, ce qui n'est pas possible avec le bilan énergétique.

Comme indiqué précédemment, l'efficacité ne doit certainement pas être considérée comme seul critère pour améliorer la durabilité des élevages. Des aliments qui n'entrent pas ou moins en compétition directe avec l'alimentation de l'Homme sont généralement plus riches en fibres alimentaires. Le défi pour l'avenir n'est donc pas « comment peut-on améliorer l'efficacité ? » mais plutôt « comment peut-on faire au mieux avec un aliment qui est de moindre qualité ? ». On peut en effet craindre que certaines aptitudes propres à améliorer l'efficacité alimentaire avec des régimes d'excellente valeur alimentaire ne soient pas conservées avec des rations de plus faible valeur. Peu de travaux permettent pour l'instant de répondre avec certitude à cette question. Dans un essai avec des bovins à viande recevant deux types de rations différentes entre les phases de croissance et d'engraissement, les auteurs ont observé une corrélation génétique modérée entre l'efficacité des animaux mesurée avec l'une et l'autre des deux rations, indiquant l'existence possible d'une interaction entre génétique et environnement pour la CMJR (Durunna *et al.*, 2011). Chez les porcs, la sélection de lignées divergentes sur la



CMJR n'avait pas permis d'observer de différences de capacité digestive pour des régimes conventionnels ou riches en fibres (Montagne *et al.*, 2014). On n'a donc pour l'instant peu d'éléments indiquant que la nature du régime perturbe beaucoup les classements d'efficacité des animaux. Ce n'interdit pas de se poser la question des types de ration avec lesquels les animaux doivent être sélectionnés pour les décennies futures.

### 3. Réduire les rejets vers l'environnement

Les rendements de la biotransformation des aliments en produits animaux ne sont pas très élevés (10 à 40 % de l'énergie ou des protéines consommées). Ainsi, le carbone (C) et l'azote (N) couplés grâce à la photosynthèse dans les végétaux consommés par les animaux se retrouvent largement découplés dans les rejets des animaux, ce qui peut constituer à la fois un atout agronomique pour la fertilisation des cultures et des risques pour l'environnement. Ces rejets sont constitués principalement des effluents, intégrant les urines et les fèces, mais aussi des rejets gazeux émis directement par l'animal. Ces différents rejets conduisent à l'apparition de formes de C (méthane) ou de N (ammoniac, protoxyde d'azote, nitrate...) qui présentent des risques pour l'environnement. Les stratégies pour limiter ces risques à l'échelle de l'animal vont consister *i)* à limiter le découplage du carbone et de l'azote, notamment en limitant les pertes dans l'urine car l'urée conduit très vite à la formation d'ammoniac, et *ii)* à augmenter l'efficacité d'utilisation des protéines et des glucides des végétaux pour la synthèse du lait et de la viande.

Chez les ruminants, cette maîtrise du couplage est compliquée par le rôle spécifique de la digestion microbienne dans la panse. Cette digestion permet de fermenter la cellulose qui serait indigestible autrement et de synthétiser des protéines microbiennes, mais elle dégrade des protéines végétales en ammoniac. Elle produit aussi du méthane (CH<sub>4</sub>) et du gaz carbonique qui représentent une perte énergétique.

Les connaissances actuelles en nutrition des ruminants permettent de prévoir assez précisément les principaux flux d'éléments à l'échelle de l'animal.

#### ■ 3.1. Cycle du carbone

##### a. Le gaz carbonique

Le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) est un gaz à effet de serre dont la concentration a fortement augmenté dans l'atmosphère avec l'augmentation de la population du globe et de ses activités. Cette augmentation contribue principalement au réchauffement climatique d'origine anthropique. Cependant le CO<sub>2</sub> directement rejeté par les animaux, même s'il représente des flux importants, n'est pas considéré comme ayant un impact sur l'environnement, car il provient en général du CO<sub>2</sub> prélevé dans l'atmosphère par les plantes au cours de la même année. Les impacts liés au CO<sub>2</sub> sont principalement dus au déstockage du carbone des sols. Celui-ci a lieu principalement lors du changement d'usage des sols en libérant le carbone des matières organiques du sol. L'autre source d'émission de CO<sub>2</sub>, nettement plus faible, concerne l'utilisation de carbone fossile comme source d'énergie pour l'élevage, directement sur l'exploitation ou en amont, notamment pour la culture des aliments nécessaires à l'alimentation.

Si le déstockage du carbone fossile est le premier facteur d'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère terrestre, l'élevage est principalement concerné par les changements d'usage des sols qu'induit son développement. La recherche croissante de sols arables pour les cultures annuelles est un facteur de libération du carbone séquestré dans les sols vers l'atmosphère. Les retournements de prairies ou la déforestation sont des facteurs importants de libération de CO<sub>2</sub> stocké dans les sols. Dans son rapport « *Livestock's long shadow* », la FAO (2006) chiffrerait les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'élevage à seulement 0,16 GT par an sans l'usage et le changement d'usage des sols, mais à 2,7 GT/an en les intégrant, soit plus que les émissions de méthane par l'élevage (2,2 GT CO<sub>2</sub> eq/an). La réduction de la consommation d'aliments par l'amélioration de l'efficacité alimentaire

des animaux permet de réduire les émissions associées à leur production. Le choix de matières premières ayant moins d'impact sur la perte de carbone des sols dans la formulation des aliments des monogastriques (Espagnol *et al.*, 2018) constitue également une piste de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), même s'il y a un léger surcoût à l'aliment ainsi formulé. Chez les ruminants, l'utilisation des prairies représente une voie importante de maintien du carbone dans les sols et dans certaines conditions d'augmentation de son stockage (Dollé *et al.*, 2013).

##### b. Le méthane

Le méthane (CH<sub>4</sub>) est un gaz à effet de serre, 25 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub>, généralement associé à des fermentations anaérobiques. Les émissions de méthane sont en lien avec les fermentations dans le tube digestif des animaux et pendant le stockage des effluents. Les émissions entériques sont principalement liées à la digestion microbienne dans le rumen des ruminants et dans une moindre mesure dans le gros intestin de tous les animaux. De nombreuses synthèses existent pour faire l'état de l'art de cette question (Gerber *et al.*, 2013 ; Hristov *et al.*, 2013). Nous nous limiterons donc à présenter les grandes pistes actuelles dans ce domaine en montrant aussi les limites associées à ces différentes stratégies.

#### • Réduire les émissions de méthane entérique des ruminants

Les archées présentes dans le rumen sont capables d'éliminer l'hydrogène produit dans le rumen en le combinant avec le CO<sub>2</sub> pour produire le méthane. Trois grandes stratégies, les inhibiteurs de la synthèse du méthane, l'alimentation et la sélection génétique ont montré des possibilités intéressantes pour limiter cette production et les impacts associés. D'autres approches, telle la vaccination, font également l'objet de recherches, mais doivent encore faire preuve de leur efficacité.

L'utilisation d'inhibiteurs de la réaction de synthèse du méthane est une stratégie qui peut s'avérer très efficace en agissant de manière ciblée sur sa production. La revue de Patra *et al.*

(2017) dresse un panorama assez large des connaissances sur les mécanismes et solutions envisagées pour réduire cette production. Des molécules, comme les dérivés nitro-oxy (3NOP et méthyl 3NOP), ont montré dans des essais zootechniques conduits avec des bovins à viande, des bovins laitiers et des ovins, que des doses faibles de quelques g de 3NOP par bovin et par jour apportés dans la ration permettent des réductions importantes et répétables de la production de méthane (environ 25 à - 30 %) sans effet négatif avéré pour l'instant (Jayanegara *et al.*, 2018). D'autres inhibiteurs intéressants ont été identifiés, comme les métabolites secondaires des plantes, mais leur action semble plus aléatoire pour l'instant et nécessite encore des travaux importants pour préconiser leur utilisation. L'acceptabilité de ces inhibiteurs par les consommateurs reste cependant à étudier.

L'alimentation est aussi un moyen possible de réduire les émissions de méthane. La revue de Doreau *et al.* (2011) dresse un inventaire des solutions possibles. On peut notamment agir par l'ajout de lipides ou par l'augmentation d'amidon en remplacement des fibres alimentaires dans la ration pour réduire les émissions de méthane. Ces stratégies sont cependant susceptibles d'effets associés non négligeables, certains positifs comme l'enrichissement du lait en acides gras insaturés, d'autres négatifs comme les émissions de GES induites par la production de ces aliments et par les coûts associés qui peuvent réduire leur pertinence par rapport à d'autres mesures (Pellerin *et al.*, 2017).

