

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'EFFICIENCE ÉNERGÉTIQUE DES VACHES LAITIÈRES EN WALLONIE

GILLES SAUSSEZ

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2016-2017

PROMOTEUR: NICOLAS GENGLER

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'EFFICIENCE ÉNERGÉTIQUE DES VACHES LAITIÈRES EN WALLONIE

GILLES SAUSSEZ

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2016-2017

PROMOTEUR: NICOLAS GENGLER

Remerciements

Au moment de clôturer ce travail, je voudrais remercier mon promoteur Nicolas Gengler pour m'avoir proposé ce sujet, et également pour son encadrement tout au long de ce travail.

Je remercie également Sylvie Vanderick pour ses relectures attentives ainsi que Hedi Hammami pour son aide dans la récupération des données et ses conseils.

Merci aussi à toute l'équipe du groupe de génétique animale : Sylvie, Hedi, Rodrigo et Saïd. Votre accueil fut chaleureux et vos conseils m'ont été précieux.

Merci également à Mme. Isabelle Dufrasne (Ulg-FMV et CTA Strée), Mme. Hélène Soyeurt, M. Carlo Bertozzi (awé), M. Jérôme Bindelle et M. Yves Beckers pour leur participation au jury.

Je voudrais également remercier tous les agents de l'Association Wallonne de l'Élevage (awé) qui ont collaboré à ce travail. Un merci particulier à Alain Gillon pour avoir toujours répondu positivement à mes demandes d'informations et à Patrick Mayeres pour sa participation active à ce projet.

Que toutes les enseignantes de Gembloux Agro-Bio Tech soient également remerciées pour ce qu'ils m'ont apporté pendant la durée de mes études ici.

Résumé

Dans le contexte économique actuel, les producteurs laitiers sont sous pression pour assurer la rentabilité de leurs entreprises. Au vu de la structure du prix de revient du lait, réduire les coûts alimentaires paraît une piste intéressante pour améliorer les performances économiques des élevages.

Accroître l'efficacité de l'utilisation de l'énergie des aliments par les animaux est une des voies possibles. L'évaluation de l'efficacité des animaux, quelle qu'en soit la définition précise choisie, passe par la connaissance de leurs besoins de maintenance, lesquels sont étroitement liés au poids corporel. Or l'acquisition de ces poids est très difficile en pratique. L'ajustement d'équations prédictives du poids vif à partir de la classification linéaire est une stratégie couramment employée dans la littérature pour remédier à ce manque. De telles équations ont été développées en Wallonie par Laloux (2008), et un des buts de ce travail est de les actualiser pour prendre en compte l'évolution de la morphologie des animaux. La prise en compte du stade de lactation a été améliorée en utilisant une méthode initialement développée pour la modélisation de courbes de lactation. Les équations ainsi obtenues présentent des R^2 de validation croisée de 0,53 et 0,46 pour les primipares et multipares respectivement.

Afin d'illustrer les possibilités d'utilisation de ces équations, des données issues de la base de données alimentant l'évaluation génétique wallonne et du contrôle laitier ont ensuite été utilisées pour construire un indicateur d'efficacité utilisant des ingestions prédites sur base des poids issus des nouvelles équations.

En conclusion, ces nouvelles équations devraient permettre d'améliorer les prédictions actuelles, et elles ouvrent la porte à une future évaluation génétique du poids vif et de l'efficacité.

Summary

Currently, the economic situation is very difficult for dairy producers. As feed cost is the first cost in most farm, reducing this cost is one way to increase the profitability of dairy farming. In this field, one method is to improve feed efficiency.

There are many possible definitions for feed efficiency, but it is always dependent on maintenance requirements, which are dependent on liveweight. Because of the difficulty of weighing cows in farms, predictive equations for live weight have been adjusted, based on linear classification. Compared to the method of Laloux (2008), the modelization of lactation stage influence has been improved by using a method developed first for lactation curves modelization. The new equations show cross-validation R^2 of 0,53 and 0,46 for primiparous and multiparous cows respectively.

To illustrate a possible application of these equations, data from the Walloon genetic evaluation system and from milk recording were used to calculate a basic efficiency indicator based on dry matter intake predicted from the estimated weights.

Finally, the new equations should allow better predictions, opening the way to a future genetic evaluation for live weight feed efficiency.

Table des matières

1	Introduction générale	1
2	Revue de la littérature	5
2.1	L'efficacité énergétique	5
2.1.1	Bases biologiques de l'efficacité alimentaire	5
2.1.2	Définir l'efficacité énergétique	7
2.1.3	Sélectionner l'efficacité alimentaire	12
2.1.4	Nutrition, management et efficacité	15
2.1.5	Prédire l'ingestion et l'efficacité à partir du lait	17
2.2	Acquisition du poids corporel	20
2.2.1	Prédiction du poids vif à partir de la morphologie	20
2.2.2	Un exemple d'autre outil prédictif : l'analyse d'images	23
2.3	Relation du poids vif aux autres caractères	24
2.3.1	Poids vif et production	24
2.3.2	Poids vif et fertilité femelle	24
2.3.3	Poids vif et santé	25
2.4	Le poids vif dans les objectifs de sélection	25
2.4.1	Héritabilité du caractère	25
2.4.2	Évaluations génétiques du poids vif	26
2.5	Conclusions	26
3	Matériel et méthodes	27
3.1	Description du modèle de prédiction du poids actuellement utilisé en Wallonie	27
3.2	Acquisition des poids observés	31
3.3	Jeux de données utilisés	32
3.4	Répartition des fermes échantillonnées	34
3.5	Calculs et manipulations de données	34
4	Résultats et discussion	36
4.1	Prise en compte de la variabilité des données	36
4.1.1	Analyse en composantes principales	36
4.1.2	Ajustement des covariances	40

TABLE DES MATIÈRES

4.2	Prise en compte du stade de lactation	41
4.2.1	Évolution du poids au cours de la lactation dans nos données	41
4.2.2	Fonction pour l'évolution du poids au cours de la lactation	42
4.3	Équations de prédiction du poids vif à partir de la morphologie	44
4.3.1	Choix des modèles	45
4.3.2	Ajustement des équations	49
4.3.3	Validation croisée	52
4.3.4	Application aux données issues de l'évaluation gé- nétique	55
4.4	Prédiction d'ingestion et calcul d'efficience	63
4.4.1	Évolution des prédictions de poids et d'ingestion au cours de la lactation	64
4.4.2	Effet du niveau de production sur le poids prédit et l'ingestion	67
4.4.3	Exemple de calcul d'efficience : l'indice de consom- mation	69
5	Conclusions et perspectives	73

Table des figures

1	Partition de l'énergie absorbée.	6
2	Poids vif moyen fonction du stade de lactation.	22
3	Évolution du poids prédit par les équations de Laloux (2008) au cours de la lactation pour les primipares et multipares, sur ses données.	31
4	Poids observé moyen au cours de la lactation dans les données de Laloux (2008)	31
5	Répartition géographique des fermes dont sont issues les données. .	35
6	Représentation des individus dans les nouveaux axes, pour les primipares.	39
7	Représentation des individus dans les nouveaux axes, pour les primipares.	39
8	Représentation des individus dans les nouveaux axes, pour les multipares.	40
9	Évolution du poids au cours de la lactation (Données anciennes et nouvelles).	42
10	Prise en compte du stade de lactation par l'équation d'Ali et Schaeffer (1987) pour les multipares (anciennes et nouvelles données confondues)	43
11	Prise en compte du stade de lactation par l'équation d'Ali et Schaeffer (1987) pour les primipares	44
12	Évolution du poids observé en fonction de la parité	46
13	Evolution des paramètres morphologiques au cours de la lactation pour les primipares. Données issues de la base de données alimentant l'évaluation génétique.	48
14	Evolution des paramètres morphologiques au cours de la lactation pour les multipares. Données issues de la base de données alimentant l'évaluation génétique.	48
15	Evolution du poids prédit par les équations p_1 du tableau 12 pour les primipares et multipares.	52
16	Distribution des prédictions par le modèle 5 pour les primipares. .	56

17	Distribution des prédictions par le modèle 5 pour les multipares. . .	57
18	Évolution au cours de la lactation des poids prédits sur les données issues de l'évaluation génétique (primipares).	60
19	Évolution au cours de la lactation des poids prédits sur les données issues de l'évaluation génétique (multipares).	60
20	Évolution du poids moyen prédit entre lactations pour les différents modèles.	61
21	Évolution du poids moyen selon l'année de classification (primipares).	62
22	Évolution du poids moyen selon l'année de classification (multipares).	63
23	Poids prédits au cours de la lactation pour les primipares et multipares.	65
24	Production observée (contrôle laitier) au cours de la lactation pour les primipares et multipares.	66
25	Ingestion prédites au cours de la lactation pour les primipares et multipares.	66
26	Poids prédit fonction de la production.	68
27	Ingestion théorique fonction de la production.	69
28	Indices de consommation moyens au cours de la lactation pour les primipares et multipares.	70
29	Corrélations des différentes variables avec l'indice de consommation au cours de la lactation, pour les primipares.	71
30	Corrélations des différentes variables avec l'indice de consommation au cours de la lactation, pour les multipares.	71
31	Schéma proposé pour l'exploitation future des poids prédits.	74

Liste des tableaux

1	Caractères morphologiques pris en compte et meilleur R^2 obtenus dans les études basées sur la classification linéaire.	22
2	Caractères évalués lors de la classification linéaire des vaches laitières (Vanderick <i>et al.</i> , 2015).	28
3	Matrice de corrélation des données de Laloux (2008).	29
4	Sous-modèles utilisés lors de la construction du modèle de Laloux (2008).	29
5	Equations finales de Laloux (2008)	30
6	Statistiques descriptives des données brutes	33
7	Primipares : valeurs propres de la matrice de corrélation.	37
8	Primipares : coefficients de corrélation.	37
9	Multipares : valeurs propres de la matrice de corrélation.	37
10	Multipares : coefficients de corrélation.	37
11	Corrélations des variables prédictives avec le poids vif pour les primipares et multipares. Ces corrélations sont calculées sur l'ensemble des données : anciennes et nouvelles.	46
12	Équations calculées sur les nouvelles données, avec R^2 d'ajustement.	51
13	Résultats finaux de la validation croisée.	54
14	Statistiques descriptives des poids prédits sur les données issues de l'évaluation génétique.	56
15	Corrélations entre les poids prédits par les différents modèles et les variables prédictives.	58
16	Corrélations entre les prédictions effectuées sur les données issues de l'évaluation génétique.	59
17	Statistiques descriptives des prédictions d'ingestion et d'efficience.	64

1 Introduction générale

Le lait et ses dérivés représentaient en 2015 14% de la valeur des productions agricoles dans l'Union Européenne (Commission Européenne - Agriculture et développement rural, 2017b). Vu cette importance économique, la Politique Agricole Commune (PAC) a depuis les origines soutenu l'élevage laitier. A partir des années 1960, elle a encouragé la production en grande quantité pour accompagner la demande croissante. A ce rythme, en 1983, l'autoapprovisionnement atteignait 120%, à tel point que les autorités publiques devaient stocker, pour un coût farouche, de grandes quantités de beurre et de poudre qui ne trouvaient pas preneur sur le marché mondial. A partir de l'introduction des quotas laitier en 1984, l'Europe connut une ère de relative stabilité des volumes produits et des prix pratiqués, permettant d'améliorer la qualité des produits et de développer des filières de qualité différenciées. Toutefois, afin de mettre les politiques européennes en conformité avec les accords de l'Organisation Mondiale du Commerce, les réformes de la PAC de 2000 et 2003 ont visé à diminuer le soutien public direct, et par conséquent à mettre fin au système de quotas et de prix garantis (Pflimlin, 2008).

Cette décision a été appliquée progressivement par une augmentation des quotas afin de permettre aux éleveurs d'augmenter leur production en vue de la suppression totale des quotas en 2015. La politique de soutien des prix a également été modifiée sur cette période, augmentant progressivement l'exposition du marché européen au marché mondial. Il en a résulté une plus grande volatilité des prix. Ainsi, après avoir atteint des sommets en 2007, ils sont retombés en 2009 à un niveau historiquement bas, conséquence de la crise financière mondiale de 2008. S'en est suivi une certaine remontée (malgré un nouveau creux en 2012) jusqu'à un nouveau sommet en 2014. Il fut suivi d'une nouvelle dégringolade pour atteindre en 2015-2016 un niveau proche de celui de 2009 (Commission Européenne - Agriculture et développement rural, 2017a). On constate également qu'à partir de 2007, les variations inter-annuelles des prix ont augmentées de manière importante, jusqu'à environ 20%, ce qui reste inférieur aux variations observées aux États-Unis (50%) ou en Nouvelle-Zélande (70%) (Parc Naturel Régional de l'Aubrac, 2013).

En parallèle à cela le mouvement de concentration des exploitations, qui ne touche pas que l'élevage laitier s'est poursuivi : les fermes sont devenues toujours plus grosses et toujours moins nombreuses. Ainsi en Wallonie, entre 1984 et 2007, le nombre d'exploitations livrant du lait a décliné de 28% tandis que le nombre moyen d'animaux par ferme doublait presque (Fabry, 2009). Cette tendance se poursuit à ce jour : entre 2014 et 2015, le nombre d'exploitations agricoles (y compris autres que laitières) a encore diminué de 0,8% dans le pays. Par contre, sur cette période, on constate un accroissement (il y a accroissement en moyenne sur les deux régions malgré une légère baisse en Wallonie) du cheptel national de bovins laitiers, qu'on peut interpréter comme la préparation des producteurs à la fin des quotas (SPF

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Economie, PME, Classes moyennes et Energie, 2014). Au niveau européen, cette tendance à la concentration existe également. On peut par exemple citer le cas du Danemark qui à partir de la fin des années 90 a transformé à grande vitesse son agriculture : le nombre moyen de vaches par ferme est ainsi passé d'environ 40 à environ 200 en très peu de temps, encouragé par une politique de crédits très agressive (Perrot *et al.*, 2011).

Bien que cette augmentation de taille soit a priori favorable à la rentabilité des exploitations par la dilution des charges de structure et la possibilité de compenser les bas prix par des livraisons plus importantes, les grèves du lait de 2009 et les différentes manifestations d'agriculteurs de l'année 2015 sont là pour nous rappeler les difficultés des éleveurs bovins de nos régions.

L'European Milk Board et l'ASBL MIG ont publiés en 2015 une étude sur le prix de revient du lait en Belgique, basée sur les données du Réseau d'Information Comptable Agricole de la Commission Européenne pour l'année 2012. Le coût de revient calculé (en considérant que le producteur est rémunéré selon le barème des ouvriers agricoles) est de 45,96 centimes d'euro par litre (en moyenne pour la Wallonie et la Flandre réunies), en tenant compte des aides. Les prévisions effectuées pour les années suivantes indiquaient un prix de revient en augmentation. Or les périodes sont rares où le prix payé aux agriculteurs dépasse 46 centimes par litre. Sur la période allant de mars 2016 à avril 2017, le revenu du travail de l'élevage laitier n'a été en moyenne que de 0,07 euro par litre (SPW - Direction Générale Opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, 2017) !

Sans entrer dans le débat sur la légitimité des prix pratiqués, la situation actuelle impose au producteur qui veut assurer la pérennité de son activité de maîtriser le mieux possible son coût de production. Les 3 principaux postes qui structurent le prix de revient du lait sont le coût du travail (25%) puis l'alimentation (18%) et le matériel et les bâtiments (18% également) (Beckers, 2015). Il paraît difficile dans le contexte actuel de diminuer encore la rémunération du travail, mais les deux postes suivants offrent des marges de progression. Le coût du matériel et des bâtiments ne sera pas abordé ici, mais des outils d'aide à la décision existent, par exemple MECACOST développé par le Centre wallon de Recherche Agronomique (CRA-W) qui permet un calcul prévisionnel du coût d'utilisation d'une machine agricole. Au niveau des possibilités de réduire le coût alimentaire, l'angle choisi pour ce travail est celui de l'efficacité alimentaire, ce qui revient à vouloir produire autant de lait avec moins d'aliments. Au delà de l'intérêt purement économique qui est évident, l'amélioration de l'efficacité alimentaire des animaux permet également de répondre à la demande sociale actuelle de protection de l'environnement et de construction d'une agriculture plus durable. Ainsi le concept d'agro-écologie, initialement développé pour les productions végétales mais qui est aussi applicable à l'élevage, vise notamment à réduire la consommation de ressources naturelles.

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Parvenir à obtenir, par la sélection ou le management des animaux à l'efficience alimentaire améliorée est un pas dans cette voie (Phocas *et al.*, 2017). En Belgique, la secteur laitier au sens large (Algemeen Boerensyndicaat, BCZ-CBL, Boerenbond, Fédération Wallonne de l'Agriculture) s'est réuni dans une "Task force durabilité" afin de proposer aux producteurs une démarche commune d'amélioration de l'impact environnemental et social de la production laitière. Pratiquement, cela passe par un catalogue de 35 mesures (non obligatoires) que les producteurs peuvent mettre en place pour améliorer la durabilité de leur production. Ces mesures se répartissent en sept groupes relatifs à : la santé animale, le bien-être animal, l'énergie, l'environnement, l'alimentation animale, l'eau et le sol, et enfin la durabilité sociale. En ce qui concerne l'alimentation animale, une des mesures propose à l'éleveur "d'optimiser l'efficacité alimentaire des ses rations en faisant procéder à des analyses des fourrages ensilés et à des calculs de rations (...)" (Task Force Interprofessionnel Durabilité pour le secteur laitier, 2013).

En France, une enquête réalisée par Chanteloube *et al.* (2015) sur l'utilisation de la notion d'efficacité alimentaire auprès de divers acteurs situés en amont de la production laitière (dans les secteurs de l'équipement, du conseil, des coopératives d'approvisionnement, des services, de la fabrication d'aliments et de la sélection génétique) a montré un grand intérêt pour ce concept. Elle a aussi révélé deux blocages majeurs qui selon les utilisateurs empêchent une plus large utilisation de l'efficacité alimentaire dans l'élevage bovin laitier et la construction de références techniques comme il en existe pour d'autres paramètres zootechniques :

- l'absence de consensus sur une mesure de référence de l'efficience,
- le manque de données d'ingestion individuelles nécessaires au calcul d'une efficacité alimentaire, quelle qu'en soit la définition choisie.

Il existe donc un intérêt indéniable pour l'amélioration de l'efficacité alimentaire des bovins laitiers, d'abord pour des raisons économiques, mais aussi pour améliorer les performances environnementales de cet élevage, souvent accusé de consommer des ressources non renouvelables (énergie, phosphore) et de produire massivement des gaz à effet de serre (Phocas *et al.*, 2014). Cet intérêt peut se traduire à la fois en terme de nutrition comme mentionné ou en terme de sélection. Cette approche a été utilisée depuis longtemps chez les monogastriques, avec un grand succès (Phocas *et al.*, 2014).

Dans ce contexte, il est donc nécessaire de développer des outils scientifiques et techniques permettant de décrire et calculer l'efficacité alimentaire des vaches laitières. Ce travail de fin d'études, mené avec la collaboration active de l'Association Wallonne de l'élevage, se propose ainsi, après une revue de la littérature, de développer des équations de prédictions du poids vif à partir de la classification linéaire et de montrer l'usage qui pourrait en être fait. Ces prédictions de poids pourront ultérieurement servir à des calculs d'efficience lorsque des prédictions ou des mesures

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

d'ingestion seront disponibles. Il sera alors possible de développer une évaluation génétique de l'efficienne des vaches laitières en Wallonie, ce qui pourrait offrir aux éleveurs un outil supplémentaire pour l'optimisation technico-économique de leurs exploitations.

2 Revue de la littérature

2.1 L'efficacité énergétique

L'élevage laitier a pour but essentiel de transformer des aliments en lait. Les coûts alimentaires sont dans ce contexte le premier poste de dépenses (Connor, 2014). Dans la situation économique actuelle qui combine volatilité des prix d'achat du lait et prix élevés des aliments, améliorer l'efficacité alimentaire des animaux pourrait être un levier important pour améliorer la rentabilité des élevages laitiers. De plus, cela contribuerait également à limiter l'impact de l'élevage sur l'environnement (Phocas *et al.*, 2014).

2.1.1 Bases biologiques de l'efficacité alimentaire

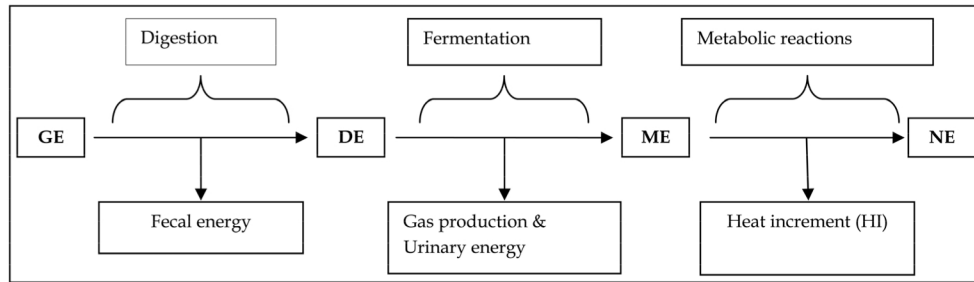
Quelle que soit la définition choisie pour l'efficacité, un certain nombre de facteurs liés directement à l'animal influencent la manière dont l'animal utilise l'énergie ingérée ou sont influencés par elle. VandeHaar (2014) souligne 4 facteurs contribuant à l'efficacité alimentaire : le rapport énergie du lait sur poids vif, le pourcentage de la vie passé en lactation, la nutrition et l'efficacité de transformation de l'énergie brute ingérée en énergie nette. Considérant des animaux en croissance, Phocas *et al.* (2014) met en évidence cinq processus biologiques majeurs qui déterminent l'efficacité alimentaire des animaux :

1. La quantité de matière sèche ingérée.
2. L'utilisation digestive de la ration.
3. L'efficacité métabolique.
4. La production de chaleur liée à l'alimentation et à l'activité physique.
5. La thermorégulation.

Il convient en plus de prendre en compte la dynamique des réserves corporelles autour de la mise bas pour les femelles reproductrices.

La quantité de matière sèche ingérée entre en compte dans la plupart des caractères utilisés pour mesurer l'efficacité, en combinaison avec la production fournie par l'animal. La transformation de l'aliment ingéré en production implique à la fois les mécanismes de la digestion dans la transformation de l'énergie brute en énergie digestible et ceux du métabolisme énergétique dans la transformation de l'énergie digestible en énergie métabolisable puis en énergie nette. La figure 1 schématise la transformation de l'énergie ingérée et les différentes pertes associées (Manafiazar *et al.*, 2012).

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE



GE : énergie brute ; DE : énergie digestible ; ME : énergie métabolisable ; NE : énergie nette.

FIGURE 1 – Partition de l'énergie absorbée.

L'ingestion est conditionnée par les besoins de maintenance et le niveau de production (National Research Council, 2001). Ces besoins de maintenance sont proportionnels au poids métabolique¹. L'augmentation du niveau de production entraîne une dilution des besoins de maintenance favorable à l'efficacité mais le phénomène est contrebalancé par la diminution de digestibilité liée à l'augmentation d'ingestion associée (VandeHaar *et al.*, 2016). Cette diminution est en partie due à l'effet physique de la quantité ingérée, mais il existe aussi une variation génétique de ce caractère (Herd et Arthur, 2009).

Le poids vif de l'animal influence l'efficacité via son influence sur la production, sur la capacité digestive et sur les besoins de maintenance. En effet, si le poids vif est corrélé avec la production laitière, le signe de cette corrélation reste sujet à discussion (Vallimont *et al.*, 2010; Veerkamp, 1998). Ces différences entre les études pourraient résulter de l'existence d'un optimum dans la relation entre poids vif et production (Manafiazar *et al.*, 2012) ou de l'existence de structures différentes dans les jeux de données. La relation entre poids corporel et efficacité est biologiquement liée aux besoins de maintenance de l'animal, puisque intuitivement, un animal lourd a besoin de plus d'énergie pour assurer son fonctionnement à l'entretien qu'un animal léger. Or, de manière générale, l'efficacité est liée à la dilution des besoins de maintenance, c'est-à-dire qu'en donnant plus de lait pour des besoins d'entretiens constants, l'animal gaspille moins d'énergie à des fins non directement productives. Évaluer l'efficacité passe donc d'une façon ou d'une autre par évaluer les besoins de maintenance, ce qui, en pratique, impose de connaître le poids vif des animaux.

La composition corporelle et le métabolisme associé influencent également l'efficacité énergétique. D'abord parce que les dépôts de graisse ou de muscles présentent des variations d'efficacité différentes. La variation est plus importante pour le dépôt maigre à cause du turnover des protéines qui a été reconnu comme associé

1. Le poids métabolique se définit comme le poids vif élevé à la puissance 0,75.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

à la sélection sur l'efficacité énergétique (Herd et Arthur, 2009). Un aspect propre aux vaches laitières concerne la mobilisation des réserves corporelles en début de lactation. Bien que le rendement de conversion des réserves corporelles en lait soit inférieur à celui de la conversion des aliments en réserves, des pertes modérées en début de lactation sont favorables à l'efficacité car elles soutiennent le niveau de production (Manafiazar *et al.*, 2012).

L'influence de l'activité des animaux s'exerce principalement par la production de chaleur qu'elle provoque, réduisant ainsi la quantité d'énergie disponible pour la maintenance et la production. Ce phénomène est mieux documenté pour les monogastriques mais en bovins, Richardson *et al.* (1999) indiquent que l'activité pourrait expliquer 10% de la variation observée de l'ingéré résiduel (rapporté par Herd et Arthur (2009)). Lié à l'activité, le comportement alimentaire (vitesse d'ingestion, nombre de repas par jour et durée des repas) contribue à expliquer jusqu'à 22% de l'ingéré résiduel selon plusieurs études citées par Connor (2014). Les animaux efficaces mangent ainsi plus lentement, font moins de repas par jour et y consacrent moins de temps que les animaux les moins efficaces.

Dans sa revue de la littérature, Connor (2014) relève également une relation possible de l'efficacité avec la composition de la micro-flore du rumen et des profils en acides gras volatils associés, mais les études actuelles sont peu nombreuses. Sur des animaux de type viandeux, Guan *et al.* (2008) ont étudié la relation entre les populations bactériennes du rumen, les concentrations en acides gras volatils dans le rumen et l'ingéré résiduel. Leurs résultats indiquent que des différences existent dans les espèces présentes entre les animaux efficaces (ingéré résiduel bas) et les animaux non-efficaces (ingéré résiduel élevé). Leur analyse des acides gras volatils montre que les animaux efficaces présentent des concentrations en butyrate et en valérate supérieures, et que la concentration totale en acides gras volatils présents dans le rumen et en acétate est supérieure chez ces animaux. Ces différences suggèrent une activité fermentaire plus grande chez ces animaux efficaces, fournissant ainsi pour la même ingestion plus d'énergie aux différents tissus. Afin de développer les connaissances sur ce sujet, un projet de recherche français initié en 2016 vise à investiguer le lien entre efficacité et micro-flore digestive mais aussi à étudier les relations entre ces paramètres et le méthane émis par les animaux (INRA, 2016). Toutefois, peu de résultats ont jusqu'ici été publiés.

2.1.2 Définir l'efficacité énergétique

La notion d'efficacité énergétique, ou alimentaire, veut caractériser la manière dont l'animal utilise l'énergie ingérée à des fins de production. Si la compréhension intuitive du concept paraît simple, il est plus difficile de définir une grandeur qui en reprenne les différents aspects et qui soit adaptée à la sélection génétique.

Une première manière de voir les choses est de dire que l'animal le plus efficace

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

est celui qui produit le plus de lait par rapport à son poids métabolique. Toutefois, le potentiel de production augmente en général avec le poids vif et ce critère n'est pas très déterminant en pratique (Peyraud *et al.*, 2009).

Dans une revue de la littérature qu'ils ont consacrée à l'efficacité énergétique, Berry et Crowley (2013) distinguent deux types de grandeurs pouvant mesurer l'efficacité énergétique en élevage bovin :

1. Des ratios, qui consistent à diviser une production (lait ou viande) par ce qu'il faut fournir pour l'obtenir (des kg d'aliment par exemple). Ce type de grandeurs est largement utilisé dans l'élevage des monogastriques sous le nom d'indice de consommation qui est égal à la quantité d'aliment fournie divisée par la production obtenue (Phocas *et al.*, 2014).
2. Des résidus, c'est-à-dire des écarts individuels d'ingestion ou de production par rapport à une prédiction tenant compte de différents facteurs caractéristiques des besoins moyens des animaux.

Ratios Toute une série de rapports peuvent représenter l'efficacité de transformation des aliments par les animaux. On en présentera ici un certain nombre après une revue des avantages et inconvénients liés à ce type de grandeurs.

Les avantages résident principalement dans la simplicité de compréhension et de calcul, pour autant que les données nécessaires soient disponibles. Les inconvénients sont nombreux et concernent plusieurs aspects. Au niveau de la sélection, la nature de ces grandeurs rend imprévisible l'effet d'une sélection sur ce critère. En effet, la valeur d'un ratio peut évoluer par modification du numérateur, du dénominateur ou des deux, avec des effets biologiques potentiellement très différents (Berry et Crowley, 2013). De plus, ces rapports sont généralement corrélés avec la croissance, la production et la taille adulte. Sélectionner sur cette base pourrait donc contribuer à augmenter les besoins de maintenance des animaux, ce qui serait contre-productif (Manafiazar *et al.*, 2012). Au niveau du métabolisme de l'animal, les ratios ne prennent pas en compte la possibilité qu'il existe des efficacités partielles potentiellement différentes pour les différents usages de l'énergie (maintenance, croissance, production, ...) De plus, la mobilisation des réserves corporelles n'est pas non plus prise en compte, or on sait que ce facteur est d'une grande importance pour la santé et la fertilité futures de la vache (Berry et Crowley, 2013).

Les paragraphes suivants présentent différents ratios proposés dans la littérature comme outils d'évaluation de l'efficacité énergétique des vaches laitières :

- L'indice de consommation est défini comme le quotient de la quantité d'aliment ingérée par la production obtenue (Phocas *et al.*, 2014). L'inverse de cette grandeur, appelée efficacité alimentaire, est parfois aussi proposée (Berry et Crowley, 2013). Il faut toutefois noter que du point de vue de l'op-

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

timisation économique, la *quantité* ingérée n'est peut-être pas le meilleur critère puisque la composition de la ration peut varier. De plus, réduire la production de la vache au seul lait, en négligeant les veaux et la viande, fait diminuer son efficacité (Peyraud *et al.*, 2009) .

- L'efficacité alimentaire peut aussi s'exprimer en termes énergétiques, par exemple par le rapport entre l'énergie du lait et l'énergie ingérée (Manafiazar *et al.*, 2012). Hurley *et al.* (2017) utilisent également un rapport de ce type, appelé efficience de conversion énergétique qui vaut $ECE = \frac{NE_l}{NEI}$ où NE_l est le besoin d'énergie pour la lactation (calculé par $NE_l = (0,054 \times FC + 0,031 \times PC + 0,028 \times LC - 0,015) \times \text{kg lait}$ où FC désigne la concentration en matières grasses dans le lait, PC celle en protéines et LC celle en lactose) et NEI est l'ingestion exprimée en terme d'énergie nette.
- Afin de tenir compte des performances de l'animal tout au long de sa vie, (Vandehaar, 1998) a proposé l'efficience sur la durée de vie ("Lifetime efficiency", LTE) qui s'obtient en divisant la somme de l'énergie capturée par l'animal (dans le lait, les veaux et les variations de poids corporel) tout au long de sa vie par l'énergie brute ingérée sur sa durée de vie. Pratiquement, le LTE sera fortement influencé par la durée des périodes improductives avant le premier vêlage et entre les suivants (Manafiazar *et al.*, 2012). Ce caractère peut être un critère de sélection à long terme, et il peut en plus être utilisé comme un outil de management, par exemple pour décider de réformer un animal lorsque son LTE diminue. Toutefois, l'acquisition des nombreuses données nécessaires à son calcul limitent l'utilisation de ce paramètre, à moins d'utiliser des estimations basées sur des normes.
- Le rapport de l'énergie ingérée NEI au poids métabolique est également utilisé comme indicateur d'efficience (Hurley *et al.*, 2017).
- Le rapport de la production laitière au poids vif ou au poids métabolique est également un indicateur d'efficience, mais la corrélation forte qui existe entre poids vif et production le rend peu utile en pratique (Peyraud *et al.*, 2009). Dans cette idée, Hurley *et al.* (2017) utilisent le ratio de Kleiber qui est le quotient de l'énergie du lait NE_l par le poids métabolique. Les mêmes auteurs définissent une efficience métabolique égale à $\frac{NEI - NE_l}{\text{Poids métabolique}}$ qui à l'avantage de tenir compte à la fois de la production, de l'ingestion et du poids vif.

Résidus La notion d'ingéré résiduel ("Residual Feed Intake", RFI) a été proposée par Koch *et al.* (1963) pour évaluer l'efficacité alimentaire des bovins viandeux en croissance. L'idée est qu'un animal doit être considéré comme plus efficace si il mange moins que la prédiction d'un modèle prenant en compte différents facteurs comme la production de lait et de matières utiles, le poids métabolique, la note

d'embonpoint (BCS), les variations de poids vif,...(Berry et Crowley, 2013). Cette grandeur est intéressante puisque plus informative que l'ingestion seule, mais présente le défaut de n'être pas très représentative de l'efficacité de production, dans le sens où le RFI ne permet pas de distinguer l'utilisation de l'énergie à différentes fins. Or certaines de ces fins sont économiquement plus importantes que d'autres. Deux animaux peuvent aussi avoir des RFI identiques alors que leurs besoins de maintenance sont nettement différents (Berry et Crowley, 2013). En terme de sélection, ce type de grandeur présente l'avantage majeur d'être par construction phénotypiquement indépendant de ses régresseurs. Par contre, le fait qu'un animal supérieurement efficace présente une valeur de RFI négative ne favorise pas la compréhension de cet index auprès du public. Un problème qui sera également à régler si le RFI s'impose comme outil de mesure de l'efficacité est la standardisation des mesures. En effet, les résultats obtenus varient selon les modalités de l'expérience, comme par exemple la durée du test, le stade de lactation au moment du test ou encore le type d'alimentation (Connor *et al.*, 2012). Il est également possible d'exprimer l'ingéré résiduel en terme d'énergie (Hurley *et al.*, 2017).

Coleman *et al.* (2010) ont proposé un critère similaire basé cette fois sur la production, et qui présente l'avantage de désigner les animaux supérieurs par un nombre positif : la production de matières utiles résiduelle ("Residual Solid Production", RSP). Il s'agit ici de considérer les résidus d'un modèle régressant la production de matières utiles dans le lait sur les puits d'énergie restants (entretien, croissance, gestation, variations état corporel,...) et l'ingestion (en kilogrammes de matière sèche). Cela revient donc à dire qu'un animal est efficace si il produit davantage que ce qu'il devrait compte tenu de ses autres besoins et de son ingestion. D'invention plus récente, le RSP a jusqu'ici fait l'objet de moins d'études que le RFI mais présente pourtant des avantages soulignés par Connor (2014). Tout d'abord le RSP est indépendant de l'ingestion, il semble plus répétable que l'ingéré résiduel sur les animaux au pâturage et enfin il est moins corrélé que le RFI avec les problèmes de fertilité et la réforme. Il serait donc un meilleur critère que l'ingéré résiduel pour sélectionner l'efficacité en maintenant un progrès en terme de production sans trop compromettre la balance énergétique en début de lactation. Comme l'ingéré résiduel, la production résiduelle peut s'exprimer également en termes énergétiques (Hurley *et al.*, 2017).

Bien que l'ingéré résiduel ait fait l'objet de nombreuses études sur les bovins laitiers (voir par exemple Van Arendonk *et al.* (1991), Veerkamp *et al.* (1995), Coleman *et al.* (2010), Prendiville *et al.* (2011), Vallimont *et al.* (2011), Waghorn et Hegarty (2011), Pryce *et al.* (2015),...). Berry et Crowley (2013) relèvent encore un certain nombre de points qui mériteraient de plus amples développements :

- L'accès à des données individuelles d'ingestion est loin d'être généralisé au vu du coût et du travail engendré. Toutefois, des travaux récents visent à

lever cette limitation en prédisant l'ingestion à partir des spectres moyen infrarouge (MIR) du lait (McParland et Berry, 2016) ou d'analyses proche infrarouge (NIR) sur les matières fécales (Huntington *et al.*, 2011). Ceci est de première importance puisqu'il faut impérativement avoir des valeurs d'ingestion pour pouvoir calculer un résidu. L'utilisation de valeurs issues de tables comme valeurs d'ingestion à l'inconvénient de poser des problèmes de corrélations phénotypiques non nulles du RFI ainsi obtenu avec ses régresseurs (notamment le poids vif) (Connor, 2014).

- Si la durée des essais nécessaires pour évaluer l'ingéré résiduel chez les bovins viandeux est bien connue, ce n'est pas encore aussi clair chez les bovins laitiers. Prendiville *et al.* (2011) et Connor *et al.* (2012) ont montrés que les RFI mesurés en milieu et fin de lactation étaient mieux corrélés avec le RFI moyen sur la lactation que les valeurs observées en début de lactation. Toutefois, les mesures tardives ne prennent pas correctement en compte la mobilisation des réserves corporelles qui a lieu en début de lactation (Berry et Crowley, 2013).
- Bien que cela concerne davantage les bovins viandeux que les laitiers, la prise en compte de la puberté lorsqu'on mesure des RFI chez les mâles est aussi un problème si ce paramètre n'est pas pris en compte dans les modèles. En effet, la puberté s'accompagne chez les mâles d'une augmentation de l'activité, donc des besoins alimentaires, et donc de l'ingestion. Sélectionner sur l'efficacité alimentaire à partir d'un essai effectué à l'âge de la puberté pourrait donc conduire à sélectionner des animaux à puberté tardive plutôt que des animaux efficaces (Basarab *et al.*, 2011).

De l'animal au système Les définitions précédentes s'intéressent à l'efficacité individuelle d'un animal, conformément au cadre de ce travail. Toutefois, par soucis d'exhaustivité, ce paragraphe veut signaler que d'autres approches de l'efficacité en élevage laitier existent, qui visent plutôt à évaluer l'efficacité en termes économiques ou à l'échelle plus large de la ferme ou même du système de production.

Comme indicateur économique, Connor (2014) propose la marge sur coût alimentaire, définie comme la différence entre le revenu total obtenu de la vente du lait et les coûts alimentaires sur une période donnée. Afin de fournir une information d'efficacité économique individuelle pour chaque vache, cette grandeur doit être calculée par jour et par vache, ce qui impose idéalement de connaître les ingestions individuelles. VandeHaar (2014) souligne également que l'efficience n'est qu'une partie de la rentabilité, et qu'il est parfois plus utile de maximiser la production pour diluer les coûts fixes de l'exploitation.

La nutrition peut également contribuer à optimiser d'autres aspects d'efficacité. Par exemple l'utilisation de l'azote ou du phosphore. Ces deux éléments se

retrouvent en effet dans l'environnement si ils sont fournis aux animaux en quantités excessives, contribuant à la dégradation de la qualité des eaux (VandeHaar et St-Pierre, 2006).