La sélection génétique est une voie prometteuse puisque qu'elle peut concerner un nombre très important de ruminants, même s'il faut attendre plusieurs années pour voir les effets du progrès génétique dans ces espèces. La revue de Pickering *et al.* (2015) fait le point sur l'état des possibilités de réduction des émissions de méthane par la sélection génétique. Plus récemment, des travaux ont permis d'estimer que l'héritabilité des émissions de méthane (g/j) chez les vaches laitières serait comprise entre 0,20 et 0,25 (Lassen et Løvendahl,

2016 ; Kandel *et al.*, 2017). Les travaux de Pinares-Patiño *et al.* (2013) chez les moutons ont démontré des possibilités de réduire les émissions par la voie de la sélection avec des héritabilités également assez bonnes sur les émissions de méthane en g/j, mais plus faibles sur les productions de méthane par kg de MS d'aliment ingéré (héritabilité de 0,13). Des résultats d'héritabilité de ces paramètres ont également été obtenus avec des effectifs importants de bovins à viande (Donoghue *et al.*, 2016), mais ils montrent des corrélations génétiques positives élevées entre l'émission de méthane (g/j) et les paramètres de croissance qui doivent inciter à orienter la sélection plus sur une émission de méthane résiduelle négative (émission de méthane observée moins émission de méthane prédite) que sur les émissions totales de méthane. De même pour les vaches laitières, des résultats obtenus à partir des émissions de méthane estimées par analyse des spectres infrarouges du lait montrent des corrélations génétiques positives avec la fertilité des vaches (Kandel *et al.*, 2018), une sélection contre les émissions de méthane pouvant contribuer à dégrader la reproduction. Les stratégies de contre-sélection génétique sur les émissions de méthane devront donc veiller à ne pas altérer d'autres caractères d'intérêt.

Le lien entre efficacité alimentaire (CMJR) et émissions de méthane (g/j) est complexe et les premiers résultats montrent qu'il ne sera pas facile de cumuler les gains sur les deux stratégies. La sélection de bovins à viande sur l'efficacité alimentaire montre que, pour une même alimentation, les animaux les plus efficaces émettent plus de méthane par kg d'aliment ingéré que les animaux les moins efficaces (Herd *et al.*, 2016 ; Renand *et al.*, 2016). Des premiers résultats obtenus chez les vaches laitières Holstein (Olijhoek *et al.*, 2018) montrent également des relations positives entre efficacité et production de méthane (g/kg de MS), ce qui fait que le gain d'efficacité ne se traduit pas par une émission réduite de méthane comme on pourrait le penser compte tenu de la baisse d'ingestion. Ce résultat suggère que la digestibilité et le transit peuvent être fortement

impliqués dans les mécanismes d'efficacité chez les ruminants (Løvendahl *et al.*, 2018). Les mesures à haut débit des émissions de méthane restent un frein important à la sélection d'animaux moins émetteurs, mais sont indispensables pour vérifier que l'on peut réellement simultanément améliorer l'efficacité alimentaire et réduire les émissions de méthane.

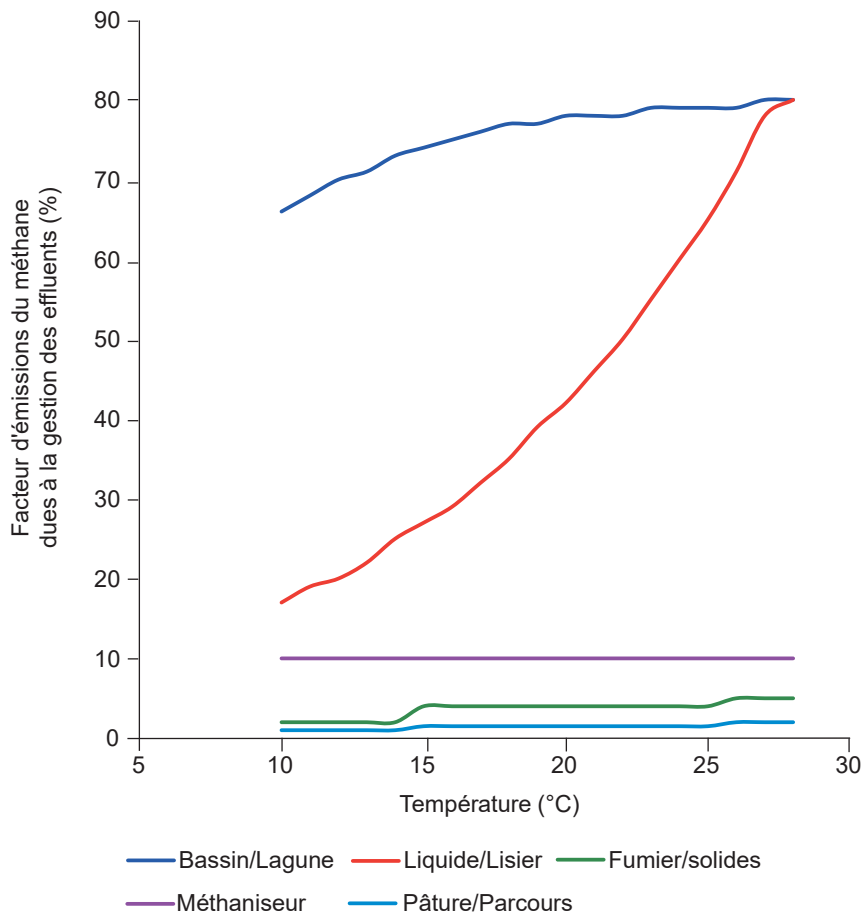
#### • Réduire les émissions de méthane des effluents

La production de méthane par les effluents constitue également une source importante d'émission de méthane dans l'atmosphère, qui ne concerne pas seulement les ruminants. Ceci est particulièrement vrai dans les systèmes de production où les animaux sont élevés en bâtiments, car les émissions de méthane ont lieu principalement pendant le stockage anaérobie des effluents, soit dans les litières paillées, soit dans les fosses à lisier, mais sont négligeables au pâturage. Les facteurs d'émissions proposés par l'IPCC (2006) montrent bien les différences d'émissions de méthane liées aux différents types d'effluents (figure 4). On notera aussi l'effet important de la température, qui dans les systèmes produisant du lisier accroît fortement les facteurs d'émissions. Avec les effets du réchauffement climatique, il faut donc craindre que ces émissions augmentent si les systèmes de stockage n'évoluent pas. En dehors du pâturage qui est une solution économique pour limiter les émissions de méthane, les solutions techniques pour réduire ces émissions existent, mais sont souvent coûteuses. Si les méthaniseurs ou les torchères permettent de réduire les émissions de GES des systèmes lisiers, leur coût reste élevé par tonne de CO<sub>2</sub> eq évité (Pellerin *et al.*, 2017).

### ■ 3.2. Cycle de l'azote

La transformation de l'azote non réactif de l'air en azote réactif a connu une croissance extraordinaire avec la fabrication des engrais azotés de synthèse pour augmenter les rendements des cultures alors que le rôle de la fixation symbiotique a peu augmenté en

**Figure 4.** Facteurs d'émissions du méthane en fonction des différents modes de gestion des effluents et de la température moyenne (d'après IPCC, 2006).



Ces facteurs d'émissions s'appliquent aux matières organiques contenues dans les effluents.

comparaison. Ce fort accroissement de l'azote réactif conduit à la cascade de l'azote (Galloway *et al.*, 2003) qui se traduit par l'émission de nombreux composés à risques pour l'environnement ( $N_2O$  pour le réchauffement climatique,  $NO_3$  pour l'eutrophisation des milieux aquatiques,  $NH_3$  pour l'acidification) et pour la santé humaine ( $NH_3$  et maladies respiratoires). L'élevage joue un rôle important dans cette cascade de l'azote par sa consommation importante d'aliments et notamment de protéines qu'il utilise avec un rendement souvent faible, de 10 à 40 %. La question d'essayer de réduire l'utilisation de protéines et les émissions liées à leur transformation est donc un enjeu important de l'élevage. Cette réduction des protéines doit permettre de réduire l'excrétion d'azote, en particulier urinaire, qui est difficile à conserver pour la fertilisation dans la gestion des effluents et qui contribue pour beaucoup aux émissions de l'élevage en termes de  $NH_3$  et  $N_2O$ .