A un niveau plus vaste, VandeHaar (2014) envisage également la compétition pour les ressources alimentaires entre humains et animaux d'élevage, qui devrait s'intensifier dans le futur. Dans ce contexte, favoriser l'utilisation par les animaux de denrées non utilisables par l'homme est un enjeu important. Il cite également des études basées sur la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie, mais ceci sort largement du cadre de ce travail de fin d'études.

2.1.3 Sélectionner l'efficacité alimentaire

Bien que la nutrition et l'amélioration de la conduite d'élevage aient déjà et puissent encore contribuer à améliorer l'efficacité de l'élevage (VandeHaar, 2014), la sélection trouve également sa place dans ce but.

Sélection indirecte La sélection pour une production laitière croissante a nettement fait progresser l'efficacité de la production puisque les besoins de maintenance sont restés environ constants à mesure que la production augmentait. Toutefois, cette progression se fait avec des gains décroissants en terme d'efficacité, et il semblerait que la situation actuelle approche de la limite (Weigel *et al.*, 2014; VandeHaar et St-Pierre, 2006).

Vu la difficulté d'obtenir des informations d'ingestion individuelles, il a été suggéré, notamment par Berry et Crowley (2013) d'utiliser d'autres traits comme indicateurs d'efficacité. Par exemple, un ensemble de 4 traits déjà disponibles (production laitière, poids vif, largeur de corps et taille) permettent d'expliquer 90% de la variation génétique de l'ingestion chez des vaches laitières.

Une autre idée proposée est de sélectionner sur la taille ou le poids vif afin de diminuer les besoins de maintenance. Toutefois cette approche seule à l'inconvénient de réduire notre capacité à améliorer des traits connus comme étant économiquement importants (lait, santé) (VandeHaar, 2014). Qui plus est, la situation américaine prise en exemple par Weigel *et al.* (2014) montre que, à moins d'imposer des pénalités très importantes à ce caractère, les éleveurs continuent à favoriser des animaux de grande taille si la taille est incluse avec un poids négatif dans l'objectif de sélection, et ce malgré les désavantages que comporte cette pratique.

Dorman (2012) présente une étude détaillée de l'utilisation du poids vif dans l'index national néozélandais. Ce caractère y est intégré avec un poids économique négatif comptant pour 14,1% du total, ceci étant basé sur l'hypothèse que les coûts énergétiques de maintenance d'un animal lourd sont plus élevés (à production et ingestion constantes) et ont un impact économique néfaste. Toutefois cette approche

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

pose plusieurs problèmes. Tout d’abord, les besoins de maintenance n’augmentent pas proportionnellement au poids vif. Ensuite, il est connu que les animaux lourds peuvent produire davantage de lait. Enfin, pour un même niveau d’ingestion et de production, ce modèle récompense un animal léger simplement parce qu’il est léger, alors que le poids n’est pas à lui seul un gage d’efficacité énergétique. Il suggère plutôt de considérer le rapport du poids vif total du troupeau en kilogrammes (excluant les animaux de renouvellement) à la quantité (en tonnes) d’aliment ingérée sur une année, pour lequel il a été montré que la fourchette de valeurs de 80 à 90 conduisait à un optimum en terme de production et de rentabilité. Son analyse montre même que le revenu de la ferme peut être amélioré en sélectionnant pour des vaches plus lourdes, pour autant que deux conditions soient remplies. Premièrement, les vaches doivent être à leur optimum économique, c’est-à-dire que le rapport entre quantité de matières utiles du lait produites et poids corporel doit être entre 0,80 et 0,95. Deuxièmement, l’utilisation de la prairie et des compléments doit être optimisée. Toutefois ces considérations spécifiques au système de production néozélandais ne sont probablement pas directement applicables au contexte wallon.

Sélection directe Plutôt que d’envisager une sélection sur des critères liés, qui contribuerait à améliorer indirectement l’efficacité des animaux, on peut également envisager une sélection directe sur un trait qui soit une mesure d’efficacité. L’absence de consensus sur une définition de l’efficacité et le manque de données, notamment d’ingestion, restent toutefois des obstacles au développement de cette pratique (Dechow, 2013).

Dans la littérature, l’approche basée sur l’ingéré résiduel est souvent proposée, les ratios n’étant guère adaptés à la sélection en raison de l’impossibilité de prédire l’effet de la sélection déjà mentionnée. Avant d’utiliser ce trait dans un index de sélection, il convient de s’assurer qu’il soit répétable entre lactations, entre stades d’une lactation et entre étapes de la vie, et il semblerait qu’il le soit (VandeHaar, 2014). Les héritabilités rapportées pour le RFI varient selon le moment où est mesurée l’ingestion. VandeHaar (2014) trouve une valeur de 0,18 sur des vaches laitières en lactation alors que Pryce *et al.* (2014) rapporte des valeurs de 0,05 à 0,32 selon le mode de calcul.

La prise en compte des corrélations qui existent entre le RFI et d’autres traits d’importance économique est aussi un préalable à son utilisation comme critère de sélection, afin d’éviter de détériorer d’autres traits, essentiellement ceux liés à la fertilité femelle et à la santé (VandeHaar, 2014; Pryce *et al.*, 2014; Weigel *et al.*, 2014). Peu d’informations existent jusqu’ici à ce sujet, mais Vallimont *et al.* (2013) rapportent un effet négatif sur la fertilité, mais il n’est pas encore clair si cet effet s’explique uniquement par la mobilisation des réserves ou non (Pryce *et al.*, 2014).

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Si l'ingéré résiduel semble s'imposer comme mesure d'efficience, Van der Werf (2004) a montré qu'inclure ce trait dans un index de sélection est équivalent à y inclure les traits qui constituent le RFI, puisque ce dernier est combinaison linéaire des précédents (à savoir essentiellement la production et l'ingestion). L'ingestion et le RFI ont la même valeur économique, c'est le coût alimentaire. Toutefois, lors de l'intégration dans un index, il convient de corriger les valeurs économiques des paramètres de production qui tenaient déjà compte du coût alimentaire (Van der Werf, 2004; Pryce *et al.*, 2014).

Au vu de la difficulté d'acquérir un grand nombre de phénotypes, la génomique paraît très utile pour réduire le nombre de phénotypages nécessaires (Dechow, 2013; Weigel *et al.*, 2014). Des projets internationaux visant à constituer une population de référence (donc à la fois génotypée et phénotypée) sont d'ailleurs en cours.

Il a aussi été proposé d'utiliser l'efficience (au sens d'ingéré résiduel) mesurée sur les génisses en croissance comme indicateur de l'efficience future des vaches en lactation, ce qui facilite l'acquisition des données d'ingestion (Connor, 2014). Pryce *et al.* (2014) rapportent des héritabilités de 0,22 à 0,38 dans ce contexte, ce qui offre la possibilité de sélectionner sur ce trait. La combinaison de cette approche avec la génomique est également possible si il est possible de fournir des GEBV suffisamment fiables aux yeux des utilisateurs. Les fiabilités rapportées actuellement vont de 0,49 à 0,62 (Pryce *et al.*, 2014). Il faut toutefois noter que de grandes différences existent entre une génisse en croissance et une vache en lactation quant à l'utilisation de l'énergie ingérée et à la mobilisation des réserves corporelles. Le lien entre l'efficience mesurée à un stade et celle observée à l'autre stade doit donc encore être approfondi (Pryce *et al.*, 2014).

Toujours dans l'idée de rechercher des indicateurs d'efficience qui simplifient l'acquisition des données, Connor (2014) indique que la thermographie infra-rouge et les dosages plasmatiques de l'IGF-1, des acides gras non-estérifiés ou du β -hydroxybutyrate sont des outils potentiellement pertinents. Dans ce contexte un projet de recherche récent (Agence nationale de la Recherche, 2015) propose, entre autres aspects, de rechercher des indicateurs de l'efficience qui soient faciles à mesurer en ferme, afin de faciliter le développement de la sélection sur l'efficience.

A travers le monde, plusieurs programmes de sélection nationaux intègrent déjà une mesure d'efficience. Il peut s'agir du poids vif déduit de la morphologie (comme aux USA, en Australie, en Nouvelle-Zélande ou aux Pays-Bas), de l'ingestion (comme par exemple aux Pays-Bas) ou encore d'un trait plus sophistiqué. Ainsi l'Australie a récemment développé une nouvelle valeur d'élevage "feed saved" qui utilise une prédiction génomique du RFI et une estimation des besoins de maintenance basée sur la morphologie. Aux Etats-Unis, le trait adopté est obtenu en soustrayant à la production laitière le coût alimentaire de maintenance, donnant une image plus économique de l'efficience (Peter, 2016). Pour l'avenir, il est

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

probable que le développement de populations de références génotypées conduise à une plus large diffusion des évaluations génétiques pour l'efficacité alimentaire, vraisemblablement mesurée comme une ingestion résiduelle (RFI).

2.1.4 Nutrition, management et efficacité

Au cours du vingtième siècle, l'amélioration du management et de la nutrition des animaux, combinés à la sélection pour une plus grande production, ont contribué à améliorer grandement l'efficacité de l'élevage laitier. Ainsi, entre 1960 et 2003, la production laitière américaine a progressé d'environ 2% par an. La quantité d'aliments ingérée par les animaux a également augmenté au cours de cette période, mais à un rythme inférieur. Dans le même temps, l'efficacité alimentaire a progressé de 0,91 à 1,20 $\frac{\text{kg L}_4}{\text{kg MS ingérée}}$ (Eastridge, 2006).

Le management de la reproduction du troupeau a un impact sur l'efficacité de par son action sur les périodes improductives ; cet effet sera donc plus marqué si l'efficacité est mesurée par un paramètre intégré sur la vie de l'animal, comme le LTE défini préalablement. Ainsi, dans les systèmes américains très intensifs, Van-deHaar et St-Pierre (2006) indiquent qu'allonger les lactations et donc l'intervalle de vêlage améliore l'efficacité par 3 mécanismes. Premièrement, cela améliore le rapport $\frac{\text{jours secs}}{\text{jours en lactation}}$ sur la vie de la vache, ensuite cela réduit les problèmes de santé liés au vêlage et les soucis de fertilité puisqu'il y a, sur une période donnée, moins de vêlages et d'inséminations au niveau du troupeau. Toutefois, dans les systèmes herbagers, le principe d'un veau par an et par vache garde pour eux sa valeur car il permet de grouper les vêlages et augmente le pourcentage de temps passé en pic de lactation. Les mêmes auteurs indiquent la possibilité théorique de gagner en efficacité en maximisant la croissance des génisses pour diminuer l'âge au premier vêlage afin de minimiser les temps improductifs sur la vie de la vache. Toutefois, en considérant le surcout alimentaire occasionné, cette option perd de son intérêt.

Au niveau de la nutrition, favoriser l'ingestion afin de soutenir un niveau de production élevé est favorable à l'efficacité puisque cela contribue à la dilution des besoins de maintenance. Par exemple, un essai mené à l'école supérieure d'agriculture Aeres de Dronten (Pays-Bas) a montré qu'un repoussage plus fréquent (jusque 11 fois par jour grâce à un robot) améliorerait l'ingestion et augmenterait l'efficacité exprimée en terme de production laitière rapportée à la quantité de matière sèche ingérée (Visser, 2017). Toutefois, ce phénomène est en partie contrebalancé par la diminution de digestibilité qui s'observe lorsque le niveau d'ingestion augmente. Cet effet serait dû à des modifications au niveau du rumen. Au niveau de la microfaune ruminale, l'activité des bactéries est surtout modifiée par le pourcentage de concentrés dans la ration, mais le niveau d'ingestion semble exercer peu d'influence, et l'effet sur les protozoaires est discuté. Pour ce qui est d'un effet mécanique, on

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

sait que c'est la taille des particules et le temps de rétention de celles-ci qui dictent l'efficacité de l'action des micro-organismes. Or lorsque la quantité ingérée augmente, les particules sont moins mastiquées et donc de plus grande taille, offrant moins de surface à l'attaque des micro-organismes du rumen. De plus il existe une relation négative entre temps de rétention dans le réticulo-rumen et ingestion, qui s'explique par le volume limité de celui-ci (Doreau *et al.*, 2000). VandeHaar et St-Pierre (2006) chiffrent cette perte de digestibilité par rapport à la digestibilité observée sur un animal à l'entretien : pour une ingestion exprimée en multiples des besoins de maintenance, la perte vaut

$$4\% \times (\text{Ingestion} - 1)^{0,8}$$

La manière dont est servie la ration est aussi de nature à influencer l'efficacité d'utilisation des aliments. Ainsi l'utilisation de ration totale mélangée (RTM), bien que théoriquement avantageuse, est de nature à diminuer l'efficacité alimentaire si il n'existe aucune adaptation aux besoins individuels, lesquels évoluent au cours de la lactation. Un tel système ne peut donc pas à la fois maximiser production et efficacité. Si la ration est formulée pour les hautes productrices, les vaches ayant une production inférieure recevront un certain excès, entraînant du gaspillage. Dans le cas contraire, certaines vaches seront empêchées d'exprimer leur potentiel, or on sait qu'une production élevée est favorable à l'efficacité (VandeHaar, 2014).

Afin d'optimiser l'utilisation des aliments, divers additifs ont été proposés pour améliorer de l'efficacité. Le Règlement CE/1831/2003 définit un additif comme « toute substance, micro-organisme ou préparation, autres que les matières premières pour aliments pour animaux et les prémélanges, délibérément ajoutés aux aliments pour animaux pour remplir notamment une ou plusieurs fonctions parmi les suivantes :

- Avoir un effet positif sur les caractéristiques des aliments pour animaux,
- Avoir un effet positif sur les caractéristiques des produits d'origine animale,
- Avoir un effet positif sur la couleur des poissons ou des oiseaux d'ornement,
- Répondre aux besoins nutritionnels des animaux,
- Avoir un effet positif sur les conséquences environnementales de la production animale,
- Avoir un effet positif sur la production, le rendement ou le bien-être des animaux, notamment en influençant la flore gastro-intestinale ou la digestibilité des aliments pour animaux,
- Avoir un effet coccidiostatique ou histomonostatique. »

Afin de lutter contre les résistances aux antibiotiques, la législation européenne, par la directive 1996/22/CE modifiée par les directives 2003/74/CE et 2008/97/CE, interdit depuis 2006 l'utilisation d'antibiotiques comme promoteurs de croissance. Toutefois, leur usage à cette fin reste courant dans le reste du monde. Certains

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

antibiotiques restent toutefois autorisés comme additifs de part leur action cocci-diostatique ou histomonostatique sur les volailles.

En pratique, les substances ayant un effet tampon sur le pH du rumen, comme le bicarbonate de sodium, sont largement utilisées dans l'alimentation des vaches laitières hautes productrices consommant une ration pauvre en fibres (Eastridge, 2006). Ceci est favorable car cela améliore le fonctionnement ruminal, ce qui est propice à une utilisation optimale de la ration.

Les antibiotiques de la classe des ionophores (monensine, lasalocide, ...) ont démontré leur efficacité depuis les années 1970 (McGuffey *et al.*, 2001). Les bénéfices retirés d'un traitement avec une telle molécule sont de trois types :

- Ils augmentent l'efficacité de l'utilisation de l'énergie par les bactéries du rumen en augmentant la proportion de propionate produite et en diminuant le méthane émis. On arrive ainsi à augmenter la digestibilité de 2% en moyenne.
- Ils améliorent l'efficacité de l'utilisation de l'azote. Bien que la protéolyse ne soit pas affectée, les ionophores font diminuer la production d'ammoniac et augmentent la proportion d'azote d'origine alimentaire qui atteint la caillette. La digestibilité apparente de l'azote est également améliorée
- Ils diminuent le risque de pathologie digestive/métabolique (acidose ruminale, cétose, ...).

Bien que n'étant pas utilisés en médecine humaine (Moubareck *et al.*, 2003), l'usage des ces produits dans un but zootechnique est désormais interdit en Europe, mais reste très courant en Amérique du Nord.

Afin trouver un substitut à ces produits, des études ont été menées sur l'utilisation de levures comme stimulateurs de l'efficacité (Schingoethe *et al.*, 2004; Eastridge, 2006; Moallem *et al.*, 2009; Chaucheyras-Durand *et al.*, 2016), avec des résultats positifs : l'utilisation de ces levures comme compléments alimentaires augmente l'ingestion (ce qui est favorable) et améliore l'utilisation des fibres.

2.1.5 Prédire l'ingestion et l'efficacité à partir du lait

Constatant un intérêt croissant pour l'évaluation de l'efficacité énergétique des animaux et la difficulté d'acquérir suffisamment de données d'ingestion, certains auteurs ont voulu prédire des traits d'efficacité ou l'ingestion à partir d'échantillons de lait, qui sont beaucoup plus faciles à obtenir.

La spectrométrie infrarouge est devenue une technique courante dans le domaine agro-alimentaire en général, et en particulier pour analyser des échantillons de lait. Cette technologie est par exemple utilisée par les laboratoires de contrôle laitier. De manière générale, les techniques de spectroscopie utilisent l'interaction entre une onde électro-magnétique et la matière pour déterminer la composition de cette dernière par enregistrement des longueurs d'ondes absorbées. Les différentes

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

techniques spectroscopiques sont classées selon le niveau d'énergie du rayonnement utilisé, mais on ne considérera ici que la spectrométrie infrarouge. Dans le domaine agronomique, la spectrométrie moyen infrarouge (MIR) et la spectrométrie proche infrarouge (NIR) sont utilisées. La première produit des bandes d'absorbance qui correspondent aux vibrations fondamentales des molécules alors que celles de la seconde correspondent aux harmoniques de ces vibrations. Il en résulte que les spectres NIR peuvent être surchargés par l'abondance des harmoniques, ce qui réduit la qualité de la méthode. De plus, les spectres NIR sont plus sensibles à la structure physique de l'échantillon et à sa teneur en eau. Il en résulte que c'est la technologie MIR qui est utilisée par les laboratoires. Néanmoins, les analyseurs NIR sont beaucoup moins chers et pourraient donc être utilisés en ferme (McParland et Berry, 2016). Par exemple, Kawasaki *et al.* (2008) ont proposé d'intégrer un analyseur de lait NIR à un robot de traite afin de permettre à l'éleveur de suivre en direct la qualité de son lait. Dans un autre domaine, des machines de récolte de fourrages sont déjà équipées de tels capteurs, évaluant la qualité des matières ensilées dès la récolte.

Une grande variété de composés peuvent être déterminés dans le lait à partir du spectre MIR comme par exemple les matières grasses, les protéines, le lactose, le profil en acides gras ou encore des minéraux (McParland et Berry, 2016). Le ratio matières grasses sur protéines est souvent proposé comme indicateur de la balance énergétique (Friggens *et al.*, 2007). Ceci s'explique par le fait que lorsque la balance énergétique de la vache est négative, c'est-à-dire lorsqu'elle consomme plus d'énergie qu'elle ne peut en ingérer, celle-ci mobilise ses réserves corporelles sous forme de triglycérides. Une partie de ceux-ci passe dans le lait, faisant augmenter la concentration en matières grasses. On peut également observer dans une telle situation une augmentation des acides gras en C18 dans le lait et une diminution de la synthèse d'acides gras par la glande mammaire. Or puisqu'on sait doser les différents acides gras par spectrométrie MIR (Soyeurt *et al.*, 2006, 2011), il est potentiellement possible de prédire le statut énergétique d'une vache à partir de la composition de son lait. McParland et Berry (2016) montrent que si l'on définit l'efficacité énergétique comme l'ingestion d'énergie résiduelle (REI), ce trait ne diffère de la balance énergétique que par la prise en compte de la mobilisation des tissus corporels. Si la variation de poids vif est nulle, la corrélation entre ces deux traits est environ 1. Donc si on peut prédire la balance énergétique, au vu des corrélations, on doit aussi pouvoir prédire l'énergie ingérée résiduelle.