#### a. Maximiser le rendement de l'utilisation des protéines métabolisables

L'alimentation de précision a pour but d'ajuster l'alimentation individuellement en fonction de besoins spécifiques de chaque animal. Ce qui est nouveau dans ce concept, c'est que cet ajustement ne se fait plus seulement en fonction de modèles *a priori*, mais aussi en fonction des réponses des animaux eux-mêmes. En effet, les modèles de prévision peinent à prévoir parfaitement les réponses individuelles. Le monitoring va permettre de savoir plus de choses sur l'état des animaux et leurs réponses aux conditions d'élevage, l'alimentation de précision va permettre d'intégrer cette information pour corriger les apports afin d'apporter aux animaux ce qui convient le mieux, au bon moment et avec l'efficacité maximale. Ce concept, déjà utilisé pour l'alimentation en concentrés énergétiques des vaches laitières utilisant des robots de traite, peut bien entendu s'appliquer à l'alimentation protéique.

Chez les ruminants, limiter l'apport en protéines métabolisables augmente leur rendement d'utilisation (Brun-Lafleur *et al.*, 2010 ; Sauvart *et al.*, 2015). De même l'amélioration de l'équilibre en acides aminés digestibles permet d'accroître le rendement de l'utilisation des protéines métabolisables (Haque *et al.*, 2012). En général, le faible rendement marginal d'utilisation des protéines fait que la baisse de production induite par une réduction d'apport protéique est moins forte que la baisse de consommation de ces protéines, favorisant ainsi une meilleure utilisation de ces protéines. Un premier travail dans ce sens a permis de montrer qu'avec des régimes à base d'ensilage de maïs, on pouvait réduire de plus de 40 % la quantité de tourteaux nécessaires par kg de matières protéiques du lait (Cutullic *et al.*, 2013) grâce à une augmentation de près de 10 points de l'efficacité d'utilisation des protéines alimentaires. S'il faut accepter une réduction de la production de lait par vache de 5 % seulement, celle-ci a lieu sans altération de l'efficacité énergétique (kg de lait/kg MS consommée).

Chez le porc, moins de 20 % de l'azote ingéré par le porc est non-digestible et donc excrété dans les fèces alors qu'environ 50 % de l'azote ingéré est excrété dans les urines (Dourmad *et al.*, 1999). Maximiser le rendement de l'utilisation des protéines passe surtout par l'optimisation du profil en acides aminés dans l'aliment par rapport aux besoins de l'animal. Ceci permet de réduire la teneur en protéines dans l'aliment, de réduire l'excrétion de l'azote dans les urines, et de maximiser le rendement d'utilisation des protéines. Une réduction importante de la teneur en protéines est possible en utilisant des acides aminés libres, comme la lysine, la méthionine, la thréonine, le tryptophane et la valine. Il est admis qu'une réduction de la teneur de protéines dans l'aliment de 1 point résulte en une réduction d'excrétion d'azote de 8 à 10 %.

Le concept de « protéine idéale » a été développé dans les années 1960 et permet d'exprimer les besoins en acides aminés par rapport à la lysine. L'évolution des besoins en acides

aminés au cours de la croissance est prise en compte d'abord par rapport à l'évolution du besoin en lysine (en kg d'aliment ou par rapport à l'énergie) et les autres acides aminés suivent le besoin en lysine selon le profil de la protéine idéale. Le besoin en lysine (et donc ceux des autres acides aminés) diminue au cours de la croissance. Pour maximiser le rendement d'utilisation des protéines, il est important de suivre, au mieux, cette diminution dans les apports. Les systèmes d'alimentation en bi-phase, ou en multi-phase où plusieurs aliments sont distribués en fonction du stade de croissance, permettent d'améliorer l'efficacité d'utilisation d'azote. Or, avec le développement des outils de monitoring, il est maintenant possible d'aller plus loin et de développer des systèmes d'alimentation de précision. Il ne s'agit pas uniquement de suivre les besoins moyens en acides aminés au cours de la croissance, mais d'y apporter une dimension individuelle. Il s'agit ici d'estimer la croissance (ou le dépôt de protéines) et la consommation d'aliment attendus pour ainsi nourrir chaque individu selon ces propres besoins. Par rapport à un système de l'alimentation en trois phases, une système d'alimentation de précision (en multi-phases et individualisé), l'apport en lysine a pu être réduit par 27 % et l'excrétion d'azote par 22 %, sans conséquences sur les performances (Andretta *et al.*, 2014).

Le fait que la majorité de l'azote soit excrété *via* les urines est dû au catabolisme des acides aminés. Ce catabolisme pourrait être dû à un apport en acides aminés supérieur aux besoins et donc potentiellement « évitable ». Une autre partie est liée aux besoins de l'entretien, mais cette partie est considérée comme relativement faible (van Milgen et Dourmad, 2015). La majorité du catabolisme dit « inévitable » est dû au fait que les acides aminés ne peuvent pas être utilisés avec un rendement marginal de 100 %, même si l'apport en un acide aminé est limitant pour le dépôt protéique. Ces rendements marginaux sont différents entre acides aminés essentiels (van Milgen *et al.*, 2008 ; van Milgen et Dourmad, 2015) et ils pourraient aussi être affectés par le poids de l'animal (NRC, 2012). Des études

préliminaires semblent indiquer que le rendement marginal pourrait être très variable entre individus au sein d'une population. Si c'est confirmé, cela pourrait offrir une possibilité intéressante, non seulement dans un contexte d'alimentation de précision, mais aussi pour étudier l'héritabilité de ce rendement marginal et d'essayer de l'améliorer par la sélection génétique.

#### **b. Réduire la dégradabilité des protéines de l'alimentation des ruminants à fort besoin**

L'alimentation des vaches laitières fortes productrices nécessite des apports importants de protéines métabolisables pour satisfaire les besoins de synthèse des matières protéiques du lait. Si les microbes du rumen peuvent synthétiser une part importante des protéines à partir des fermentations de la ration dans le rumen, cela est généralement insuffisant pour couvrir les besoins en protéines des vaches laitières. Pour y parvenir, il faut donc accroître la part de protéines qui échappe à la dégradation par les microbes dans le rumen, soit en apportant plus de protéines globalement, mais avec une inefficience importante, soit en augmentant la part des protéines qui échappe à la dégradation en les protégeant mieux de l'attaque par les microbes, ce qui permet d'économiser des protéines, de réduire l'excrétion urinaire d'azote et de mieux valoriser les ressources protéiques utilisées. Il est donc intéressant de traiter ces protéines avec différentes technologies pour accroître leur protection. Ceci est possible en particulier avec des rations à base d'ensilage de maïs dans la mesure où plus de la moitié des protéines sont apportées par les seuls compléments protéiques.

Le dilemme de la protection des protéines pour une meilleure efficacité de leur utilisation par les ruminants vient de l'équilibre qu'il faut trouver entre une protection efficace contre la dégradation par les microbes dans le rumen, et la conservation d'une bonne digestibilité des protéines qui sortent du rumen dans l'intestin. La technique des tourteaux tannés au formaldéhyde avait bien réussi à trouver

ce compromis (Vérité et Journet, 1977), mais cette technologie a actuellement disparu compte tenu des risques à la production en usine. Le développement de nouvelles méthodes est donc important et de nombreux compléments protéiques combinant une ou plusieurs technologies apparaissent aujourd'hui sur le marché. Le traitement des tourteaux ou des graines par la chaleur pour favoriser la formation de réactions de Maillard, l'utilisation de tannins naturels ou d'huiles essentielles sont autant de solutions proposées aujourd'hui pour favoriser le by-pass des protéines alimentaires du rumen. Ces nouvelles solutions posent cependant des difficultés pour évaluer l'impact de ces traitements sur les valeurs alimentaires des sources protéiques, en particulier lorsqu'elles sont supposées avoir une action systémique. Il convient de proposer rapidement de nouvelles méthodologies pour quantifier les gains de protéines métabolisables permis par ces solutions, probablement en utilisant des réponses biologiques.

### **■ 3.3. Cycle du phosphore**

Comme pour l'azote, améliorer l'utilisation du phosphore passe par l'optimisation des apports par rapport aux besoins. Si l'apport raisonnable en fertilisants organiques aux cultures est un atout important pour les besoins des plantes en phosphore, l'excès de ces apports conduit, par ruissellement particulière des matières organiques, à une eutrophisation des milieux aquatiques. Même si en France, l'élevage ne contribue globalement que pour 10 % aux rejets de phosphore (Meschy *et al.*, 2008), la concentration des élevages sur certains territoires constitue un facteur de risque important. L'utilisation optimale de cette ressource limitée sur la planète est donc un enjeu important pour l'élevage. La revue de Meschy *et al.* (2008) brosse un tableau toujours d'actualité des pistes permettant une bonne maîtrise des apports de phosphore dans les différentes filières animales.