Dans leur revue de la littérature, les mêmes auteurs relèvent plusieurs obstacles à franchir pour prédire correctement l'ingestion ou l'efficacité à partir des spectres du lait :

- La lien entre l'échantillon et le phénotype recherché n'est pas direct. On entend par là qu'il peut exister un décalage temporel entre une modification

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

d'ingestion et la modification de la composition du lait qui s'en suit. Une manière de contourner ce problème serait d'utiliser un échantillon composite issu par exemple de deux traites (Dehareng *et al.*, 2012).

- Les méthodes de références utilisées pour calibrer les équations de prédictions ne sont pas indemnes d'erreurs.
- Vu la difficulté d'obtenir des mesures individuelles d'ingestion, les jeux de données disponibles pour les calibrations sont en général de taille limitée.
- Il y a un certain nombre de facteurs qui influent sur le phénotype qu'on veut prédire qui ne sont pas pris en compte, comme la composition de la ration et les besoins autres que l'énergie (protéines, minéraux,...).

McParland et Berry (2016) présentent également une synthèse des résultats qu'ils ont obtenus entre 2011 et 2015. Tous ont été obtenus à partir de deux troupeaux expérimentaux, l'un en Irlande nourri à l'herbe et l'autre au Royaume-Uni, alimenté avec une ration totale mélangée (RTM). Sauf mention contraires, les résultats présentés ont été obtenus en validation croisée. Pour ce qui est de la prédiction de l'ingestion d'énergie, les corrélations obtenues vont de 0,73 à 0,88 pour les vaches en RTM et de 0,64 à 0,76 pour les animaux au pâturage. Dans les deux cas, inclure la production laitière améliore la capacité prédictive. En ce qui concerne la balance énergétique, la prédiction est moins bonne, avec des corrélations allant de 0,67 (système à l'herbe) à 0,78 (système RTM) et l'inclusion de la production dans le modèle n'améliore que très peu les valeurs. La prédiction de l'efficacité (définie ici comme l'ERI) donne des corrélations de 0,48 à 0,60 lors d'une validation externe. Ces valeurs n'étaient pas non plus améliorées en ajoutant la production au modèle. On voit donc que malgré un nombre de données assez limité, il est possible de faire des prédictions assez précises par cette méthode.

Au niveau pratique, des applications sont possibles pour la sélection et pour le management quotidien d'un troupeau. Pour la sélection, l'importance du coût alimentaire dans le prix de revient du lait justifie l'importance de l'inclusion de l'ingestion dans les objectifs de sélection. Il est bien connu (Berry et Crowley, 2013) qu'une variation génétique suffisante pour permettre une sélection sur ce trait existe au niveau de l'ingestion. Pour intégrer un caractère dans un objectif de sélection, il faut lui attribuer une valeur économique. Pour l'ingestion, c'est le coût alimentaire, et celle de la balance énergétique a été étudiée par Wall *et al.* (2008).

En termes de management, ce genre de technologie est utile pour l'éleveur si elle peut fournir des infos très souvent au cours du temps (pour suivre précisément l'évolution des paramètres énergétiques et d'ingestion au cours du temps, au niveau du troupeau voire au niveau individuel) et cela pour un coût très modéré. McParland et Berry (2016) indiquent par exemple la possibilité de prélever tous les deux à trois jours un échantillon du tank à lait qui serait alors analysé. Ils pré-

sentent aussi la possibilité d'utiliser les informations sur le statut énergétique des animaux pour optimiser la gestion d'un pâturage tournant. En effet, on pourrait ainsi déterminer si la surface allouée est suffisante, mais aussi identifier les parcelles nécessitant une attention supplémentaire : fertilisation, sursemis. En effet, si les vaches n'ont pas assez à manger ou mangent une herbe de qualité insuffisante, leur statut énergétique changera, et donc la composition du lait changera. Bien que n'en étant qu'à ses balbutiements, cette approche semble pleine de promesses !

2.2 Acquisition du poids corporel

Le poids vif des bovins est depuis longtemps un sujet d'étude, car il influence grandement les besoins alimentaires des animaux, mais aussi parce qu'il est corrélé avec d'autres traits d'importance économique. Dans le contexte de ce travail de fin d'études, on a montré plus haut que la connaissance du poids des animaux était nécessaire à l'évaluation de leur efficacité puisque le poids conditionne en partie l'ingestion et les besoins de maintenance. Les paragraphes suivant se limitent à passer en revue les études consacrées aux bovins laitiers, mais il existe dans la littérature quantité de publications similaires relatives aux bovins viandeux.

Le principal obstacle à une utilisation plus large du poids pour la management de troupeau ou la sélection reste son acquisition. Théoriquement, elle est possible de deux manières : soit directement par pesée, soit indirectement par prédiction à partir de prédicteurs plus faciles à acquérir.

Sur le terrain, on constate que l'acquisition directe est difficilement utilisable à grande échelle, bien que ce soit la méthode la plus précise. En effet, dans les fermes commerciales, les animaux sont rarement pesés car cette opération est chronophage et parfois dangereuse lorsque les animaux ne sont pas habitués. Se basant sur ce constat, plusieurs auteurs ont proposés des méthodes de prédiction du poids corporel. Ces méthodes utilisent soit des mesures plus ou moins précises de la morphologie des animaux soit d'autres informations, comme par exemple des images des animaux.

2.2.1 Prédiction du poids vif à partir de la morphologie

On peut classer en deux catégories les études existantes selon le type d'informations morphologiques qu'elles utilisent. Il s'agit soit de mesures physiques effectuées sur les animaux (Heinrichs *et al.* (1992), Enevoldsen et Kristensen (1997) et Lukuyu *et al.* (2016)) ou bien des informations issues de la classification linéaire, c'est-à-dire d'une appréciation visuelle des animaux (Haile-Mariam *et al.* (2014), Banos et Coffey (2012) et Coffey *et al.* (2003)). Néanmoins, Koenen et Groen (1998) proposent un modèle qui mélange des paramètres mesurés (périmètre thoracique et taille) à des paramètres évalués dans la classification linéaire mais le

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

but de cette étude n'était pas de prédire phénotypiquement le poids des animaux mais uniquement de construire une évaluation génétique de ce caractère, ce qui la rend difficilement comparable aux autres (Koenen et Groen, 1998).

Les prédictions basées sur des mesures physiques (par exemple la mesure du périmètre thoracique des animaux) donnent des coefficients de détermination très élevés, ainsi un article portant sur la croissance des génisses de renouvellement en race Holstein aboutissait au début des années 1990 à des R^2 de l'ordre de 98% (Heinrichs *et al.*, 1992). Toutefois ces mesures ne sont pas pratiquées en routine dans les élevages et ces équations peuvent donc difficilement s'intégrer à un système d'évaluation génétique ou être employées comme outil de management.

A contrario la classification linéaire est largement pratiquée en Wallonie (et ailleurs dans le monde), principalement sur les primipares, et cette information est utilisée en routine dans le système officiel d'évaluation génétique. Ainsi en 2015, 13235 vaches dont 9454 primipares ont été classifiées (awé, 2015). Depuis 2010 on enregistre également la note d'état corporel (BCS, Body Condition Score) sur une échelle allant de 1 (animal émacié) à 9 (animal gras), information qui peut également contribuer à prédire le poids vif (Enevoldsen et Kristensen, 1997). Le couplage de cette mesure avec le contrôle laitier a été essayé par le passé (Bastin *et al.*, 2007) mais elle est aujourd'hui couplée à la classification linéaire. Pour les études basées sur la classification linéaire, les paramètres pris en compte par les différents auteurs sont repris dans le tableau 1 qui reprend aussi les R^2 obtenus. Notons que la classification des animaux est effectuée par des opérateurs spécialement formés. Si on entraîne ces opérateurs à simplement évaluer visuellement le poids des animaux, il est possible d'obtenir une bonne prédiction ($R^2 = 0,60$) (Haile-Mariam *et al.*, 2014).

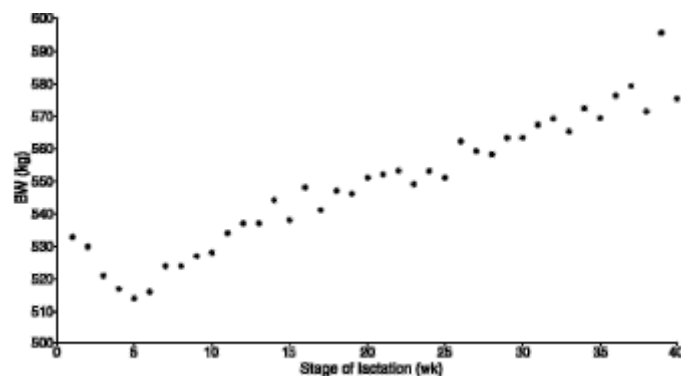
Pratiquement, les classifications ne se font pas toujours au même stade de lactation pour tous les animaux. Or le poids des animaux peut varier au cours d'une lactation en réponse aux variations de la balance énergétique. Comme le montre la figure 2, le poids diminue en début de lactation lorsque la demande énergétique est importante par rapport à l'ingestion puis remonte progressivement au cours de la lactation. Maltz *et al.* (1997) trouvent des allures équivalentes dans leur étude sur l'emploi des variations de poids vif comme outil de gestion.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

TABLEAU 1 – Caractères morphologiques pris en compte et meilleur R^2 obtenus dans les études basées sur la classification linéaire.

Caractères	R^2	Étude
Taille, qualité des os, avant-main, profondeur du pis, ligament suspenseur, largeur du museau et BCS.	0,47	Haile-Mariam <i>et al.</i> (2014)
Taille, angularité, avant-main et profondeur de corps	0,85	Coffey <i>et al.</i> (2003)
Taille, avant-main, profondeur de corps, angularité, angle du pied (ou ligament central ^a)	0,68	Banos et Coffey (2012)

a. Remplacer l'angle du pied par le ligament central conduisait au même R^2 .



Extrait de Koenen et Groen (1998).

FIGURE 2 – Poids vif moyen fonction du stade de lactation.

Les études présentées ci-dessus, bien que démontrant la possibilité de prédire le poids des animaux à partir de leur morphologie, ne fournissent pas une équation directement applicable aux données récoltées en ferme en Wallonie étant donné qu'elles ont été établies sur des populations bovines très différentes (Australie pour Haile-Mariam *et al.* (2014), troupeau de la station d'essai du Scottish Agricultural College pour Banos et Coffey (2012) ...).

En 2008 a été développé par l'awé un modèle de prédiction phénotypique du poids à partir de pesées réalisées en fermes entre 2006 et 2008 (Laloux, 2008). 370 pesées avaient été obtenues dans ce cadre, dont 43% concernaient des primipares. Les variables sélectionnées sont similaires à celles utilisées dans la littérature, et

sont de manière générale celles qui expliquent intuitivement qu’une vache est plus ou moins lourde : le bon sens indique qu’un animal plus grand et plus large devrait être plus lourd qu’un animal petit et étroit ... Une description détaillée de ce modèle est présenté à la section 3.1.

2.2.2 Un exemple d’autre outil prédictif : l’analyse d’images

Si le poids vif est déterminé à des fins de sélection, des mesures assez espacées sont suffisantes. Par contre, si le but est d’utiliser les informations de poids comme outil pour la gestion quotidienne du troupeau (Peiper *et al.*, 1993; Maltz *et al.*, 1997), il importe de pouvoir prédire le poids avec une haute fréquence, par exemple quotidiennement. Or, pour des raisons pratiques, on ne peut pas envisager de réaliser des mesures morphologiques sur les animaux à de telles fréquences. Les systèmes de pesées plus ou moins automatisés imposent aussi des contraintes aux éleveurs, de sorte qu’ils sont peu utilisés (Tasdemir *et al.*, 2011). Partant de ce constat et profitant du développement des technologies d’analyse d’images, certains auteurs ont proposés des méthodes d’estimation du poids vif ou du BCS à partir d’images des animaux. Étant données que ces méthodes ne sont pas directement utilisées dans ce travail de fin d’études, décrire les techniques employées serait excessif et seule une synthèse des résultats essentiels est présentée ici.

Bewley *et al.* (2008), reprenant l’idée de Campeneere *et al.* (2000), utilisent des mesures d’angles effectuées sur des photographies de la vache vue de dessus pour prédire le BCS, avec d’excellents résultats. En France, Fischer *et al.* (2014) ont proposés récemment une technique d’estimation de l’état corporel basée sur l’analyse d’image en trois dimensions du dos de la vache. Les corrélations entre cette prédiction et les notes d’état corporel attribuées par des opérateurs entraînés dépassent 90%. D’autres auteurs ont également proposé d’utiliser la thermographie (par exemple Keren et Olson (2007) ou Halachmi *et al.* (2013)) dans ce but. L’awé procède actuellement à l’évaluation d’un dispositif portable d’évaluation automatique du BCS fourni par la société suisse Ingenera (C. Bertozzi, communication personnelle).

Pour ce qui est de la prédiction du poids, dès le milieu des années 1990, Sakowski et Cytowski (1996) proposaient un modèle d’estimation du poids carcasse de bovins viandeux par analyse d’images. Des études sur les chevaux (Paragon *et al.*, 2000) et les porcs (White *et al.*, 2004) ont aussi visé l’estimation du poids vif. Sur des buffles (*Bubalus bubalis* L.) en lactation, Negretti *et al.* (2008) sont parvenus à prédire le poids vif avec un R^2 qui dépasse 92%. Parmi les avantages de leur technique, ils relèvent l’acquisition rapide et facile des mesures et la possibilité de mesurer des paramètres difficiles voire impossibles à mesurer manuellement, comme des angles ou des surfaces. Dans une étude similaire menée en Turquie sur des bovins de race Holstein, Tasdemir *et al.* (2011) obtiennent des prédictions du poids vif

par analyse d'images qui sont meilleures que celles obtenues à partir de mesures physiques sur les animaux, avec des R^2 atteignant 96%. Le principal inconvénient de ces études est que la définition des points utilisés pour calculer les angles et surfaces est en général manuelle. Si l'on parvient à dépasser cette limitation, ces techniques semblent offrir un grand potentiel pour obtenir des prévisions de poids vif à haute fréquence.

2.3 Relation du poids vif aux autres caractères

On a vu que le poids corporel présentait des corrélations non nulles avec les traits morphologiques, qui seront exploitées dans ce travail en vue de sa prédiction. Il est également utile de considérer les corrélations avec les traits de production et les autres traits fonctionnels d'importance économique comme la santé et la fertilité femelle afin d'évaluer les effets de l'introduction du poids vif dans un objectif de sélection.

2.3.1 Poids vif et production

La relation entre poids vif et production reste discutée. Si les animaux lourds donnent en général plus de lait (Tsuruta *et al.*, 2004), la plupart des études montrent des corrélations génétiques négatives proches de zéro entre le lait corrigé pour l'énergie (c'est à dire la quantité de lait produit en ramenant la production réelle à du lait contenant 3,5% de matières grasses et 3,2% de protéines) et le poids vif (Veerkamp, 1998; Berry *et al.*, 2003). Il en résulte que sélectionner pour une production laitière augmentée aurait un effet négligeable sur le poids vif. Corriger sur les différences de BCS entre les animaux rend ces corrélations positives, mais la diminution de BCS induite par l'augmentation de production compense et l'effet global reste négligeable (Berry *et al.*, 2003).

2.3.2 Poids vif et fertilité femelle

La relation entre poids et fertilité à également été bien étudiée. La tendance qu'ont les vaches les plus lourdes à être moins fertiles apparait dans toutes les études relevées par Haile-Mariam *et al.* (2014). Bien que les vaches plus lourdes puissent être inséminées plus tôt, un plus grand nombre d'inséminations et un temps plus long seront nécessaires à l'obtention d'une gestation, en partie à cause d'un taux de gestation inférieur à la première insémination (Berry *et al.*, 2003). Dans une expérience de sélection pour des poids vif divergents menée à l'Université du Minnesota, Hansen *et al.* (1999) rapportent également un nombre d'inséminations supérieur avant d'obtenir une gestation chez les primipares les plus lourdes.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.3.3 Poids vif et santé

L'impact du poids sur la santé a été envisagé dans la littérature selon principalement deux points de vue : l'impact sur la longévité et l'impact sur les maladies observées en début de lactation. Haile-Mariam *et al.* (2014) et Tsuruta *et al.* (2004) n'observent pas de différences en termes de longévité entre les vaches lourdes et légères, respectivement sur des données australiennes et américaines. A contrario, Hansen *et al.* (1999) observait une longévité inférieure pour les vaches lourdes dans un troupeau sélectionné sur le poids vif. Au niveau des corrélations entre le poids vif et les maladies observées en début de lactation, Frigo *et al.* (2010) rapportent des valeurs très négatives pour les corrélations du poids corporel à 60 jours de lactation avec la cétose (-0,51), les maladies métaboliques (-0,52), les maladies infectieuses (-0,81) et les autres maladies (-0,48). Les auteurs suggèrent que ces fortes liaisons seraient en partie dues au lien connu entre l'état corporel (évalué par le BCS) et la santé. Les vaches lourdes étant plus enclines à avoir un BCS élevé, elles ont donc par conséquent moins de problèmes de santé. Haile-Mariam *et al.* (2014) ont étudié la relation entre le poids vif prédit à partir de la morphologie et le ratio $\frac{\text{graisses}}{\text{protéines}}$ du lait (RGP), indicateur reconnu de la balance énergétique (Grieve *et al.*, 1986). Ses résultats indiquent que les vaches lourdes tendent à avoir un RGP moins élevé, signe qu'elles souffrent moins d'une balance énergétique négative, ce qui est cohérent avec les résultats de Frigo *et al.* (2010).

2.4 Le poids vif dans les objectifs de sélection

2.4.1 Héritabilité du caractère

Sélectionner sur un caractère implique que celui-ci soit héritable. A ce sujet, plusieurs études ont évalué l'héritabilité du poids vif. Haile-Mariam *et al.* (2014) observent des valeurs allant de 0,31 à 0,42 selon les modèles de prédiction du poids utilisés. Dans leurs données récoltées en Australie, ils observent également une tendance génétique d'augmentation du poids de 0,8kg/an, mais font remarquer qu'avant l'introduction du poids vif dans l'objectif de sélection national (affublé d'une valeur économique négative), cette tendance était de +1,5kg/an. Similairement, Banos et Coffey (2012) calculent pour le poids corporel une héritabilité de 0,38. Par contre, cinq ans plus tôt, Berry *et al.* (2003) trouvaient sur des données issues de 78 troupeaux irlandais des valeurs un peu supérieures, allant jusque 0,60 selon le stade de lactation auquel le poids était mesuré. Dans une étude plus ancienne, Koenen et Groen (1998) obtenaient une héritabilité de 0,33, en concordance donc avec les premières études citées ci-dessus. Dans tous les cas, il est certain que les valeurs obtenues permettent d'envisager une sélection sur ce trait.

2.4.2 Évaluations génétiques du poids vif

A l'origine, les objectifs nationaux de sélection concernaient principalement les traits de production. Ensuite sont venus s'y ajouter d'autres traits liés à l'efficacité économique de l'élevage laitier : la conformation, la santé, ... (VanRaden, 2004). Dans ce contexte, certains pays ont introduits le poids corporel dans leur objectif de sélection. Dans certains cas, comme en Australie ou en Nouvelle-Zélande, le poids vif est affecté d'un poids économique négatif, justifié par le fait qu'à production constante, une vache lourde a des besoins de maintenance plus grands qu'une légère (Dorman, 2012). Toutefois d'autres pays attribuent au poids corporel un poids économique positif en considérant que les vaches lourdes sont moins sujettes aux troubles de santé et de reproduction (VanRaden, 2004).

Au Pays-Bas, le poids vif fait l'objet d'une évaluation génétique depuis 2001, bien que la valeur d'élevage générée ne fasse pas partie d'un index national. Faute de pesées, la morphologie est utilisée comme indicateur du poids vif. Ainsi la valeur d'élevage pour le poids est obtenue par combinaison linéaire des valeurs génétiques relatives au caractères suivants : taille, avant-main, profondeur de corps, largeur de croupe et état d'embonpoint (CRV, 2013).