Contrairement aux ressources azotées, le phosphore dans les ressources d'origine végétale, majoritairement sous forme de phytates, est peu

digestible directement. La phytase permet de dégrader le phytate. Chez les ruminants, l'hydrolyse des phytates est en grande partie réalisée par les phytases des microbes du rumen. Mais les phytates sont peu ou pas digestibles par les monogastriques (Humer *et al.*, 2015). Chez les porcs, la digestibilité fécale de phosphore est aux alentours de 30 % pour le maïs, et les tourteaux de soja et de colza. Cette même valeur est valable pour les céréales comme le blé et l'orge si la phytase endogène est détruite par un traitement thermique, mais la digestibilité est plus élevée si ce n'est pas le cas (Sauvant *et al.*, 2002). C'est pour cette raison que des phytases d'origine microbienne ont été développées et elles sont largement utilisées dans l'alimentation des monogastriques. La digestibilité augmente de façon curvilinéaire avec l'apport de phytase microbienne et les phytases produites par des bactéries et des levures semblent être plus efficaces que celles initialement produites par des champignons (Humer *et al.*, 2015). Ces apports de phytases ont largement contribué à réduire les apports de phosphore dans l'alimentation des monogastriques. Néanmoins, la digestibilité de phosphore dépasse rarement le 60 à 70 %, même avec des apports de phytases élevés (Dourmad et Jondreville, 2007).

Le besoin en phosphore (et en calcium) est principalement déterminé par les besoins osseux et par l'exportation de ces minéraux dans le lait. Comme pour l'azote, le besoin en phosphore (exprimé en g P digestible/kg d'aliment) diminue au cours de la croissance, mais le besoin pour maximiser la minéralisation osseuse est supérieur au besoin pour maximiser la croissance. Pour améliorer l'efficacité d'utilisation de phosphore, l'alimentation par phases est donc un levier important. Dans une étude récente, Gonzalo *et al.* (2018) utilisaient l'alimentation minérale par phases, mais avec des périodes de sous-alimentation en P et Ca. La sous-alimentation améliorait l'efficacité d'utilisation de phosphore sans conséquences sur la croissance et la minéralisation osseuse et permettait de réduire l'apport en phosphore digestible jusqu'à 34 %.

Que ce soit pour l'azote ou pour les minéraux, la maîtrise des apports dans l'alimentation pour permettre une efficacité de leur utilisation élevée est un enjeu important pour réduire les rejets vers l'environnement. Il convient cependant de noter que ces éléments N et P ont des impacts majoritairement locaux (à l'exception du N<sub>2</sub>O). Les aspects d'organisation territoriale et de concentration des élevages sont donc importants pour la maîtrise de ces impacts et pour faire en sorte que la vertu fertilisante des effluents organiques ne se transforme pas en pollution des milieux aquatiques.

#### 4. Les gains d'efficacité alimentaire et de réduction des rejets à l'échelle animale sont-ils conservés aux échelles supérieures ?

En passant en revue les pistes d'amélioration de l'efficacité, notamment celles de la figure 2, il est clair que la plupart d'entre elles sont bien de nature à réduire également les impacts sur l'environnement, soit par la diminution des ressources utilisées, soit par la réduction des émissions associées, soit les deux. Nous avons plusieurs fois mentionné ces effets bénéfiques attendus. Cela paraît trivial et pourrait nous dispenser de le vérifier. Cependant, le triangle de la performance doit nous inciter à vérifier l'efficacité des solutions retenues par rapport aux objectifs recherchés. Plusieurs effets systémiques peuvent en effet annihiler les effets bénéfiques attendus. Cette perte de bénéfice attendu vient généralement des interactions entre entités du système ou entre processus qui n'ont pas été prises en compte. Des exemples ont déjà été cités et on pourrait donner l'exemple des gains d'émissions directes de méthane par l'alimentation de bovins en élevage et en finition qui peuvent être compensés, après analyse par cycle de vie, par des augmentations d'émissions, notamment liées aux ressources nécessaires pour y parvenir (Nguyen *et al.*, 2012). Chaque situation étant particulière, il est difficile de ne pas procéder à partir d'exemples pour analyser ce problème. Deux exemples ont

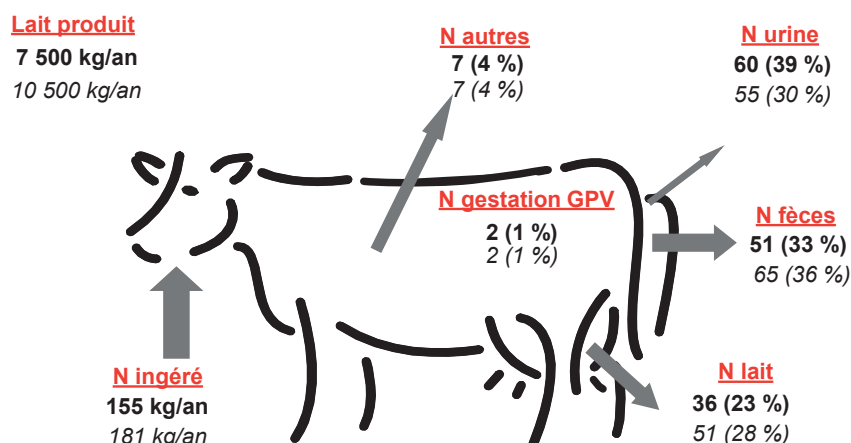
été choisis dans cet article pour illustrer deux types d'interactions importantes, celles entre l'élevage et le territoire et celles liées à la coproduction de lait et de viande et d'en évaluer les conséquences sur les performances globales.

#### ■ 4.1. Interactions élevage – territoire concernant les impacts du cycle de l'azote

Les principes d'augmentation de l'efficacité protéique des vaches laitières vus précédemment convergent pour indiquer que des systèmes relativement intensifs à l'animal, avec des rations utilisant des quantités importantes d'ensilages de maïs et un apport de protéines contrôlé vont permettre de réduire les rejets d'azote pour une même production de lait. La figure 5 illustre la comparaison du bilan azoté annuel d'une vache laitière moyenne dans une conduite de système herbager et d'une vache forte productrice dans un système basé sur des rations complètes à base d'ensilage de maïs avec une complémentation protéique équilibrée. Il en ressort que l'efficacité d'utilisation de l'azote par la vache laitière est supérieure dans le système le plus intensif à base d'ensilage de maïs et que les rejets d'azote sont plus faibles : 2,4 g de N excrété par g de N Lait vs 3,1 g de N dans le système herbager. Les écarts sont encore plus importants sur les émissions d'azote urinaire qui sont les plus à risque : 1,1 g de N urinaire excrété par g de N Lait vs 1,7 g de N dans le système herbager. La gestion de l'azote dans ces systèmes herbagers devrait donc être théoriquement plus problématique.

L'analyse des pertes d'azote des systèmes de production laitiers montre cependant que les systèmes herbagers ont toujours moins d'impacts que les systèmes basés sur l'utilisation d'ensilage de maïs. Deux grands facteurs expliquent ce phénomène. Le premier facteur est lié au fait que l'augmentation de la production par vache induit la plupart du temps une intensification de la production par hectare notamment liée à la production de maïs et un achat important de compléments protéiques. Cette augmentation de la

**Figure 5.** Bilan azote annuel d'une vache laitière (animal moyen en supposant 30 % de primipares dans le troupeau) dans un système « herbager » (gras) et dans un système « intensif ensilage de maïs » (italiques) en kg de N par an et entre parenthèses en % de l'ingéré pour les sorties du système (d'après Faverdin et Peyraud 2010).



pression d'azote par hectare conduit donc généralement à des pertes d'azote par hectare plus importantes, notamment au niveau des nitrates (Chatellier et Vérité, 2003). De plus, il existe sans doute une plus forte réorganisation de l'azote en matières organiques avec les systèmes herbagers lorsque la prairie n'est pas retournée au profit d'un stockage net dans les sols limitant les pertes de nitrate par lessivage. Sinon, lorsque les prairies entrent dans les rotations avec le maïs, la minéralisation devient plus importante. Le second facteur concerne le temps de présence des animaux en bâtiments qui est important avec les fourrages conservés et généralement plus réduit avec le pâturage. Le temps en stabulation et le stockage

des effluents qui en découle favorisent les émissions d'ammoniac qui ont des effets sur les petites particules et l'acidification. Ces émissions d'ammoniac ne vont pas réduire pour autant l'eutrophisation, les dépôts d'ammoniac conduisant in fine à la formation de nitrates. Le **tableau 2** illustre les différences importantes d'émissions d'ammoniac dans les systèmes herbagers et montre que celles-ci ne sont pas liées directement à l'efficacité d'utilisation de l'azote par les animaux.

L'amélioration de l'efficacité de conversion de l'azote par les animaux ne garantit donc pas de réduire les risques de la cascade de l'azote et peut même les aggraver.

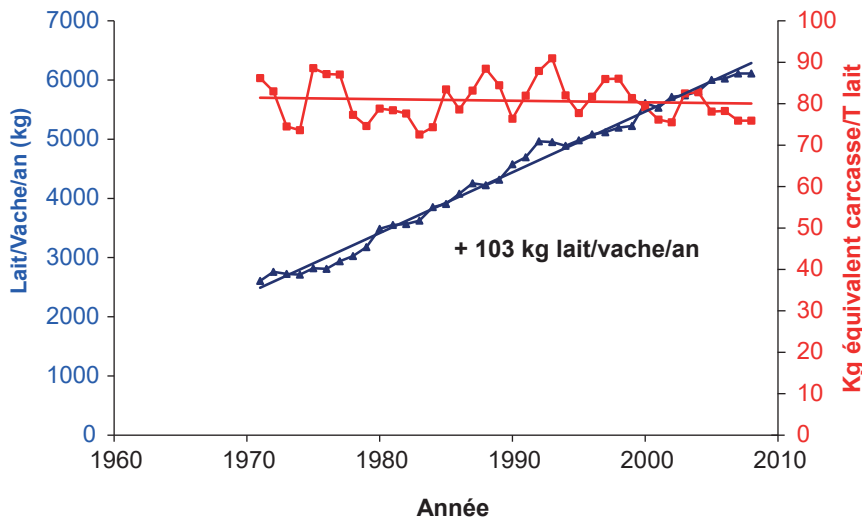
#### ■ 4.2. Interactions liées à la coproduction : exemple du lait et de la viande

Le changement d'échelle concernant l'efficacité alimentaire et les émissions de GES devrait théoriquement poser moins de problème, car ce sont des facteurs à impact global et non pas local comme l'exemple de l'azote. Les gains d'efficacité liés à l'augmentation de production par animal, grâce au progrès génétique laisse présager des gains très importants sur les émissions associées. Dans l'étude de l'efficacité des vaches laitières, la synthèse de Knapp *et al.* (2014) souligne les effets très positifs de l'augmentation de production sur la baisse des émissions de méthane par kg de lait produit, d'environ 60 % d'après les calculs de Capper *et al.* (2009). L'analyse des données d'inventaire d'émissions ne sont cependant pas aussi optimistes. L'analyse des données françaises en est un bon exemple, très intéressant car le ratio entre production de viande et de lait par le cheptel bovin évolue très peu au cours des dernières décennies (**figure 6**). Les statistiques montrent une constante augmentation de la production de lait par vache laitière (environ + 100 kg de lait/vache/an) et de viande par animal pour les animaux de race à viande (gain de poids et format, environ + 2 à + 3 kg de carcasse de vache de réforme /an) liée en partie aux progrès de la sélection génétique.

**Tableau 2.** Comparaison de différents systèmes laitiers plus ou moins herbagers sur l'autonomie, l'efficacité et les émissions de NH<sub>3</sub> (d'après Faverdin *et al.*, 2014 à partir des données de l'Institut de l'Élevage, 2011).

	Nord et Est			Grand Ouest		
	Mais > 30	10 < Mais < 30	Mais < 10	Mais > 30	10 < Mais < 30	Mais < 10
<b>Mais (% SFP)</b>	Mais > 30	10 < Mais < 30	Mais < 10	Mais > 30	10 < Mais < 30	Mais < 10
<b>Lait (kg/VL)</b>	8 169	7 500	6 334	7 827	6 786	5 608
<b>N ingéré (kg/VL/an)</b>	187	181	152	165	163	142
<b>N excrété (kg/T lait)</b>	17,4	18,8	18,8	15,6	18,4	19,6
<b>Autonomie N</b>	49 %	57 %	78 %	67 %	73 %	79 %
<b>Efficacité de l'N</b>	23,6 %	22,4 %	21,4 %	25,7 %	23,1 %	21,4 %
<b>NH<sub>3</sub> (kg N/T Lait)</b>	4,9	4,0	1,8	2,2	3,4	1,7

**Figure 6.** Évolution en France des productions moyennes annuelles de lait par vache laitière et du ratio entre production de viande et production de lait entre 1972 et 2008 (d'après les données Eurostats, 2009).

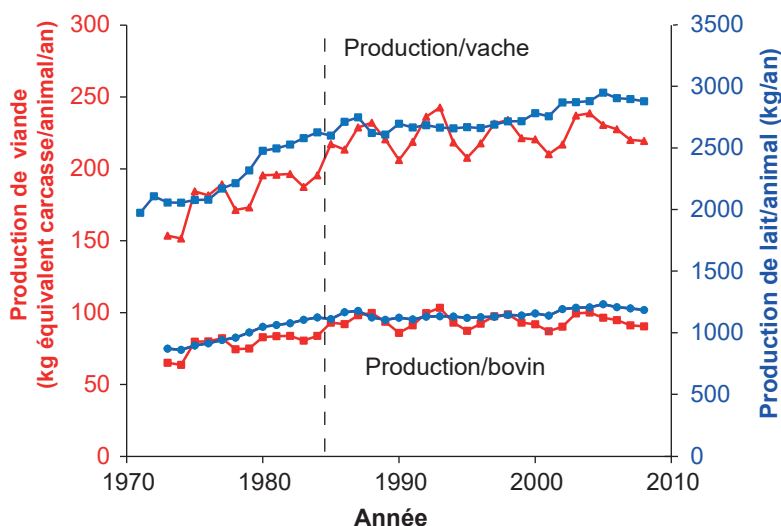


Cette progression des performances de production s'accompagne souvent de moindres performances au niveau des qualités d'élevage (longévité, reproduction, mortalité des veaux...). Cependant, on peut constater que la production moyenne de lait ou de viande du cheptel français, exprimée par vache (laitières et allaitantes) ou par bovin présent en France, n'a pratiquement pas progressé depuis 20 ans malgré l'augmentation des performances individuelles de production des animaux (figure 7, Pflimlin *et al.*, 2009). De même, les émissions de GES et les consommations d'aliments associées ne semblent pas beaucoup diminuer

malgré ces augmentations de performance de production. Comment expliquer que ces augmentations de performances individuelles des animaux grâce à la spécialisation qui s'accompagnent d'une augmentation d'efficacité à l'échelle animale et de moindres émissions à risque pour l'environnement ne se retrouvent pas à grande échelle ?

L'explication de ce paradoxe a été proposée dans l'article de Cederberg et Stadig (2003) qui ont étudié les problèmes d'allocation lait et viande dans l'évaluation par analyse de cycle de vie d'une exploitation laitière. Ce travail

**Figure 7.** Évolution en France des productions annuelles de lait et de viande exprimées par vache (laitière ou allaitante) ou par bovin présent entre 1970 et 2008 (d'après Pflimlin *et al.*, 2009 à partir des données Eurostats).



soulignait qu'une augmentation de production de lait dans l'exploitation laitière se traduisait par une baisse de production de viande à même production de lait et qu'il fallait prendre en compte les émissions liées à ce défaut de production de viande pour ne pas commettre de biais dans l'analyse (expansion de système). Ce constat est confirmé par le travail de Zehetmeier *et al.* (2012) qui teste l'effet d'un scénario d'augmentation de production laitière et montre des effets positifs sur les émissions par kg de lait à l'échelle de l'exploitation laitière seule, mais rien de significatif en prenant en compte la modification de production de viande qui doit être compensée à plus grande échelle si l'on suppose que la consommation n'a pas été affectée. La modélisation du cheptel bovin français pour étudier différents scénarios d'évolution de l'élevage sur les émissions de GES sous contrainte de maintien de la production montre une grande inertie des émissions de  $\text{CH}_4$  du cheptel face à la spécialisation des races en raison de la moindre productivité en viande du troupeau laitier lorsque sa spécialisation laitière s'accroît (Puillet *et al.*, 2014). Tous ces résultats sont donc contraires aux effets spectaculaires, mais dépourvus de vision systémique, publiés par Capper *et al.* (2009). À l'opposé, les trajectoires des animaux pour la viande et leur âge d'abattage, l'âge au premier vêlage, et le sexage des semences en prenant en compte les effets de ressources alimentaires utilisées (accroissement de terres labourées vs prairies stockant du carbone) restent des options importantes pour gérer les émissions de  $\text{CH}_4$  à un niveau global.

Ce cas complexe de la coproduction du lait et de la viande par le cheptel bovin montre clairement que l'on ne peut pas extrapoler simplement à grande échelle (cheptel national) des gains d'efficacité et d'émissions à risques pour l'environnement observés à l'échelle de l'animal. Cette remarque est d'autant plus importante pour des impacts à effet globaux pour lesquels on pourrait penser qu'il suffit de faire le produit de ces gains individuels avec les effectifs pour estimer les effets globaux.