2.5 Conclusions

Au vu de ces résultats, on peut conclure qu'il existe un réel intérêt scientifique pour l'amélioration de l'efficacité alimentaire des bovins laitiers. Une variété de définitions, avec chacune leurs avantages et leurs inconvénients, mais elle traduit toujours le lien entre les besoins de l'animal et la production qu'il peut fournir. Puisque cette efficacité est par nature liée à l'équilibre entre les besoins de maintenance et la production, évaluer l'efficacité des animaux impose de connaître leurs poids.

L'analyse de la littérature fournit donc bon nombre d'études relatives à la prédiction du poids vif des bovins, par diverses méthodes. Dans le cas de la Wallonie, les travaux de Laloux (2008) ont d'ailleurs aboutis à des équations basées sur la classification linéaire qui sont actuellement utilisées en pratique. Toutefois, l'évolution de la morphologie des animaux au fil du temps impose aujourd'hui leur mise à jour, qui est un des buts de ce travail.

3 Matériel et méthodes

Parmi les obstacles à une utilisation plus large du poids corporel des animaux se trouve la difficulté d'acquérir ces poids. Le but principal de ce travail de fin d'études est de contribuer à lever cette difficulté par le développement de nouvelles équations prédictives basées sur la morphologie. Néanmoins, la construction de ces équations impose de disposer à la fois de données morphologiques et de données de poids. Les informations morphologiques sont disponibles en grandes quantités car la classification linéaire est largement pratiquée en Wallonie (awé, 2015). Par contre, hormis dans le cas d'études comme celle-ci, les poids vif ne sont pas collectés, même dans les fermes équipées d'un dispositif de pesée. Il a donc fallu mener une campagne de pesées, accompagnées d'une classification des animaux pesés.

La classification linéaire est effectuée en routine en Wallonie par les agents de l'Association Wallonne de l'élevage (awé), sur demande des éleveurs. Pour les vaches laitières (de race Holstein dans notre cas), vingt-cinq caractères linéaires sont évalués, sur une échelle de 1 à 9, auxquels il faut ajouter 8 caractères synthétiques évalués entre 0 et 100. Le tableau 2 présente la liste des caractères évalués et indique lesquels sont repris le système international INTERBULL. Une particularité du système wallon est que l'on considère également les classifications effectuées sur les animaux ayant dépassé leur première lactation. Un même animal peut donc être classifié plusieurs fois, bien que cela ne représente pas la majorité des données. Depuis 2010, les agents de l'awé qui classifient les animaux relèvent également le BCS. Ces informations servent essentiellement au conseil d'accouplements qui est fourni aux éleveurs par l'awé mais aussi à l'évaluation génétique de la morphologie (Vanderick *et al.*, 2015). Pour cette étude, des classifications ont été effectuées en plus de celles demandées par les éleveurs afin de disposer de poids et d'informations morphologiques pour le même jour.

3.1 Description du modèle de prédiction du poids actuellement utilisé en Wallonie

Puisque le but de ce travail est de développer de nouvelles équations de prédiction du poids vif des vaches laitières wallonnes, il importe de bien décrire la situation actuelle, afin de permettre de comparer le nouveau modèle obtenu à l'ancien.

Comme cela a été mentionné à la section 2.2.1, de telles équations ont été développées en 2008 par l'awé sur base d'un jeu de 370 pesées effectuées entre 2006 et 2008. Le tableau 6 présente les statistiques descriptives relatives à ce jeu de données et le tableau 3 contient la matrice de corrélation entre les variables. Dans ce dernier tableau on peut constater que des corrélations élevées existent entre les variables. Par exemple, la taille est corrélée positivement à la profondeur

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

TABLEAU 2 – Caractères évalués lors de la classification linéaire des vaches laitières (Vanderick *et al.*, 2015).

Numéro	Caractère
1	Taille ^I
2	Avant-main ^I
3	Profondeur de corps ^I
4	Profondeur de poitrine
5	Force du rein
6	Longueur du bassin
7	Inclinaison du bassin
8	Largeur des hanches
9	Largeur du bassin ^I
10	Angle du pied ^I
11	Membre postérieur, vue de coté ^I
12	Qualité des os
13	Membre postérieur, vue arrière ^I
14	Équilibre avant arrière
15	Profondeur du pis ^I
16	Écart latéral des trayons
17	Ligament suspenseur ^I
18	Texture du pis
19	Attache avant ^I
20	Placement des trayons avants ^I
21	Longueur des trayons ^I
22	Hauteur attache arrière ^I
23	Largeur attache arrière
24	Placement des trayons arrières
25	Caractère laitier ^I
Syn 1	Développement
Syn 2	Bassin
Syn 3	Membres et pieds ^I
Syn 4	Pis ^I
Syn 5	Avant-pis
Syn 6	Arrière-pis
Syn 7	Caractère laitier synthétique
Syn 8	Note générale ^I

Les traits marqués d'un I sont également repris par l'évaluation internationale Interbull.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

de corps. On constate aussi une corrélation positive de la parité avec l'avant-main et la profondeur de corps, qu'on peut expliquer par le fait que les primipares sont moins larges que leurs congénères plus âgées. La corrélation très forte entre l'âge et le numéro de lactation s'explique logiquement par le fait qu'une vache en seconde lactation est obligatoirement plus vieille qu'une vache en première lactation.

TABLEAU 3 – Matrice de corrélation des données de Laloux (2008).

	Parité	DIM	Âge	Taille	Avant-main	PFC	Angularité	BCS
Parité	1,00	0,01	0,95	0,03	0,37	0,44	0,25	0,02
DIM	0,01	1,00	0,21	0,17	0,23	0,17	0,00	0,33
Âge	0,95	0,21	1,00	0,11	0,42	0,49	0,23	0,07
Taille	0,03	0,17	0,11	1,00	0,42	0,53	0,31	0,10
Avant-main	0,37	0,23	0,42	0,42	1,00	0,58	0,15	0,27
PFC	0,44	0,17	0,49	0,53	0,58	1,00	0,16	0,07
Angularité	0,25	0,00	0,23	0,31	0,15	0,16	1,00	-0,12
BCS	0,016	0,33	0,07	0,10	0,27	0,07	-0,12	1,00

PFC désigne la profondeur de corps et BCS la note d'embonpoint.

Dans son rapport, Laloux rapporte l'utilisation la procédure STEPWISE du logiciel SAS pour ajuster différents modèles en choisissant les variables les plus explicatives. Il commence par ajuster un modèle global sur le jeu de données complet puis sépare ses données entre primipares et multipares et enfin scinde chaque groupe de parité selon le stade de lactation (avant ou après 130 jours en lactation). Le tableau 4 présente les coefficients de détermination R^2 obtenus aux différentes étapes, qui sont très élevés dans le cas des primipares et corrects pour les multipares.

TABLEAU 4 – Sous-modèles utilisés lors de la construction du modèle de Laloux (2008).

Étape	N	R^2
Données complètes	370	0,77
Primipares	160	0,81
Multipares	210	0,63
Primipares DIM \leq 130 jours	59	0,86
Primipares DIM $>$ 130 jours	101	0,73
Multipares DIM \leq 130 jours	63	0,50
Multipares DIM $>$ 130 jours	147	0,63

DIM désigne le nombre de jours en lactation.

Le modèle final de Laloux se compose donc de 4 équations, reprises dans le tableau 5, selon la parité et le stade de lactation.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

TABLEAU 5 – Equations finales de Laloux (2008) .

Cas	Équation
Primipares DIM \leq 130 jours	Poids = $-163,92 + 0,19 \times \hat{\text{Age}} + 15,89 \times \text{Taille} + 10,47 \times \text{PFC} - 13,16 \times \text{Angularité} + 21,56 \times \text{BCS}$
Primipares DIM $>$ 130 jours	Poids = $-1405,27 + 148,90 \sqrt[4]{\hat{\text{Age}}} + 6,98 \times \text{Taille} + 12,24 \times \text{PFC} - 10,04 \times \text{Angularité} + 22,60 \times \text{BCS}$
Multipares DIM \leq 130 jours	Poids = $-277,52 + 35,19 \sqrt[4]{\hat{\text{Age}}} + 3,51 \times \text{Taille} + 20,44 \times \text{Avant-main} + 12,96 \times \text{BCS}$
Multipares DIM $>$ 130 jours	Poids = $-263,06 + 23,44 \sqrt[4]{\hat{\text{Age}}} + 3,19 \times \text{Taille} + 11,61 \times \text{Avant-main} + 17,94 \times \text{PFC} + 25,22 \times \text{BCS}$

PFC désigne la profondeur de corps et BCS la note d'état corporel.

Afin d'évaluer si ce modèle produit bien une évolution du poids au cours de la lactation conforme à la réalité biologique (voir figure 2), on a appliqué les équations de Laloux (2008) et mis en graphique l'évolution du poids prédit au cours de la lactation. Le résultat est présenté sur la figure 3 et on peut constater deux problèmes : premièrement l'allure attendue n'est pas présente et deuxièmement on observe un saut lors du passage d'une équation à l'autre, ce qui n'est biologiquement pas plausible. Afin de vérifier si le problème de forme ne provient pas des données plutôt que du modèle on trace (figure 4) les graphes du poids observé moyen en fonction du nombre de jours en lactation. On peut constater que l'allure obtenue correspond bien à celle attendue d'après les études citées auparavant, avec une diminution du poids en début de lactation suivie d'une reprise progressive. Il conviendrait donc de trouver un moyen de modéliser le poids qui prenne en compte son évolution naturelle au cours d'une lactation, ce qui sera un des buts de ce travail de fin d'études.

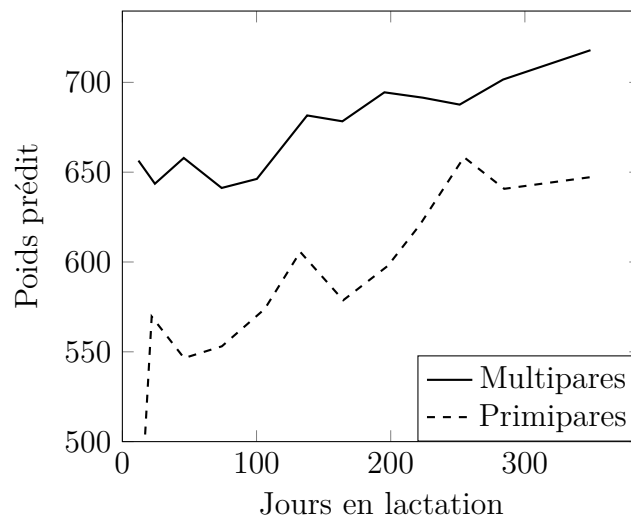


FIGURE 3 – Évolution du poids prédit par les équations de Laloux (2008) au cours de la lactation pour les primipares et multipares, sur ses données. .

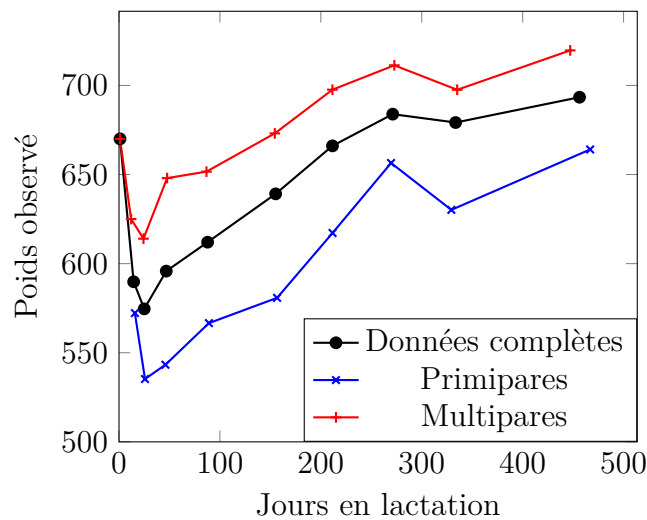


FIGURE 4 – Poids observé moyen au cours de la lactation dans les données de Laloux (2008) .

3.2 Acquisition des poids observés

Comme cela a été dit, acquérir les poids des animaux n'est pas facile en pratique pour plusieurs raisons. Tout d'abord car très peu de fermes (même expérimentales) pèsent les animaux en routine, ce qui se justifie par le temps que demande cette

mesure. Ensuite, faire peser les animaux au moyen d'une bascule mobile lors de la classification n'est pas plus simple car il peut être difficile et dangereux de faire monter sur la balance des animaux non habitués. Pour éviter ces problèmes, il a été proposé pour cette étude de cibler les fermes équipées de robots de traite de marque Lely, lesquels permettent de récupérer les poids qui sont mesurés lors de la traite (Podlahova *et al.*, 2011). Cette méthode présente l'avantage d'être rapide et peu chère. En pratique, l'acquisition pourrait encore être facilitée si le robot était configuré pour inclure dans le rapport de pesée le numéro officiel de chaque animal au lieu du numéro de travail utilisé par l'éleveur. Ceci est possible puisque le numéro officiel est utilisé par le robot pour permettre le prélèvement destiné au contrôle laitier (P. Mayeres, communication personnelle). Toutefois les modèles récents de robots de traite de cette même marque n'offrent apparemment plus la possibilité de récupérer le poids.

La ferme expérimentale du Centre des Technologies Agronomiques de Strée pratique par contre des pesées régulières des animaux. Pour ce troupeau, les animaux ont été pesés le jour de la classification au moyen de la balance dont dispose la ferme. Pour illustrer le caractère chronophage de cette activité, notons qu'il a fallu près d'une matinée pour peser les 54 animaux du troupeau.

3.3 Jeux de données utilisés

Pour que les équations recherchées aient des chances d'être suffisamment performantes, il faut que les animaux utilisés pour les élaborer et ceux sur lesquels elles seront appliquées soient assez ressemblants. En effet, intuitivement on peine à croire que la même équation puisse prédire avec une précision acceptable le poids d'une Holstein et celui d'une Jersey ! Pour cette raison et vu leur importance parmi le troupeau laitier wallon, seuls des animaux de race Holstein ont été utilisés pour cette étude. En conséquence de cela, les équations obtenues ne seront applicables que sur ces animaux. Toutefois, les méthodes utilisées ici permettrait a priori de développer rapidement les mêmes équations pour d'autres races de bovins laitiers, pour autant que des mesures morphologiques (classification linéaire) existent et que des pesées soient effectuées.

Pratiquement, dans ce travail, trois jeux de données différents ont été utilisés, seuls ou parfois combinés :

1. Les nouvelles pesées et classifications obtenues en 2017 qui ont servi à ajuster les équations.
2. Les pesées et classifications utilisées dans l'étude de Laloux (2008), acquises de 2006 à 2008, qui ont largement servis aux calculs préliminaires et à la mise au point des méthodes utilisées.
3. Un extrait de la base de données wallonne utilisée pour les évaluations

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

génétiques qui a servi, en combinaison avec des données issues du contrôle laitier à appliquer les équations développées.

TABLEAU 6 – Statistiques descriptives des données brutes

Données de (Laloux, 2008) (N=370)				
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Parité	2.34	1.73	1.00	11.00
Taille	147.47	4.30	134.00	160.00
Avant-main	5.79	1.06	2.00	9.00
Profondeur de corps	6.43	1.21	2.00	9.00
Caractère laitier	5.88	1.13	3.00	9.00
BCS	5.08	1.16	2.00	9.00
Poids	647.42	82.48	435.00	903.00
Jours en lactation	193.08	120.16	1.00	666.00
Âge au vêlage	1387.28	711.29	530.00	4851.00
Nouvelles données (N=359)				
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Parité	2.14	1.30	1.00	8.00
Taille	7.12	1.09	4.00	9.00
Avant-main	5.84	1.05	3.00	9.00
Profondeur de corps	6.36	0.76	4.00	9.00
Caractère laitier	5.83	0.78	3.00	8.00
BCS	5.64	1.24	2.00	9.00
Poids	642.12	75.10	450.00	873.00
Jours en lactation	185.97	137.44	2.00	1048.00
Âge au vêlage	1344.35	552.36	596.00	3623.00

Les données brutes présentées dans le tableau 6 ont été triées selon les règles suivantes :

- Élimination des animaux à moins de 5 ou à plus de 500 jours de lactation
- Élimination des animaux qui dépassent 5 lactations.

Le jeu de nouvelles données est le plus intéressant car il s'agit d'un échantillonnage des vaches actuelles. Il va donc servir de base pour construire les nouvelles équations. Le nombre de données collectées dans la campagne de mesure de 2017 (359) est proche de celui obtenu sur la campagne 2006-2008, malgré le délai plus court. Le nombre de fermes visitées est également comparable entre les deux séries de mesures : 6 en 2006-2008 et 7 pour 2017. Notons que la ferme expérimentale de Strée a été utilisée dans les deux études.

De la base de données alimentant le système d'évaluations génétiques wallon a été extrait un jeu de 25609 classifications linéaires non accompagnées de pesées. Ces classifications ont été effectuées entre 2006 et 2016 par l'awé. Pour les

premières années, puisque l'évaluation du BCS n'était pas systématiquement couplée à la classification, toutes les classifications n'ont pas pu être utilisées, ce qui explique que le nombre de données utilisables soit bien inférieur au nombre de classifications pratiquées sur cette période. Ce jeu de données sera d'abord utilisé comme référence pour vérifier que la variabilité présente dans les classifications de nos données est bien équivalente à celle de la population générale. Ensuite, ces données serviront à appliquer les équations de prédictions du poids qui auront été ajustées au cours de ce travail.

A partir de ce fichier, il a pu être récupéré 20271 données de contrôle laitier (lait, teneur en matière grasse, teneur en protéines). Comme les dates de classification et de contrôle ne concordent pas nécessairement, un contrôle a été affecté à une classification lorsque les deux ont eu lieu durant le même mois de la même année. Cette règle explique la diminution du nombre d'individus dans le fichier. A partir de ces informations de production, combinées aux estimations de poids, un calcul d'ingestion théorique a été effectué, permettant le calcul d'un estimateur d'efficacité. Puisqu'aucune donnée d'ingestion réelle n'est disponible, le calcul d'un ingéré résiduel n'est pas possible. C'est donc l'indice de consommation théorique, égal au quotient de l'ingestion théorique par la production (exprimée par le lait corrigé en énergie), qui a été utilisé pour évaluer l'efficacité énergétique des animaux. Cette grandeur vise à représenter la relation non linéaire qui existe entre poids et production, via le calcul d'une ingestion théorique.

3.4 Répartition des fermes échantillonnées

La localisation géographique des fermes dont sont issues ces données est présentée à la figure 5. Pour les nouvelles données, la répartition a été dictée essentiellement par la disponibilité de techniciens habitués à manipuler les robots, ainsi que par la répartition des robots en question. Pour les données anciennes, les contraintes liées à la répartition géographique des fermes ne sont pas connues. On pourrait regretter que la répartition ne soit pas plus homogène sur le restant de la Wallonie, mais ce ne fut pas possible d'un point de vue pratique. Toutefois, la répartition est-ouest est très correcte. Si cette répartition est un critère pour la préparation d'une future campagne de pesée (par exemple pour améliorer les équations proposées ici), le Sud de la province de Namur et la province de Luxembourg seraient à viser prioritairement.

3.5 Calculs et manipulations de données

Les transformations de données et les calculs ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS. Pour les diverses régressions effectuées, c'est la procédure REG qui

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES



Points rouges : données de Laloux (2008). Points verts : nouvelles données.

FIGURE 5 – Répartition géographique des fermes dont sont issues les données.

est utilisée. L'analyse en composantes principales a été effectuée avec la procédure PRINCOMP de ce même logiciel.