Ces deux exemples illustrent clairement que des indicateurs trop simplistes d'efficacité ne permettent pas toujours d'atteindre les objectifs souhaités, principalement parce qu'ils ne résistent pas au changement d'échelle. Même si l'augmentation de productivité est un des leviers important dans certains contextes permettant d'améliorer l'efficacité et de diminuer les rejets, elle ne peut garantir à elle seule la consommation de ressources et la baisse des émissions. Seule une approche systémique des effets induits par les changements de conduites proposés permet de vérifier que l'on pourra atteindre les objectifs recherchés, même si cela est plus complexe à étudier et nécessite souvent des modèles plus élaborés.

## Conclusion

Cette synthèse montre qu'il existe de nombreux niveaux d'organisation sur lesquels on peut agir pour accroître l'efficacité alimentaire des productions animales et réduire les risques pour l'environnement qui constitue en enjeu majeur pour l'élevage. La recherche a beaucoup contribué à améliorer la productivité des animaux et plus récemment la conversion des aliments en produits animaux pour améliorer l'efficacité alimentaire des élevages. Ces travaux ont largement permis d'accroître l'efficacité des productions animales et de réduire certains impacts. Cependant, si l'on doit continuer de s'appuyer sur des

solutions visant à améliorer les processus élémentaires d'efficacité de conversion des aliments par les animaux ou par le troupeau, cela ne suffit pas toujours à améliorer l'efficacité globale. La quête de l'indicateur idéal d'efficacité est sans doute vaine, mais une combinaison des différents indicateurs en fonction des objectifs recherchés est indispensable.

Les interactions entre les différentes entités à différents niveaux d'organisation montrent que les bénéfices espérés peuvent être perdus avec le changement d'échelle. Si l'on propose ou imagine une solution à un niveau d'organisation élémentaire, il est important de se donner les moyens de vérifier son efficacité à des niveaux d'organisation plus agrégés. La science propose souvent une démarche agrégative pour résoudre des problèmes globaux, en faisant l'hypothèse que si l'on peut décrire précisément et améliorer chaque entité du système, la performance globale en sera améliorée. Les exemples évoqués dans cet article montrent que ce n'est pas toujours vrai. Des approches « désagrégatives » déclinant des optimums (ou des contraintes) globaux à des échelles infra restent encore largement à inventer pour aborder les questions d'optimisation d'allocation des ressources et de la place de l'élevage dans cette valorisation (« penser global, décliner local »). Pour l'élevage, c'est principalement dans l'optimisation de l'allocation des ressources alimentaires liée à l'utilisation des sols et à la valorisation/gestion de bioproduits

pour concevoir la complémentarité des systèmes et activités agricoles (cultures, élevages) et des services/dis-services associés au sein des territoires qu'il faut être créatif. Les approches de recherche en écologie industrielle ou dans l'étude du métabolisme territorial offrent des perspectives intéressantes pour y arriver. Ensuite c'est dans l'optimisation du fonctionnement global des systèmes d'élevage que l'on pourra réellement améliorer la performance de l'élevage et faire de celui-ci un allié puissant de la conversion des bio-ressources en en limitant les impacts sur l'environnement. Enfin, des études pour aller plus loin dans l'évaluation multicritère qu'une simple multiplication d'indicateurs sont nécessaires et doivent permettre d'aider à faire ce lien entre ressources, productions et territoires.

## Remerciements

Les auteurs remercient les différents financeurs des projets consacrés à l'efficacité alimentaire des animaux d'élevage et dont les travaux ont contribué à cette synthèse : Le projet DEFFILAIT ANR-15-CE20-0014 a reçu un financement de l'ANR et d'Apis-Gène, le projet GenTORE a reçu un financement du programme H2020 de l'Union européenne au titre de la convention de subvention n° 727213 et le projet Feed-a-Gene a reçu un financement du programme H2020 de l'Union européenne au titre de la convention n° 633531.

## Références

- Andretta I., Pomar C., Rivest J., Pomar J., Lovatto P.A., Radünz Neto J., 2014. The impact of feeding growing-finishing pigs with daily tailored diets using precision feeding techniques on animal performance, nutrient utilization, and body and carcass composition. *J. Anim. Sci.*, 92, 3925-3936.
- Arthur P.F., Renand G., Krauss D., 2001. Genetic and phenotypic relationships among different measures of growth and feed efficiency in young Charolais bulls. *Livest. Prod. Sci.*, 68, 131-139.
- 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, 2062-2072.
- Brumm M.C., Gonyou H.W., 2001. Effects of facility design on behavior and feed and water intake. In: *Swine Nutrition*. Lewis A.J., Southern L.L. (Eds). CRC Press, Boca Raton, USA, 499-518.
- Brun-Lafleur L., Delaby L., Husson F., Faverdin P., 2010. Predicting energy x protein interaction on milk yield and milk composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 93, 4128-4143.
- Capper J.L., Cady R.A., Bauman D.E., 2009. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *J. Anim. Sci.*, 87, 2160-2167.
- Cederberg C., Stådig M., 2003. System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. *Intern. J. Life Cycle Assess.*, 8, 350-356.
- Chatelet A., Gondret F., Merlot E., Gilbert H., Friggens N.C., Le Floch N., 2018. Impact of hygiene of housing conditions on performance and health of two pig genetic lines divergent for residual feed intake. *Animal*, 12, 350-358.
- Chatellier V., Vérité R., 2003. L'élevage bovin et l'environnement en France : le diagnostic justifie-t-il des alternatives techniques ? *INRA Prod. Anim.*, 16, 231-249.
- Cutullic E., Delaby L., Edouard N., Faverdin P., 2013. Rôle de l'équilibre en azote dégradable et de l'alimentation protéique individualisée sur l'efficacité d'utilisation de l'azote. *Renc. Rech. Rum.*, 20, 53-56.
- de Verdal H., Narcy A., Bastianelli D., Chapuis H., Mème N., Urvoix S., Le Bihan-Duval E., Mignon-Grasteau S., 2011. Improving the efficiency of feed utilization in poultry by selection. 2. Genetic parameters of excretion traits and correlations with anatomy of the gastro-intestinal tract and digestive efficiency. *BMC Genetics*, 12, 71.