Les ingestions théoriques ont été calculées en utilisant la formule du National Research Council (2001). Elle estime l'ingestion de matière sèche (Dry matter intake, DMI) sur base de la production (lait corrigé pour l'énergie, FPCM) et du poids métabolique, avec une correction selon le stade de lactation. La formule utilisée pour calculer l'ingestion (en kg de matière sèche) est :

$$DMI = (0,372FPCM + 0,0968Poids^{0.75})(1 - e^{-0,192(WOL+3,67)})$$

où WOL est le nombre de semaines en lactation, poids^{0.75} est le poids métabolique et FPCM est le lait corrigé pour l'énergie qui se calcule par $FPCM = \text{Lait} \times (0,337 + 0,116MG + 0,06Prot)$ où MG et Prot sont les taux de matières grasses et de protéines en pourcents et Lait désigne la production en kg.

Dans l'exemple présenté à la section 4.4, l'efficacité alimentaire est estimée par l'indice de consommation (IC) défini au paragraphe 2.1.2. D'autres grandeurs sont présentées dans ce même paragraphe, mais l'indice de consommation a été choisi d'abord car toutes les données nécessaires à son calcul sont disponibles, et ensuite car il est très largement utilisé dans d'autres spéculations. Bien que son utilisation comme outil de sélection présente des inconvénients déjà mentionnés,

l'avantage principal cette grandeur est d'être aisément compréhensible : le rapport indique combien de kilogrammes d'aliments la vache mange par kg de lait produit. Pratiquement, il se calcule par :

$$IC = \frac{DMI}{FPCM}$$

Par soucis de rendre le discours plus continu, les méthodes de modélisation permettant de prendre en compte la variabilité des observations et de gérer l'introduction du stade de lactation dans le modèle sont présentées à la section suivante en parallèle des résultats.

4 Résultats et discussion

Partant du constat de la nécessité d'actualiser les équations de prédictions du poids utilisées à ce jour en Wallonie pour coller à l'évolution de la morphologie, les paragraphes suivants présentent les diverses analyses effectuées

Similairement à Laloux (2008) on recherche à construire des équations séparées pour les primipares et multipares. Dans la littérature, soit seules des primipares sont considérées (Koenen et Groen, 1998; Haile-Mariam *et al.*, 2014; Vanrobays *et al.*, 2015) ou une distinction est faite entre celles-ci et les vaches de parité supérieure (Enevoldsen et Kristensen, 1997; Banos et Coffey, 2012). Biologiquement, cette distinction se justifie par le fait que les primipares sont encore en croissance, ce qui fait que les relations entre poids vif et caractères morphologiques ne sont potentiellement pas les mêmes que chez les multipares.

4.1 Prise en compte de la variabilité des données

Avant de construire des équations de prédiction du poids vif, on a voulu vérifier que les données disponibles étaient bien compatibles entre elles en terme de variabilité. On désirait voir si il n'existait pas de différences trop importantes entre troupeaux au niveau de la morphologie et des poids, mais aussi vérifier que les covariances entre les variables prédictives du poids étaient semblables entre les données de Laloux (2008), les nouvelles pesées et les données utilisées par l'évaluation génétique. Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus et la méthode utilisée pour ajuster les covariances entre les jeux de données.

4.1.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales a été utilisée dans ce travail pour vérifier si certains troupeaux s'écartaient fortement des autres en termes de morphologie ou

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

si il existait parmi les données un ou plusieurs troupeaux très différents des autres. Les caractères inclus étaient : la taille, l'avant-main, la profondeur de corps, le caractère laitier et la note d'état corporel (BCS). Ces caractères ont été choisis car ils ont été utilisés par Laloux (2008) et permettent donc de réutiliser les données anciennes. De plus, ce sont ceux qui sont intuitivement liés au poids. Puisqu'on recherche des équations distinctes pour les primipares et les multipares, l'analyse a été menée de manière séparée pour ces deux groupes d'animaux.

TABLEAU 7 – Primipares : valeurs propres de la matrice de corrélation.

	Valeur propre	Proportion	Cumulé
1	2,08	0,42	0,42
2	1,17	0,24	0,66
3	0,89	0,18	0,84
4	0,52	0,10	0,94
5	0,34	0,06	1,00

TABLEAU 8 – Primipares : coefficients de corrélation.

	Composante 1	Composante 2	Composante 3
Taille	0,83	0,30	-0,005
Avant-main	0,76	-0,30	-0,06
Profondeur de corps	0,84	0,10	-0,28
Caractère laitier	0,09	0,81	0,52
BCS	0,33	-0,56	0,73

TABLEAU 9 – Multipares : valeurs propres de la matrice de corrélation.

	Valeur propre	Proportion	Cumulé
1	1,66	0,33	0,33
2	1,54	0,31	0,64
3	0,77	0,15	0,79
4	0,59	0,12	0,91
5	0,44	0,09	1,00

TABLEAU 10 – Multipares : coefficients de corrélation.

	Composante 1	Composante 2	Composante 3
Taille	0,71	0,38	0,26
Avant-main	0,72	-0,41	0,10
Profondeur de corps	0,74	0,11	-0,58
Caractère laitier	0,18	0,78	0,43
BCS	0,25	-0,78	0,41

Les tableaux 7 à 10 présentent les résultats obtenus. Dans les tableaux des

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

valeurs propres (tableaux 7 et 9), la colonne "proportion" contient le pourcentage de la variabilité des données expliquée par la composante correspond à la valeur propre et la colonne "cumulé" contient la part de la variabilité expliquée lorsqu'on considère toutes les composantes précédentes et celle de la ligne en question. On considère ici que les données sont suffisamment bien modélisées lorsque 80% de la variabilité est couverte, ce qui conduit à garder trois composantes pour les deux groupes d'animaux (pour les multipares, on approxime le 0,79 à 0,80, il serait peu judicieux de remplacer la représentation de 5 variables par celle de 4 composantes principales).

Le but de cette analyse étant, rappelons-le, de détecter parmi ceux échantillonnés un troupeau qui serait très différent des autres, les graphiques des représentations des individus dans les différents axes ont été construits.

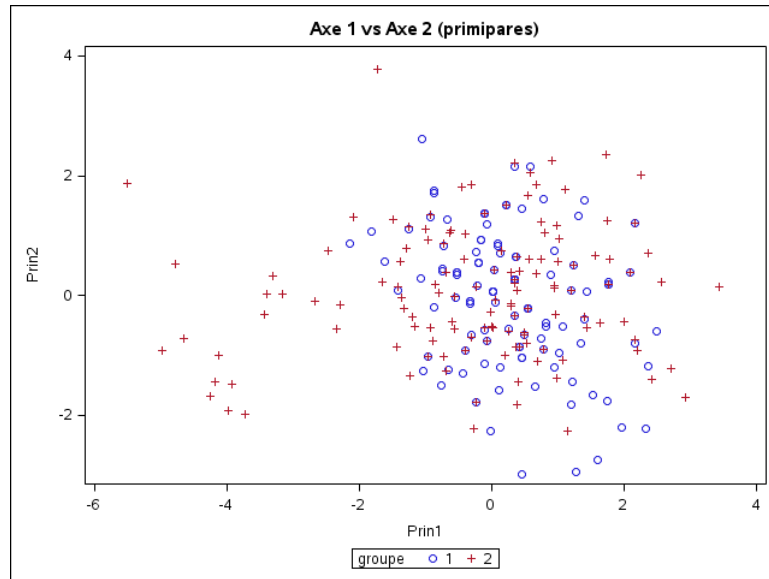
Premièrement, on a tenté de voir si il existait de grandes différences entre les données de Laloux (2008) et les nouvelles données. On voulait vérifier que les deux jeux de données n'étaient pas complètement séparés, ce qui aurait compromis leur utilisation comme un seul ensemble de données. Sur la figure 6 relatives aux primipares, on peut constater que ce n'est pas le cas. On peut également voir que la dispersion est plus importante dans les données anciennes que dans les nouvelles, alors que le même nombre de troupeaux ont été utilisés dans les deux campagnes de pesées, avec des nombres d'animaux comparables. Le même phénomène s'observe chez les multipares (graphes non représentés), mais de manière moins intense. On a donc de bons indices de la compatibilité des jeux de données entre eux car ils ne forment pas des groupes séparés lorsqu'ils sont représentés dans les plans des composantes principales.

Les représentations par troupeau sont présentées aux figures 7 pour les primipares et 8 pour les multipares. On peut y constater que de manière générale les troupeaux se recouvrent, ce qui signifie qu'ils ne présentent pas de grandes différences entre eux et qu'on peut les utiliser pour former un jeu de données cohérent. Toutefois le fait qu'il existe des points assez éloignés en marge nous indique que notre échantillonnage ne couvre peut-être pas encore toute la variabilité présente dans la population Holstein wallonne. Pratiquer des pesées supplémentaires dans d'autres troupeaux serait pour l'avenir un moyen d'y remédier.

Chez les multipares comme chez les primipares, la première composante principale présente de fortes corrélations positives avec des traits qui caractérisent le développement corporel de l'animal. Pour les années futures, si cette analyse est reproduite sur par exemple les classifications de l'année précédente, on pourrait utiliser cet axe pour détecter des animaux ou des troupeaux extrêmes en terme de morphologie, ce qui pourrait orienter les futures campagnes de pesées vers les animaux ou les fermes qui se démarquent. Cette approche permettrait de créer un échantillonnage qui couvrirait mieux la variabilité morphologique de la population

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Holstein wallonne tout en limitant le nombre de pesées nécessaires.



Bleu : nouvelles données. Rouge : données de Laloux (2008)

FIGURE 6 – Représentation des individus dans les nouveaux axes, pour les primipares.

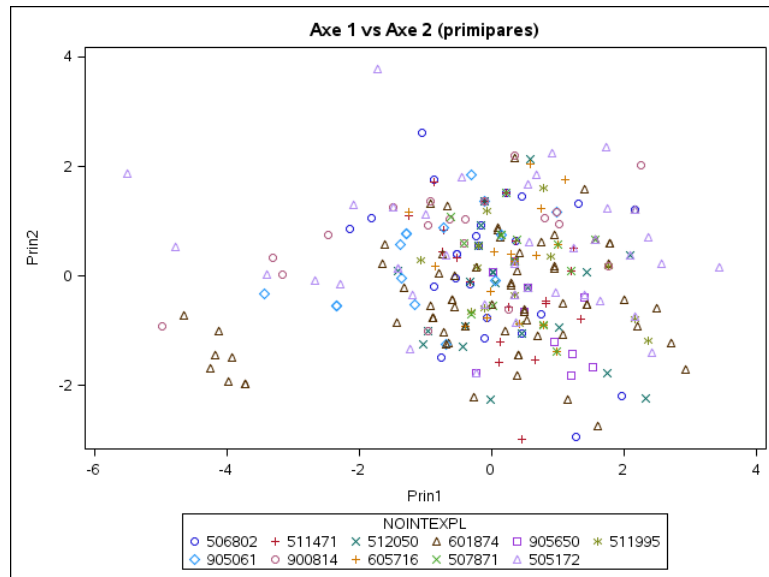


FIGURE 7 – Représentation des individus dans les nouveaux axes, pour les primipares.

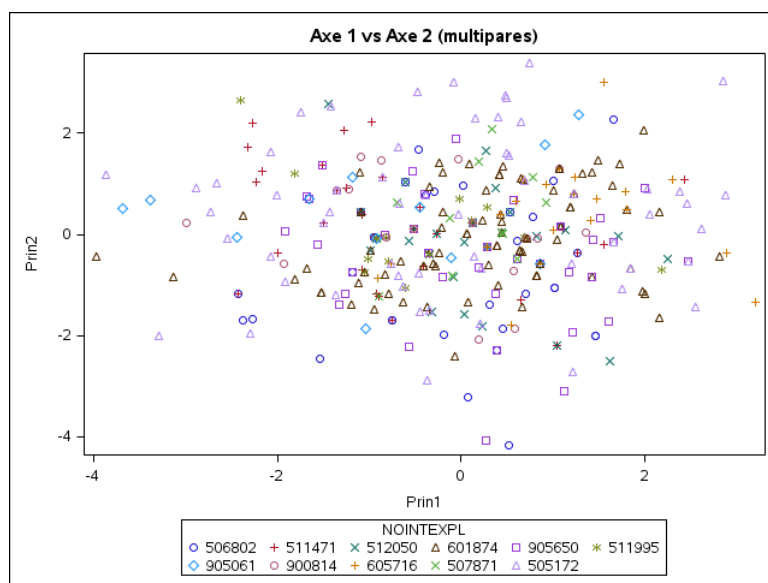


FIGURE 8 – Représentation des individus dans les nouveaux axes, pour les multipares.

Au delà des interprétations faites ici, cette approche offre des perspectives intéressantes pour la préparation de futures campagnes de pesées.

Ces analyses préalables permettent donc de penser que les deux jeux de données disponibles sont compatibles entre eux et peuvent servir à élaborer les équations. L'analyse en composante principale a été choisie comme outil pour sa facilité de mise en œuvre et car elle permet de visualiser graphiquement les résultats.

Le but de ce travail est de construire des équations de prédiction, c'est-à-dire qu'elles devront pouvoir être employées pour calculer le poids de vaches n'appartenant pas à l'échantillon pesé. Il convient donc, après avoir vérifié la qualité des données, de vérifier que celles-ci sont bien compatibles avec la population à prédire. C'est l'objet du paragraphe suivant qui examine les différences de covariances entre les nouvelles données, les données de Laloux (2008) et les données issues de la base de données alimentant l'évaluation génétiques représentatives de la population à prédire.

4.1.2 Ajustement des covariances

Le calcul des matrices de covariances des trois jeux de données à montré que celles-ci différaient sensiblement. Il a donc paru nécessaire de transformer les données pour que les trois jeux aient des structures de covariances similaires. Puisque le but de ce travail est de rechercher des équations pouvant être utilisées comme des outils prédictifs, il convient que les covariances du jeu de données servant à

élaborer les équations soient proches de celles observées dans la population à prédire. C'est donc les covariances observées sur le jeu de données issu de la base de données alimentant l'évaluation génétique qui ont été prises comme référence car elles sont plus nombreuses et couvrent donc a priori mieux la variabilité de la population.

La transformation se fait en retirant d'abord aux données les moyennes, elles seront rajoutées ensuite afin de les conserver inchangées. Ensuite, le vecteur de données est multiplié par l'inverse de la matrice de covariance du jeu de données dont il est issu, puis le résultat est à son tour multiplié par la matrice de covariance des données issues de la base de données de l'évaluation génétique. Enfin on rajoute les moyennes. Il est à noter que seules les paramètres morphologiques (avant-main, profondeur de corps, caractère laitier, taille) et le BCS subissent cette transformation, modifier les autres paramètres (âge au vêlage, parité,...) n'aurait pas de sens. La formule suivante résume la transformation effectuée :

$$\begin{bmatrix} \text{Avant-main} \\ \text{Prof. de corps} \\ \text{Car. laitier} \\ \text{Taille} \\ \text{BCS} \end{bmatrix}_i^* = [\text{COV}]_{\text{Population}} [\text{COV}]_{\text{Observées}}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Avant-main} - \overline{\text{Avant-main}} \\ \text{Prof. de corps} - \overline{\text{Prof. de corps}} \\ \text{Car. laitier} - \overline{\text{Car. laitier}} \\ \text{Taille} - \overline{\text{Taille}} \\ \text{BCS} - \overline{\text{BCS}} \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} \overline{\text{Avant-main}} \\ \overline{\text{Prof. de corps}} \\ \overline{\text{Car. laitier}} \\ \overline{\text{Taille}} \\ \overline{\text{BCS}} \end{bmatrix}$$

4.2 Prise en compte du stade de lactation

Un des défis à considérer dans la construction d'équation de prédiction du poids vif est la prise en compte du stade de lactation. En effet, on sait (Korver *et al.*, 1985) que celui-ci évolue au cours d'une lactation, en lien avec la dynamique des réserves corporelles de la vache. Les paragraphes suivants présentent d'abord l'évolution observée du poids vif en fonction du stade de lactation dans nos données, puis la manière dont cette évolution a été modélisée.

4.2.1 Évolution du poids au cours de la lactation dans nos données

Comme cela a été discuté auparavant, on s'attend à ce que le poids des vaches diminue légèrement en début de lactation puis réaugmente ensuite, parallèlement à la balance énergétique. La figure 9 présente l'évolution du poids en cours de lactation pour les primipares et les multipares, dans l'ensemble des données disponibles. On peut y constater que dans l'ensemble l'allure générale espérée est présente avec une diminution de poids après le vêlage, suivie d'une reprise plus lente. Toutefois, l'effet est nettement moins marqué chez les primipares, ce qui peut être expliqué par le fait qu'elles sont toujours en croissance. Comme attendu, les primipares sont moins lourdes que les vaches multipares. Les variations observées dans les courbes sont dues à la présence de certains animaux plus ou moins lourds dans les données.

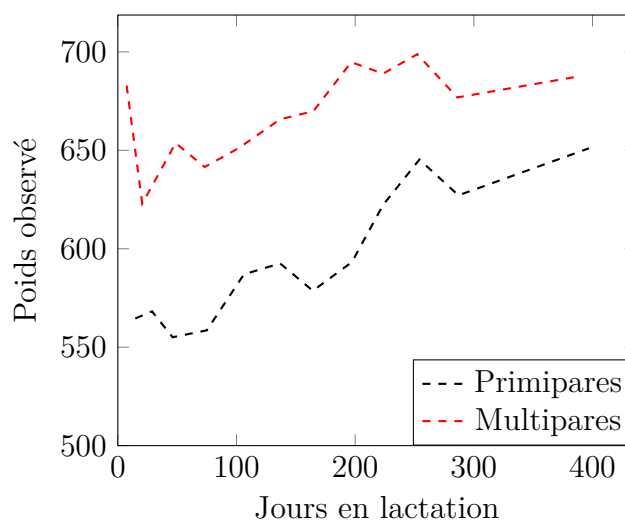


FIGURE 9 – Évolution du poids au cours de la lactation (Données anciennes et nouvelles).

L'allure observée à la figure 9, tout comme celle observée à la figure 4 ressemble à une courbe de lactation² qui aurait subi une symétrie d'axe horizontal, ce qui rejoint le constat de Korver *et al.* (1985).

4.2.2 Fonction pour l'évolution du poids au cours de la lactation

Puisque son allure est proche de celle d'une courbe de lactation inversée, il devrait être possible de modéliser l'évolution du poids vif au cours de la lactation par une fonction dérivée de celles utilisées pour modéliser les courbes de lactation.

Plusieurs types de fonction ont été utilisés dans la littérature pour modéliser les courbes de lactation (Gengler, 1996) :

- Des exponentielles du type $y = at^be^{-ct}$ où a , b et c sont des paramètres réglant l'allure de la courbe qui sont ajustés en utilisant une transformation logarithmique et où t est le jour de la lactation.
- Partant de l'idée qu'une lactation peut être découpée en différentes phases, des modèles multiphasiques du type $y = \sum_{i=1}^n (a_i b_i (1 - \tanh(b_i(t - c_i))))$ ont aussi été proposés.
- Des modèles polynomiaux du type $y^{-1} = \beta_1 + \beta_0 t^{-1} + \beta_2 t$ qui sont ajustés comme une régression multiple.

2. On appelle courbe de lactation le graphe de la production laitière quotidienne en fonction du temps. Son allure comprend une montée rapide jusqu'à un pic, suivi d'une descente lente jusqu'au tarissement.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

- Une autre approche par régression multiple a été proposée par Ali et Schaeffer (1987). Leur modèle est du type :

$$y = p_0 + p_1\gamma + p_2\gamma^2 + p_3\omega + p_4\omega^2$$

avec $\gamma = t/305$ et $\omega = \ln(\frac{305}{t})$, les paramètres p_i étant estimés par régression.

C'est le dernier modèle qui a été utilisé dans ce travail, pour sa souplesse et sa facilité d'utilisation. En effet, l'ajustement se fait simplement sans nécessiter de transformation logarithmique comme dans le cas d'une exponentielle. De plus, les différents composants de la formule peuvent être ajustés dans un modèle de régression en même temps que d'autres paramètres.

Pour que le modèle permette de prendre en compte l'effet du stade de lactation sur le poids des vaches de façon efficace, il convient de s'assurer que l'ajustement de ce modèle donne bien une allure qui corresponde à ce qu'on observe, à savoir une diminution après le vêlage suivie d'une reprise progressive. La figure 10 présente une simulation entre 0 et 305 jours de lactation de l'allure de la prédiction obtenue lorsque les équations de Ali et Schaeffer (1987) sont ajustées sur l'ensemble des multipares du jeu de données. On peut y constater que l'allure obtenue est bien celle espérée. Sur la figure 11, le même calcul a été effectué, mais les résultats sont présentés sous forme séparées entre les nouvelles et anciennes données. Dans les deux cas, le modèle fonctionne et donne une allure conforme à ce qui était espéré. Il faut toutefois noter que ces deux graphiques n'ont que vocation à évaluer les allures obtenues, les poids calculés ne doivent à ce stade pas être considérés comme corrects, puisque trop peu de paramètres sont pris en compte.

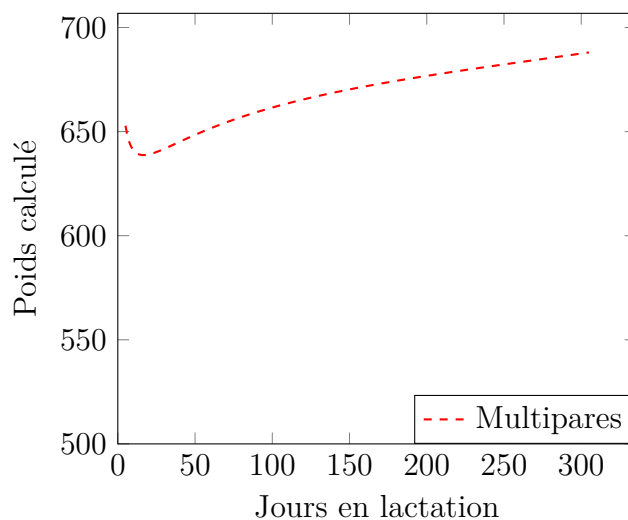


FIGURE 10 – Prise en compte du stade de lactation par l'équation d'Ali et Schaeffer (1987) pour les multipares (anciennes et nouvelles données confondues)

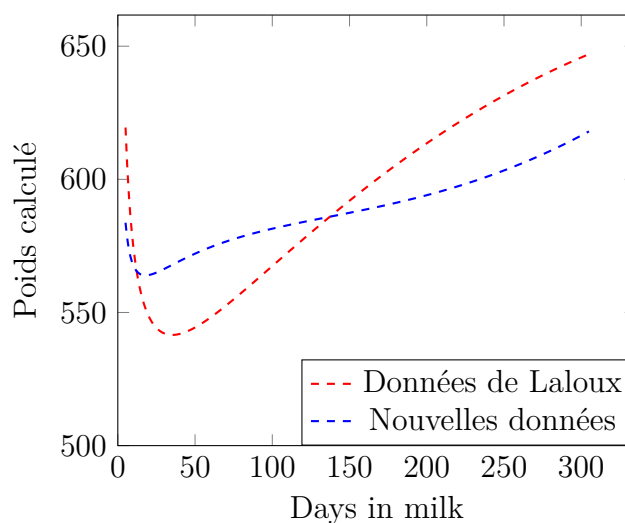


FIGURE 11 – Prise en compte du stade de lactation par l'équation d'Ali et Schaeffer (1987) pour les primipares

Il apparaît donc qu'il est possible d'utiliser cette fonction pour la prise en compte du stade de lactation dans un modèle de prédiction du poids vif. Puisque les coefficients sont évalués par régression, ils pourront être calculés en même temps que les équations de prédiction, ce qui est un avantage. Parvenir à prendre en compte correctement le stade de lactation est un premier résultat intéressant puisqu'il s'agissait d'une des limitations relevées du modèle de Laloux (2008). En effet, la stratégie utilisée dans ce travail permet d'éviter le saut qu'on observait dans les anciennes prédictions qui était du à la coupure des équations à 130 jours de lactation, coupure qui ne correspondait à aucune réalité biologique.

Les paragraphes suivants présentent la construction des nouvelles équations, le calcul des coefficients et leur validation. Ensuite ces équations seront appliquées sur les données extraites de la base de données de l'évaluation génétique pour vérifier que les prédictions correspondent à ce qui est attendu. On comparera également les prédictions des nouvelles équations avec celles des équations de Laloux (2008).

4.3 Équations de prédiction du poids vif à partir de la morphologie

Après avoir transformé les données pour les rendre plus proches de la population générale et expliqué comment prendre en compte le stade de lactation d'une manière qui permette aux équations de prédiction de modéliser correctement l'évolution naturelle du poids vif au cours du cycle de production d'une vache laitière,

les sections suivantes présentent les étapes de la construction des nouvelles équations de prédiction et les résultats obtenus.

4.3.1 Choix des modèles

Avant de construire les équations de prédiction recherchées, il est nécessaire de décider quels prédicteurs seront utilisés, et de quelle manière. Le tableau 11 montre que les variables utilisées par Laloux (2008), qui sont aussi celles le plus souvent employés dans la littérature, présentent de bonnes corrélations avec le poids. Ces variables peuvent donc servir de prédicteurs. On peut également constater qu'il existe dans ces corrélations certaines différences entre les primipares et les multipares. Par exemple, le BCS est plus corrélé avec le poids chez les multipares (0,42) que chez les primipares (0,30). On peut expliquer cela par le fait que les primipares sont encore en croissance, ce qui fait que chez elles, l'effet de l'état d'embonpoint est moins important. On constate d'ailleurs que le nombre de jours en lactation est moins fortement corrélé avec le poids chez les multipares (0,26) que chez les primipares (0,44).

La prise en compte de la croissance se fait de manière différente pour les primipares et les multipares. Pour les premières, c'est l'âge au vêlage qui est utilisé, alors qu'il est remplacé par la parité chez les secondes. Ceci est logique puisque pour une multipare, l'âge au dernier vêlage est forcément croissant avec la parité, ce qui rend ce paramètre peu informatif. Afin de ne pas complexifier excessivement le modèle, ces deux paramètres y sont introduits de manière linéaire, alors que biologiquement, le poids devrait présenter saturation pour une parité croissante puisque les animaux finissent par cesser de grandir. Toutefois, la figure 12 montre que l'évolution est très linéaire jusqu'à 4 lactations, et que la saturation ne débute qu'ensuite (et le dernier point de ce graphe est sujet à caution vu le faible nombre de données (25)).

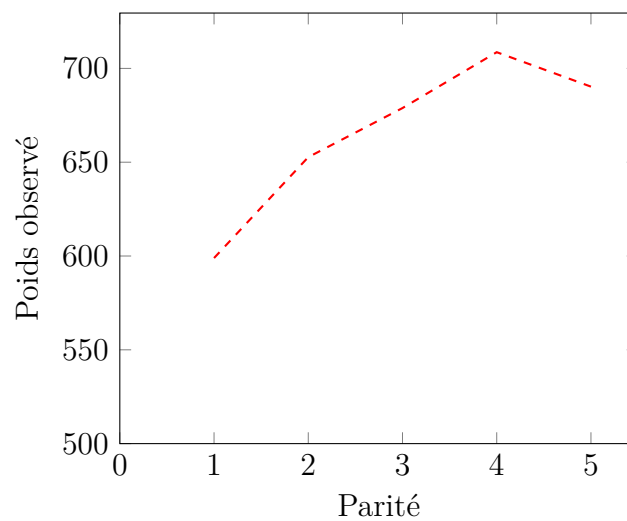


FIGURE 12 – Évolution du poids observé en fonction de la parité .

TABLEAU 11 – Corrélations des variables prédictives avec le poids vif pour les primipares et multipares. Ces corrélations sont calculées sur l'ensemble des données : anciennes et nouvelles.

Primipares	
Avant-main	0,39
Profondeur de corps	0,38
Caractère laitier	-0,16
Taille	0,26
BCS	0,30
Jours en lactation	0,44
Âge au vêlage	0,43
Multipares	
Avant-main	0,47
Profondeur de corps	0,36
Caractère laitier	-0,13
Taille	0,27
BCS	0,42
Jours en lactation	0,26
Parité	0,26

Ces caractères morphologiques sont également susceptibles d'évoluer au cours d'une lactation. Les figures 13 et 14, construites à partir des données issues de la base de données alimentant l'évaluation génétique wallonne, montrent que ces évolutions sont légèrement différentes entre primipares et multipares, mais aussi

entre caractères. Pour les caractères de classification linéaire (excluant le BCS), chez les primipares, on constate une évolution croissante sur la lactation pour tous les caractères, alors que chez les multipares la cotation reste environ constante. A nouveau ce phénomène s'explique par le fait que les primipares terminent leur croissance. Le BCS par contre se distingue des autres caractères chez les deux catégories d'animaux. En effet son évolution ressemble à celle du poids, avec une diminution en début de lactation suivie d'une remontée progressive. Comme pour le poids, cette allure est à mettre en relation avec la balance énergétique de l'animal qui varie en cours de lactation. Après la mise-bas, la vache doit augmenter rapidement sa production laitière, alors que l'ingestion augmente moins vite. Elle se trouve donc en situation de balance énergétique négative et mobilise ses réserves corporelles pour soutenir la production, ce qui fait diminuer sa note d'état corporel. Ensuite, l'ingestion augmente et la production diminue progressivement, mettant la vache en situation de balance énergétique positive, favorisant la reprise d'état. Ceci contribue à faire du BCS un caractère sensiblement différent des autres. De plus, il est par nature différent des autres caractères, comme la profondeur de corps ou la taille, qui sont évalués par la classification linéaire. Ces caractères mesurent des paramètres qui décrivent la vache, et restent environ constants une fois la croissance de celle-ci achevée, alors que le BCS décrit son état d'embonpoint qui est variable selon la manière dont la vache mobilise ou accroît ses réserves corporelles.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

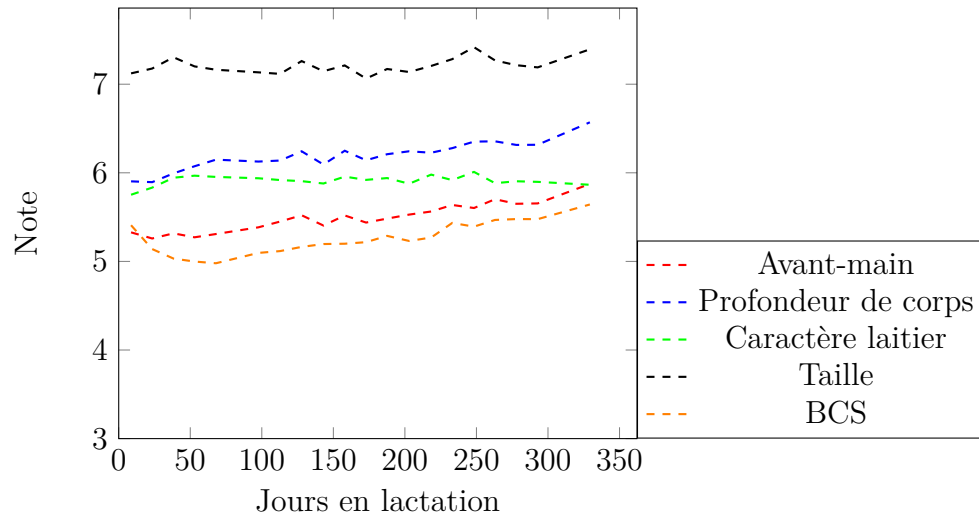


FIGURE 13 – Evolution des paramètres morphologiques au cours de la lactation pour les primipares. Données issues de la base de données alimentant l'évaluation génétique.

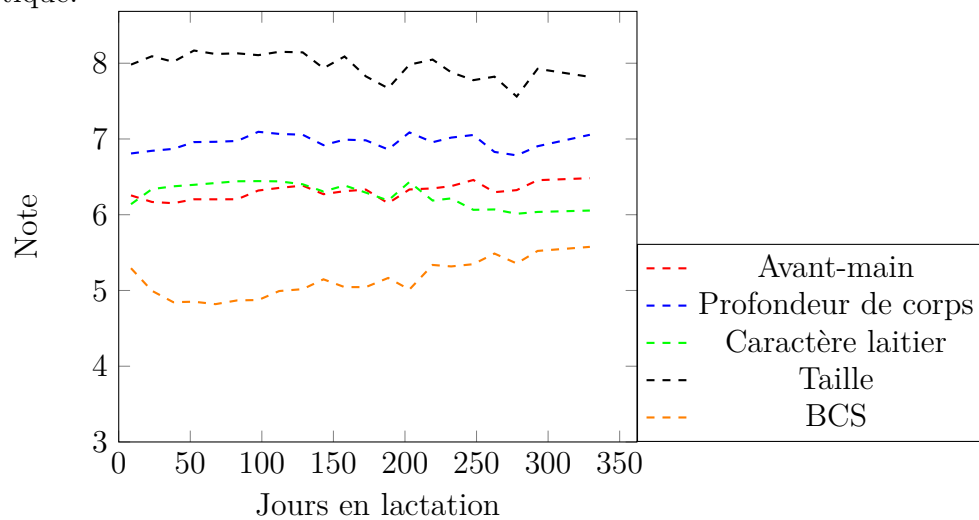


FIGURE 14 – Evolution des paramètres morphologiques au cours de la lactation pour les multipares. Données issues de la base de données alimentant l'évaluation génétique.

Constatant ces différences entre les variables prédictives, il est possible de définir trois groupes de prédicteurs :

1. Les prédicteurs temporels : âge au vêlage, parité et stade de lactation. Ils reprennent les effets de l'âge (indirectement) et du stade de lactation (de la manière explicitée à la section 4.2).

2. Les prédicteurs morphologiques : avant-main, profondeur de corps, caractère laitier et taille. Ils reprennent l'effet de la morphologie de la vache sur son poids, une vache plus grande devant par exemple en toute logique être plus lourde.
3. Un prédicteur caractérisant l'état d'embonpoint : le BCS. Il reprend l'effet de l'état corporel, qui suit la balance énergétique de la manière expliquée ci-dessus. Intuitivement, à morphologie identique, une vache grasse devrait être plus lourde qu'une maigre.

L'idée générale de la méthode proposée est d'utiliser chaque groupe de prédicteurs pour calculer un poids, et ensuite de combiner ces poids pour la prédiction finale. L'avantage est qu'on peut ainsi utiliser différentes sources d'informations, non nécessairement complètes, ce qui est potentiellement fort utile par exemple pour un système d'évaluation génétique ou pour estimer le poids d'une vache tout au long de la lactation. Cette approche a été choisie au détriment de celle utilisant une sélection automatique des variables car dans la littérature, les différents auteurs ayant optés pour cette seconde technique aboutissent toujours à des résultats proches, sélectionnant environ les variables utilisées ici.

4.3.2 Ajustement des équations

Une fois ces principes posés, les modèles à partir desquels seront calculées les équations recherchées peuvent être définis comme suit :

1. Poids fonction du stade de lactation :
 - Primipares :

$$\text{Poids}_1 = \hat{\text{Age Vêlage}} + \gamma + \gamma^2 + \omega + \omega^2$$

- Multipares :

$$\text{Poids}_1 = \text{Parité} + \gamma + \gamma^2 + \omega + \omega^2$$

où $\gamma = t/305$ et $\omega = \ln(\frac{305}{t})$ correspondent aux termes de la fonction de Ali et Schaeffer (1987) explicités auparavant et ont pour but de modéliser l'évolution attendue du poids au cours de la lactation.

2. Poids fonction de la morphologie :
 - Primipares :

$$\text{Poids}_2 = \hat{\text{Age Vêlage}} + \text{Avant-main} + \text{Profondeur de corps} + \text{Taille} + \text{C. laitier}$$

- Multipares :

$$\text{Poids}_2 = \text{Parité} + \text{Avant-main} + \text{Profondeur de corps} + \text{Taille} + \text{C. laitier}$$

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3. Poids fonction du stade de lactation et de la morphologie (primipares et multipares) :

$$\text{Poids}_3 = \text{Poids}_1 + \text{Poids}_2$$

4. Poids fonction du score d'embonpoint (BCS) :

— Primipares :

$$\text{Poids}_4 = \hat{\text{Âge Vêlage}} + \text{BCS}$$

— Multipares :

$$\text{Poids}_4 = \text{Parité} + \text{BCS}$$

5. Poids final (primipares et multipares) :

$$\text{Poids}_5 = \text{Poids}_1 + \text{Poids}_2 + \text{Poids}_4$$

Les modèles proposés pour les primipares et multipares diffèrent par le remplacement de l'âge de vêlage présent dans le premier cas par la parité dans le second, pour des raisons déjà discutées.

L'avantage principal de cette méthode est qu'elle permet d'estimer les poids même si l'on ne dispose que d'informations partielles. Par exemple, même si on ne dispose que du stade ou que du BCS on peut calculer une estimation de poids, qui sera bien entendu à considérer comme moins précise qu'une estimation obtenue avec des informations complètes.

Le tableau 12 présente les résultats obtenus pour l'ajustement des équations sur le jeu de nouvelles données. Il a été décidé d'utiliser ce set pour l'ajustement car le but de ces équations est prédictif, on veut donc qu'elles collent le mieux à la réalité actuelle du terrain. Les R^2 fournis dans ce tableau sont les valeurs calculées pour l'ajustement. En utilisant les équations de Laloux (2008) sur les mêmes animaux, on obtient des R^2 de prédiction de 0,49 et 0,27 pour respectivement les primipares et les multipares. Dans le tableau, on peut constater que, conformément à ce que laissaient penser les corrélations, les prédicteurs temporels sont moins informatifs chez les multipares que chez les primipares. Pareillement, les coefficients obtenus sont bien négatifs pour le caractère laitier, trait qui présentait une corrélation négative avec le poids vif. Par contre, les R^2 des modèles utilisant le BCS sont proches (0,29 chez les primipares et 0,27 chez les multipares) alors que les corrélations entre BCS et poids vif étaient assez différentes (0,30 et 0,42 respectivement). Il faut en conclure que l'âge au vêlage utilisé chez les primipares est plus informatif que la parité employée chez les multipares.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

TABLEAU 12 – Équations calculées sur les nouvelles données, avec R^2 d'ajustement.

Primipares	
Équation	R^2
$\text{Poids}_1 = 752,81 + 0,15\hat{\text{Age}} \text{ Vêlage} - 367,78\gamma + 111,61\gamma^2 - 218,90\omega + 37,58\omega^2$	0,30
$\text{Poids}_2 = 396,08 + 0,05\hat{\text{Age}} \text{ Vêlage} + 28,90\text{Avant-main} + 12,03\text{Profondeur de corps} + 6,66\text{Taille} - 20,80\text{C. laitier}$	0,42
$\text{Poids}_3 = -208,04 + 0,57\text{Poids}_1 + 0,78\text{Poids}_2$	0,50
$\text{Poids}_4 = 323,44 + 0,10\hat{\text{Age}} \text{ Vêlage} + 31,86\text{BCS}$	0,29
$\text{Poids}_5 = -406,94 + 0,36\text{Poids}_1 + 0,72\text{Poids}_2 + 0,60\text{Poids}_4$	0,58
Multipares	
Équation	R^2
$\text{Poids}_1 = 409,45 + 22,98\text{Parité} + 348,23\gamma - 128,31\gamma^2 + 83,12\omega - 8,40\omega^2$	0,13
$\text{Poids}_2 = 485,93 + 11,57\text{Parité} + 26,45\text{Avant-main} + 12,20\text{Profondeur de corps} + 9,88\text{Taille} - 27,16\text{C. laitier}$	0,37
$\text{Poids}_3 = -223,09 + 0,43\text{Poids}_1 + 0,90\text{Poids}_2$	0,39
$\text{Poids}_4 = 427,33 + 26,41\text{Parité} + 30,32\text{BCS}$	0,27
$\text{Poids}_5 = -301,27 - 0,11\text{Poids}_1 + 0,82\text{Poids}_2 + 0,74\text{Poids}_4$	0,49

Ces équations sont donc celles recherchées. Toutefois, le R^2 d'ajustement présenté dans le tableau 12 n'est pas le meilleur critère pour évaluer la qualité d'une équation à but prédictif. Par conséquent, les équations ci-dessus ont été évaluée par validation croisée. Le détail de la méthode employée et les résultats obtenus seront présentés dans la section suivante.