- Dollé J.B., Faverdin P., Agabriel J., Sauvant D., Klumpp K., 2013. Contribution of cattle farming to GHG emissions and soil carbon sequestration according to production system. *Fourrages*, 215, 181-191.
- Donoghue K.A., Bird-Gardiner T., Arthur P.F., Herd R.M., Hegarty R.F., 2016. Genetic and phenotypic variance and covariance components for methane emission and postweaning traits in Angus cattle. *J. Anim. Sci.*, 94, 1438-1445.
- Doreau M., Martin C., Eugene M., Popova M., Morgavi D.P., 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Prod. Anim., 24, 461-474.
- Dourmad J.Y., Jondreville C., 2007. Impact of nutrition on nitrogen, phosphorus, Cu and Zn in pig manure, and on emissions of ammonia and odours. *Livest. Sci.*, 112, 192-198.
- Dourmad J.Y., Sève B., Latimier P., Boisen S., Fernández J., van der Peet-Schwering C., Jongbloed A.W., 1999. Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 261-264.
- Dourmad J.Y., Nassy G., Salaün Y., Riquet J., Lebret B., 2015. Estimation des pertes alimentaires dans la filière porcine entre la sortie de l'élevage et la commercialisation des produits. *Innov. Agronom.*, 48, 115-125.
- Durruna O.N., Plastow G., Mujibi F.D.N., Grant J., Mah J., Basarab J.A., Okine E.K., Moore S.S., Wang Z., 2011. Genetic parameters and genotype x environment interaction for feed efficiency traits in steers fed grower and finisher diets. *J. Anim. Sci.*, 89, 3394-3400.
- Espagnol S., Tailleur A., Dauguet S., Garcia-Launay F., Gaudré D., Dusart L., Méda B., Gac A., Laisse S., Morin L., Dronne Y., Ponchant P., Wilfart A., 2018. Réduire les impacts environnementaux des produits animaux avec des éco-aliments. *Innov. Agronom.*, 63, 231-242.
- FAO, 2006. *Livestock's long shadow. Environmental issues and options*. FAO, Rome, Italie, 390p.
- Faverdin P., Peyraud J.L., 2010. Nouvelles conduites d'élevage et conséquences sur le territoire : cas des bovins laitiers. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 1, 89-100.
- Faverdin P., Baratte C., Perbost R., Thomas S., Ramat E., Peyraud J.L., 2014. Un outil web pour évaluer simplement l'autonomie alimentaire et l'excrétion d'azote des troupeaux laitiers : CowNex. *Renc. Rech. Rum.*, 391-395.
- Fischer A., 2017. Étude de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière. Thèse de doctorat de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage, 230p.
- Fischer A., Luginbuhl T., Delattre L., Delouard J.M., Faverdin P., 2015. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 98, 4465-4476.
- Fischer A., Friggens N.C., Berry D.P., Faverdin P., 2018a. Isolating the cow-specific part of residual energy intake in lactating dairy cows using random regressions. *Animal*, 12, 1396-1404.
- Fischer A., Delagarde R., Faverdin P., 2018b. Identification of biological traits associated with differences in residual energy intake among lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.*, 101, 4193-4211.
- FranceAgriMer, 2012. *L'observatoire de la biomasse – Évaluation des ressources disponibles en France. Les synthèses de FranceAgriMer*, Édition mai 2012.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J., 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53, 341-356.
- Gerber P.J., Hristov A.N., Henderson B., Makkar H., Oh J., Lee C., Meinen R., Montes F., Ott T., Firkins J., Rotz A., Dell C., Adesogan A.T., Yang W.Z., Tricarico J.M., Kebreab E., Waghorn G., Dijkstra J., Oosting S., 2013. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal*, 7, 220-234.
- Gilbert H., Billon Y., Brossard L., Faure J., Gatellier P., Gondret F., Labussière E., Lebret B., Lefaucheur L., Le Floch N., Louveau I., Merlot E., Meunier-Salaün M.C., Montagne L., Mormède P., Renaudeau D., Riquet J., Rogel-Gaillard C., van Milgen J., Vincent A., Noblet J., 2017a. Sélection pour la consommation alimentaire moyenne journalière résiduelle chez le porc : impacts sur les caractères et défis pour la filière. *INRA Prod. Anim.*, 30, 439-453.
- Gilbert H., Billon Y., Brossard L., Faure J., Gatellier P., Gondret F., Labussière E., Lebret B., Lefaucheur L., Le Floch N., Louveau I., Merlot E., Meunier-Salaün M.C., Montagne L., Mormède P., Renaudeau D., Riquet J., Rogel-Gaillard C., van Milgen J., Vincent A., Noblet J., 2017b. Review: divergent selection for residual feed intake in the growing pig. *Animal*, 11, 1427-1439.
- Gonzalo E., Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Bernier J.F., Pomar C., 2018. Consequences of dietary calcium and phosphorus depletion and repletion feeding sequences on growth performance and body composition of growing pigs. *Animal*, 12, 1165-1173.
- Haque M.N., Rulquin H., Andrade A., Faverdin P., Peyraud J.L., Lemosquet S., 2012. Milk protein synthesis in response to the provision of an "ideal" amino acid profile at 2 levels of metabolizable protein supply in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 95, 5876-5887.
- Hardie L.C., VandeHaar M.J., Tempelman R.J., Weigel K.A., Armentano L.E., Wiggins G.R., Veerkamp R.F., de Haas Y., Coffey M.P., Connor E.E., Hanigan M.D., Staples C., Wang Z., Dekkers J.C.M., Spurlock D.M., 2017. The genetic and biological basis of feed efficiency in mid-lactation Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 100, 9061-9075.
- Herd R.M., Arthur P.F., 2009. Physiological basis for residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 87, E64-E71.
- Herd R.M., Velazco J.I., Arthur P.F., Hegarty R.F., 2016. Associations among methane emission traits measured in the feedlot and in respiration chambers in Angus cattle bred to vary in feed efficiency. *J. Anim. Sci.*, 94, 4882-4891.
- Hristov A.N., Ott T., Tricarico J., Rotz A., Waghorn G., Adesogan A., Dijkstra J., Montes F., Oh J., Kebreab E., Oosting S.J., Gerber P.J., Henderson B., Makkar H.P.S., Firkins J.L., 2013. SPECIAL TOPICS-Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of animal management mitigation options. *J. Anim. Sci.*, 91, 5095-5113.
- Humer E., Schwarz C., Schedle K., 2015. Phytate in pig and poultry nutrition. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 99, 605-625.
- INRA-CIRAD, 2009. *Agrimonde. Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable. Note de synthèse*. <https://www6.paris.inra.fr/depe/Media/Fichier/Prospectives/Agrimonde/Synthese-du-rapport>
- Institut de l'Élevage, 2011. *Observatoire de l'alimentation des vaches laitières, données 2007*.
- IPCC, 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, forestry and other land use. Emissions for livestock and manure management*, 4, Chap. 10, 87p.
- Jayanegara A., Sarwono K.A., Kondo M., Matsui H., Ridla M., Laconi E.B., Nahrowi, 2018. Use of 3-nitrooxypropanol as feed additive for mitigating enteric methane emissions from ruminants: a meta-analysis. *Ital. J. Anim. Sci.*, 17, 650-656.
- Kandel P.B., Vanrobays M.L., Vanlierde A., Dehareng F., Froidmont E., Gengler N., Soyeurt H., 2017. Genetic parameters of mid-infrared methane predictions and their relationships with milk production traits in Holstein cattle. *J. Dairy Sci.*, 100, 5578-5591.
- Kandel P.B., Vanderick S., Vanrobays M.L., Soyeurt H., Gengler N., 2018. Corrigendum to: Consequences of genetic selection for environmental impact traits on economically important traits in dairy cows. *Anim. Prod. Sci.*, 58, 1966-1966.
- Knap P.W., Wang L., 2012. Pig breeding for improved feed efficiency. In: *Feed efficiency in swine*. Patience J.F. (Ed). Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 167-181.
- Knapp J.R., Laur G.L., Vadas P.A., Weiss W.P., Tricarico J.M., 2014. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *J. Dairy Sci.*, 97, 3231-3261.
- Labussière E., Dubois S., Gilbert H., Thibault J.N., Le Floch N., Noblet J., van Milgen J., 2015. Effect of inflammation stimulation on energy and nutrient utilization in piglets selected for low and high residual feed intake. *Animal*, 9, 1653-1661.
- Lairez J., Feschet P., Aubin J., Bockstaller C., Bouvarel I., 2015. *Agriculture et développement durable : Guide pour l'évaluation multicritère*. Educagri, Dijon/QUAE, Versailles. 228p.
- Laisse S., Baumont R., Dusart L., Gaudré D., Rouillé B., Benoit M., Veysset P., Rémond D., Peyraud J.L., 2018. L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRA Prod. Anim.*, 31, 269-288.

- Lassen J., Løvendahl P., 2016. Heritability estimates for enteric methane production in dairy cattle using non-invasive methods. *J. Dairy Sci.*, 99, 1959-1967.
- Løvendahl P., Difford G.F., Li B., Chagunda M.G.G., Huhtanen P., Lidauer M.H., Lassen J., Lund P., 2018. Review: Selecting for improved feed efficiency and reduced methane emissions in dairy cattle. *Animal*, 12, s336-s349.
- Merlot E., Gilbert H., Le Floc'h N., 2016. Metabolic response to an inflammatory challenge in pigs divergently selected for residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 94, 563-573.
- Meschy F., Jondreville C., Dourmad J.Y., Narcy A., Nys Y., 2008. Maîtrise des rejets de phosphore dans les effluents d'élevage. *INRA Prod. Anim.*, 21, 79-86.
- Meunier-Salaün M.C., Guérin C., Billon Y., Sellier P., Noblet J., Gilbert H., 2014. Divergent selection for residual feed intake in group-housed growing pigs: characteristics of physical and behavioural activity according to line and sex. *Animal*, 8, 1898-1906.
- Montagne L., Loisel F., Le Naou T., Gondret F., Gilbert H., Le Gall M., 2014. Difference in short-term responses to a high-fiber diet in pigs divergently selected for residual feed intake. *J. Anim. Sci.*, 92, 1512-1523.
- Montanholi Y.R., Odongo N.E., Swanson K.C., Schenkel F.S., McBride B.W., Miller S.P., 2008. Application of infrared thermography as an indicator of heat and methane production and its use in the study of skin temperature in response to physiological events in dairy cattle (*Bos taurus*). *J. Thermal Biol.*, 33, 468-475.
- Montanholi Y., Fontoura A., Swanson K., Coomber B., Yamashiro S., Miller S.P., 2013. Small intestine histomorphometry of beef cattle with divergent feed efficiency. *Acta Vet. Scand.*, 55, 9.
- Nahon D., 2012. Sauvons l'agriculture ! Collections Sciences. Odile Jacob, Paris, France, 264p.
- Nguyen T.T.H., van der Werf H.M.G., Eugene M., Veyssset P., Devun J., Chesneau G., Doreau M., 2012. Effects of type of ration and allocation methods on the environmental impacts of beef-production systems. *Livest. Sci.*, 145, 239-251.
- Nkrumah J.D., Okine E.K., Mathison G.W., Schmid K., Li C., Basarab J. A., Price M. A., Wang Z., Moore S.S., 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *J. Anim. Sci.*, 84, 145-153.
- Noblet J., Shi X.S., Dubois S., 1993. Energy cost of standing activity in sows. *Livest. Prod. Sci.*, 34, 127-136.
- Noblet J., Gilbert H., Jaguelin-Peyraud Y., Lebrun T., 2013. Evidence of genetic variability for digestive efficiency in the growing pig fed a fibrous diet. *Animal*, 7, 1259-1264.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine National Academy Press, Washington, DC, USA, 400p.
- Olijhoek D.W., Løvendahl P., Lassen J., Hellwing A.L.F., Höglund J.K., Weisbjerg M.R., Noel S.J., McLean F., Højberg O., Lund P., 2018. Methane production, rumen fermentation, and diet digestibility of Holstein and Jersey dairy cows being divergent in residual feed intake and fed at 2 forage-to-concentrate ratios. *J. Dairy Sci.*, 101, 9926-9940.
- Patra A., Park T., Kim M., Yu Z.T., 2017. Rumen methanogens and mitigation of methane emission by anti-methanogenic compounds and substances. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 8, 13. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0145-9>
- Pellerin S., Bamiere L., Angers D., Beline F., Benoit M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Henault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., Chemineau P., 2017. Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environ. Sci. Policy*, 77, 130-139.
- Pflimlin A., Faverdin P., Béranger C., 2009. Un demi-siècle d'évolution de l'élevage bovin. Bilan et perspectives. *Fourrages*, 200, 429-464.
- Pickering N.K., Oddy V.H., Basarab J., Cammack K., Hayes B., Hegarty R.S., Lassen J., McEwan J.C., Miller S., Pinares-Patino C.S., de Haas Y., 2015. Animal board invited review: genetic possibilities to reduce enteric methane emissions from ruminants. *Animal*, 9, 1431-1440.
- 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.
- Puillet L., Agabriel J., Peyraud J.L., Faverdin P., 2014. Modelling cattle population as lifetime trajectories driven by management options: A way to better integrate beef and milk production in emissions assessment. *Livest. Sci.*, 165, 167-180.
- Rastoin J.L., Ghersi G., 2010. Le système alimentaire mondial: Concepts et méthodes, analyses et dynamiques. Collection Synthèse, QUAE, Paris, France, 565p.
- Renand G., Vinet A., Maupetit D., 2016. Relations entre émissions de méthane entérique et efficacité alimentaire chez des génisses charolaises en croissance. *Renc. Rech. Rum.*, 23, 19-22.
- Richardson E.C., Herd R.M., 2004. Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 2. Synthesis of results following divergent selection. *Austr. J. Exp. Agric.*, 44, 431-440.
- Ryschawy J., Disenhaus C., Bertrand S., Allaire G., Aznar O., Plantureux S., Josien E., Guinot C., Lasseur J., Perrot C., Tchakerian E., Aubert C., Tichit M., 2017. Assessing multiple goods and services derived from livestock farming on a nation-wide gradient. *Animal*, 11, 1861-1872.
- Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. INRA Éditions, Paris, France, 301p.
- Sauvant D., Cantalapiedra-Hijar G., Delaby L., Daniel J.B., Faverdin P., Nozière P., 2015. Actualisation des besoins protéiques des ruminants et détermination des réponses des femelles laitières aux apports de protéines digestibles dans l'intestin. *INRA Prod. Anim.*, 28, 347-367.
- Soteriades A.D., Faverdin P., Moreau S., Charroin T., Blanchard M., Stott A.W., 2016a. An approach to holistically assess (dairy) farm eco-efficiency by combining Life Cycle Analysis with Data Envelopment Analysis models and methodologies. *Animal*, 10, 1899-1910.
- Soteriades A.D., Stott A.W., Moreau S., Charroin T., Blanchard M., Liu J. Y., Faverdin P., 2016b. The Relationship of Dairy Farm Eco-Efficiency with Intensification and Self-Sufficiency. Evidence from the French Dairy Sector Using Life Cycle Analysis, Data Envelopment Analysis and Partial Least Squares Structural Equation Modelling. *Plos One* 11. e0166445.
- van Milgen J., Dourmad J.Y., 2015. Concept and application of ideal protein for pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 6, 15.
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 387-405.
- VandeHaar M.J., 2012. Feeding and breeding dairy cattle to improve feed efficiency. *Pacific Northwest Anim. Nutr. Conf.* [http://dairy-efficiency.org/sites/default/files/user\\_uploaded\\_files/2012\\_PNWANC\\_Feed\\_efficiency.pdf](http://dairy-efficiency.org/sites/default/files/user_uploaded_files/2012_PNWANC_Feed_efficiency.pdf)
- Vérité R., Journet M., 1977. Utilisation des tourteaux traités au formol par les vaches laitières. II.- Effets sur la production laitière du traitement des tourteaux au formol et du niveau d'apport azoté au début de la lactation. *Ann. Zoot.*, 26, 183-205.
- Young J.M., Dekkers J.C.M., 2012. The genetic and biological basis of residual feed intake as a measure of feed efficiency. In: *Feed efficiency in swine*. Patience J.F. (Ed). Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 153-166.
- Zehetmeier M., Baudracco J., Hoffmann H., Heissenhuber A., 2012. Does increasing milk yield per cow reduce greenhouse gas emissions? A system approach. *Animal*, 6, 154-166.

## Résumé

L'élevage est soumis à des défis considérables pour s'adapter au problème de compétition sur les ressources, notamment alimentaires, et aux problèmes environnementaux. L'amélioration de l'efficacité de conversion des ressources alimentaires en produits animaux est une voie importante susceptible de répondre simultanément aux deux enjeux. Cette revue définit cette notion d'efficacité en la plaçant dans le cadre plus global du triangle de la performance : pertinence, efficacité et efficacité. Elle montre l'importance de mettre en perspective ces questions d'efficacité alimentaire des animaux en abordant la question du changement d'échelle. Dans les secteurs de production de viande et de lait, elle fait le point sur les travaux conduits pour améliorer l'efficacité à la fois par la sélection d'animaux capables de mieux transformer les aliments en produits animaux et par une conduite alimentaire plus précise et mieux équilibrée. Elle évoque les principales avancées pour réduire les émissions à risques pour l'environnement. Raisonner l'efficacité alimentaire et les émissions de rejets à l'échelle de l'animal pour la production de lait ou de viande offre des perspectives de progrès importants, mais ne garantit pas toujours une amélioration de l'efficacité à une échelle plus globale, ni une réduction des impacts sur l'environnement. Il faut donc bien prendre soin de vérifier que les stratégies proposées sont efficaces et permettent d'atteindre les objectifs recherchés avec des indicateurs appropriés. La prise en compte des effets du changement d'échelle pour améliorer la performance globale est un vrai nouveau défi pour la recherche.

## Abstract

### ***Integrate scale changes to improve the efficiency of livestock production (systems?) and reduce emissions***

*Livestock production is facing the challenge to adapt to the problem of competition for resources (especially food resources) and to reduce its environmental impact. Improving the efficiency of converting food resources into animal-derived products is an important way to address both issues simultaneously. This review paper addresses the notion of efficiency by placing it in a broader context of the performance triangle composed of relevance, efficiency, and effectiveness. We will show that feed efficiency issues have to be considered at different levels of organization. For the meat and dairy production sectors, we address research that has been carried out to improve feed efficiency through selection of animals that are better capable of transforming feed resources into animal-derived products and through feeding techniques in which the nutrient supply is better adjusted to the animal's requirement. We also discuss progress that has been made to reduce the environmental impact of livestock production. Considering feed efficiency and emission reduction at the animal level is important and offers a considerable prospect for progress. However, it does not guarantee that efficiency is improved and that environmental impact is reduced at higher levels of organization. It is important to ensure that the proposed livestock management strategies are effective and that they achieve the desired objectives using appropriate indicators. Accounting for the effect of scale changes on the overall performance of livestock production is a new challenge for research.*

FAVERDIN P., VAN MILGEN J., 2019. Intégrer les changements d'échelle pour améliorer l'efficacité des productions animales et réduire les rejets. In : Numéro spécial, De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim., 32, 305-322.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2499>