Comme discuté au paragraphe 4.2, la prise en compte correcte du stade de lactation était une priorité de ce travail. Sur les graphiques de la figure 15, on peut voir que l'allure prédite par le premier modèle prenant en compte le stade de lactation rend bien l'allure attendue, décroissante puis augmentant légèrement. Ici à nouveau, seules les allures sont à considérer, les autres paramètres de l'équation ayant été mis à 0, les valeurs obtenues ne sont pas très informatives.

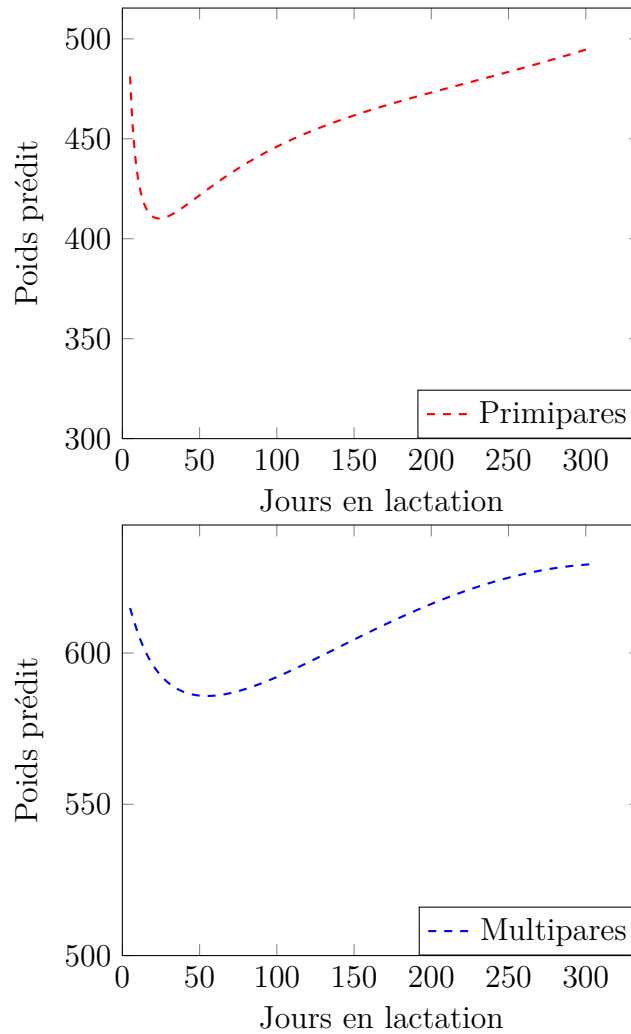


FIGURE 15 – Evolution du poids prédit par les équations p_1 du tableau 12 pour les primipares et multipares.

4.3.3 Validation croisée

On appelle validation croisée le procédé qui consiste à ajuster les équations sur une partie des données et à valider leur capacité prédictive sur une autre, la taille du set de validation étant plus petite que celle du set d'ajustement.

L'algorithme de cross-validation utilisé ici peut se résumer par les étapes suivantes :

- Les données sont classées dans un ordre aléatoire.
- Le premier dixième des données forme le jeu de validation et les neuf dixièmes restants forment le jeu d'ajustement.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

- On ajuste les équations et elles sont utilisées pour prédire le jeu de validation, on en obtient des R^2 d'ajustement. On calcule ensuite le R^2 de prédiction.
- Le second dixième (dans l'ordre aléatoire préalablement établi) devient le jeu de validation et le premier dixième vient compléter le jeu d'ajustement. Les équations sont recalculées et le R^2 de prédiction calculé. On recommence ainsi jusqu'à arriver à la fin du jeu de données.
- On calcule ensuite la moyenne des R^2 de prédiction obtenus et on conserve comme résultat le $\overline{R^2}$ obtenu.
- On recommence dix fois les étapes précédentes. Le résultat final sera la moyenne des $\overline{R^2}$ obtenus à chaque tour.

Afin d'offrir une comparaison valable, les équations de Laloux (2008) n'ont pas été réajustées, mais utilisées telles qu'elles le sont sur le terrain. En effet, puisque ces équations sont utilisées telles quelles par l'awé, les réajuster sur les nouvelles données fausserait la comparaison puisque notre but est de comparer les capacités prédictives des deux modèles, l'ancien et le nouveau, sur les vaches actuelles, et pas les qualités intrinsèques des modèles.

Puisque le but est de prédire les animaux présents et futurs, seules les nouvelles données acquises en 2017 ont été utilisées pour la validation. Les résultats finaux sont présentés dans le tableau 13, dans lequel on peut constater que pour les deux catégories d'animaux, le modèle 5 (correspondant à l'équation la plus complète) est plus performant que les anciennes équations. L'effet est plus marqué pour les multipares, où l'équation 3 n'incluant pas le BCS suffit à dépasser les anciennes équations en terme de capacité prédictive. Pour les primipares, la progression en terme de R^2 est moindre mais il ne faut pas négliger l'amélioration de la prise en compte du stade de lactation qui supprime la coupure qui existait à 130 jours entre les équations.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

TABLEAU 13 – Résultats finaux de la validation croisée.

Primipares		Multipares	
Ajustement		Ajustement	
Modèle	R^2 moyen	Modèle	R^2 moyen
1	0,30	1	0,15
2	0,41	2	0,36
3	0,50	3	0,39
4	0,29	4	0,27
5	0,59	5	0,48
Prédiction		Prédiction	
Modèle	R^2 moyen	Modèle	R^2 moyen
1	0,28	1	0,13
2	0,37	2	0,34
3	0,44	3	0,35
4	0,30	4	0,28
5	0,53	5	0,46
Laloux	0,50	Laloux	0,30

Ces équations pourraient être amenées à évoluer dans l’avenir si davantage de poids peuvent être acquis dans les fermes. Tout d’abord, ajouter des poids observés au jeu de données utilisé pour l’ajustement ne peut qu’améliorer la précision des prédictions effectuées. De plus, puisque la morphologie des animaux évolue au fil du temps, une actualisation régulière des équations sera nécessaire à moyen terme pour coller à la réalité du terrain.

Faute d’un nombre suffisant de données, il a été décidé de ne pas procéder à une validation externe en isolant un troupeau ou quelques animaux par troupeau. En effet, cela aurait fait diminuer de manière trop importante le nombre d’animaux disponibles pour ajuster les équations, qui n’était déjà pas élevé. De plus, comme l’a montré l’analyse en composante principale présente au paragraphe 4.1.1, il est possible que notre échantillon ne couvre pas totalement la variabilité de la population générale, et retirer un troupeau aurait encore aggravé ce problème. Néanmoins, afin de pouvoir quand même tester les équations obtenues sur des animaux différents, ce sont les données issues de la base de données de l’évaluation génétique qui ont été utilisées. Par contre, puisqu’il s’agit de classifications linéaires et de BCS, il ne s’agira pas d’une validation externe. Les résultats de l’application des nouvelles équations sur ces données et des comparaisons effectuées seront présentés dans la section suivante.

4.3.4 Application aux données issues de l'évaluation génétique

Le jeu de données extrait de la base de données de l'évaluation génétique wallonne comprend des informations temporelles (âge de vêlage, parité, stade de lactation), des classifications linéaires et des BCS. Il est donc possible à partir de cela de prédire des poids en utilisant les équations développées dans ce travail. Les équations de Laloux (2008) ont également été utilisées à des fins de comparaison.

Sur le tableau 14, on peut constater que les nouvelles équations ne produisent pas de valeurs aberrantes : les minimas et maximas observés sont tous plausibles. Les poids moyens obtenus sont cohérents entre les différents nouveaux modèles mais on peut constater qu'ils diffèrent de ceux obtenus par les anciennes équations. Les poids prédits par les nouvelles équations sont systématiquement plus faibles que ceux prédits par les équations de Laloux (2008). Étant donné que les nouvelles équations n'utilisent pas exactement les mêmes termes que les anciennes, il est difficile de justifier ces différences de moyennes par une comparaison détaillée des coefficients. La variation dans les poids prédits est également plus faible dans les nouvelles prédictions que dans les anciennes, comme en témoignent les écart-types. Toutefois, dans le cas des multipares, cela n'est pas vrai pour tous les modèles.

Comme on pouvait s'y attendre, les poids moyens prédits pour les primipares sont plus faibles que pour les multipares. Les écarts-types observés varient quelque peu entre les modèles mais assez faiblement. On ne décèle pas de différence nette entre primipares et multipares en ce qui les concerne.

Les allures des distributions des prédictions pour les différents modèles ont été examinées. Les équations les plus complètes (modèle 5) donnent bien, à la fois pour les primipares et les multipares, des distributions normales (voir figure 16 et 17). Les prédictions obtenues par les anciennes équations présentent également une distribution normale. Pour ce qui est des étapes intermédiaires des nouveaux modèles, les prédictions issues des modèles 2, 3 et 4 montrent également des distributions normales. Seuls les résultats issus du modèle 1, pour les primipares et multipares, suivent une distribution décalée vers les faibles valeurs. Ceci peut s'expliquer par le fait que par construction le modèle pousse vers des faibles valeurs en début de lactation. Toutefois, cet effet disparaît dans le modèle 3 qui réutilise la prédiction faite par le modèle 1. Pour résumer, les modèles 3 (stade de lactation+morphologie) et 5 (complet) ne sont pas différents du modèle de Laloux quand on compare l'allure des distributions des poids prédits, alors que le modèle 1 tend plutôt à prédire vers les faibles valeurs.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

TABLEAU 14 – Statistiques descriptives des poids prédits sur les données issues de l'évaluation génétique.

Primipares (N=17580)				
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Modèle 1	578,01	34,95	508,40	909,57
Modèle 2	594,64	39,86	409,31	765,79
Modèle 3	585,24	41,44	428,95	830,76
Modèle 4	573,40	34,26	420,64	718,54
Modèle 5	573,32	45,86	356,64	795,69
Modèle de Laloux	602,60	50,59	379,69	837,90
Multipares (N=7999)				
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Modèle 1	659,27	25,11	631,77	881,26
Modèle 2	674,81	41,27	467,02	848,85
Modèle 3	667,72	42,77	471,39	865,96
Modèle 4	648,09	38,78	510,47	899,76
Modèle 5	659,09	51,37	434,17	904,86
Modèle de Laloux	675,70	41,51	523,36	864,89

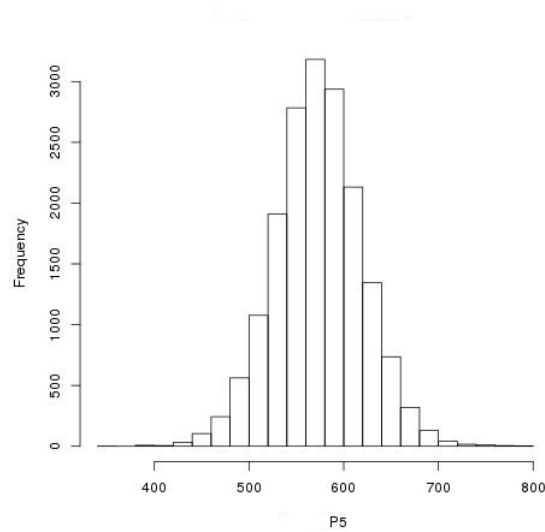


FIGURE 16 – Distribution des prédictions par le modèle 5 pour les primipares.

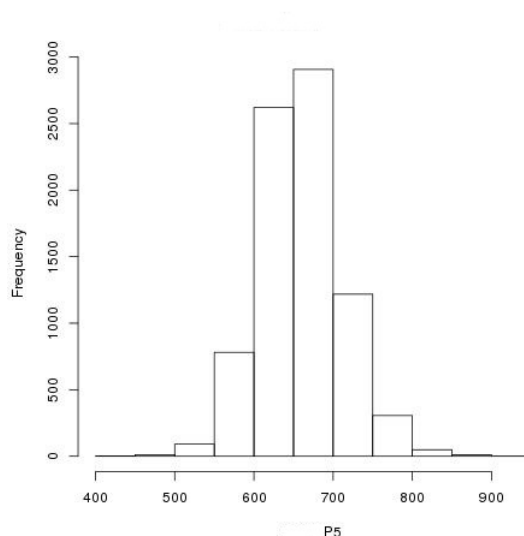


FIGURE 17 – Distribution des prédictions par le modèle 5 pour les multipares.

Afin de vérifier le comportement des nouvelles équations et d'affiner la comparaison entre celles-ci et les anciennes équations, les corrélations entre les poids prédits par les différents modèles et les variables prédictives ont été calculées et sont reprises dans le tableau 15. Premièrement, pour une même catégorie d'animaux, on peut constater qu'entre modèles, ces corrélations varient lorsque plus de paramètres sont pris en compte. Comme attendu, le poids prédit par le modèle 1 est fortement relié au nombre de jours en lactation, surtout chez les primipares. Chez les multipares, l'effet de la parité s'impose davantage. Pour les poids prédits par le modèle 3, les corrélations avec les traits morphologiques augmentent, ce qui est logique puisque ce trait sont alors pris en compte pour la prédiction. En ce qui concerne le caractère laitier, on peut constater qu'il est négativement corrélé avec les poids prédits par les modèles 3 et 5, ce qui était attendu. Ce phénomène est moins marqué dans les modèles de Laloux car : premièrement ce caractère n'est pas inclus dans les équations relatives aux multipares, et deuxièmement les coefficients associés à ce trait dans les équations relatives aux primipares sont plus faibles (de moitié environ) que ceux utilisés dans les nouvelles équations. Finalement, on peut dire que ces corrélations observées présentent bien les tendances attendues. Elles permettent aussi de relever certaines différences entre nouveaux et anciens modèles, confirmant par des chiffres ce qu'on pouvait supposer.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

TABLEAU 15 – Corrélations entre les poids prédits par les différents modèles et les variables prédictives.

Primipares				
	Modèle 1	Modèle 3	Modèle 5	Modèle Laloux
Avant-main	0,22	0,75	0,69	0,55
Profondeur de corps	0,21	0,59	0,50	0,52
Caractère laitier	0,01	-0,20	-0,22	-0,10
Taille	0,09	0,40	0,38	0,49
BCS	0,16	0,22	0,59	0,58
Jours en lactation	0,74	0,48	0,38	0,40
Âge au vêlage	0,48	0,45	0,48	0,54
Multipares				
	Modèle 1	Modèle 3	Modèle 5	Modèle Laloux
Avant-main	0,27	0,75	0,65	0,69
Profondeur de corps	0,23	0,57	0,45	0,51
Caractère laitier	0,02	-0,25	-0,28	-0,04
Taille	0,00	0,36	0,30	0,43
BCS	0,08	0,19	0,56	0,51
Jours en lactation	0,46	0,18	0,08	0,39
Parité	0,82	0,59	0,57	0,38

Afin de vérifier la cohérence des prédictions entre les différents modèles, les corrélations entre ces prédictions ont été calculées (voir tableau 16). Ces corrélations ne constituent pas à proprement parler un gage de qualité des prédictions puisque les modèles pourraient prédire tous quelque chose de faux, mais permettent de vérifier la cohérence entre les différentes prédictions. De manière générale, des corrélations élevées et positives sont observées entre les différents modèles. Les modèles 1,3 et 5 étant construits de manière pyramidale, il n'est pas surprenant qu'ils soient cohérents entre eux. Par contre, la cohérence avec le modèle de Laloux (2008) n'était pas garantie. Le fait qu'elle existe (corrélations de 0,94 et 0,81 pour les primipares et multipares respectivement) n'est pas une garantie de qualité pour les nouvelles prédictions, mais constitue néanmoins un indice de vraisemblance. Ces corrélations sont très élevées chez les primipares (0,94) mais un peu plus faibles chez les multipares (0,81). Ceci pourrait être en relation avec les performances moindres du modèle de Laloux (2008) sur les multipares (R^2 et saut brusque très marqué à 130 jours de lactation entre les équations) déjà mentionnées.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

TABLEAU 16 – Corrélations entre les prédictions effectuées sur les données issues de l'évaluation génétique.

Primipares				
	Modèle 1	Modèle 3	Modèle 5	Modèle Laloux
Modèle 1	1	0,70	0,59	0,58
Modèle 3	0,70	1	0,91	0,83
Modèle 5	0,59	0,91	1	0,94
Modèle Laloux	0,58	0,83	0,94	1
Multipares				
	Modèle 1	Modèle 3	Modèle 5	Modèle Laloux
Modèle 1	1	0,61	0,54	0,53
Modèle 3	0,61	1	0,90	0,77
Modèle 5	0,54	0,90	1	0,81
Modèle Laloux	0,53	0,77	0,81	1

Après ce premier examen de la vraisemblance des prédictions, les figures 18 et 19 présentent l'évolution des poids prédits au cours d'une lactation. Ces résultats sont obtenus en calculant les moyennes des poids prédits par classe de 15 jours sur la durée d'une lactation. Cela constitue une bonne évaluation de la manière dont est pris en compte le stade de lactation par les modèles puisqu'il serait de toute façon difficile en pratique d'envisager une réelle validation qui demanderait des classifications et des pesées répétées au cours d'une lactation sur les mêmes animaux. Conformément à ce qui était attendu, l'allure générale des prédictions comprend une phase décroissante assez rapide en début de lactation suivie d'une reprise de poids plus lente. Ce dernier phénomène apparaît plus marqué chez les primipares que chez les multipares pour des raisons déjà évoquées. Sur les graphiques on veut également voir que les prédictions issues des nouvelles équations ne présentent pas de rupture brusque comme celles visibles à 130 jours de lactation dans les résultats des anciennes équations. On peut également constater sur ces deux figures que les nouvelles équations tendent à prédire des poids en moyenne plus faibles que ceux issus des anciennes équations. Pour les primipares, cet écart reste relativement constant alors qu'il tend à croître en cours de lactation chez les multipares.

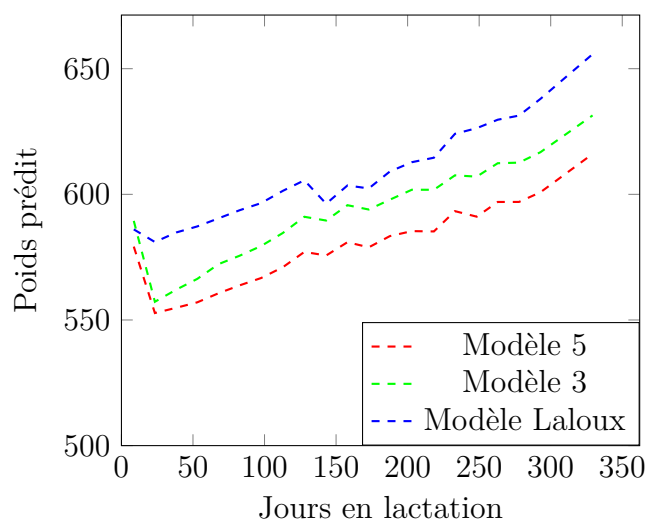


FIGURE 18 – Évolution au cours de la lactation des poids prédits sur les données issues de l'évaluation génétique (primipares).

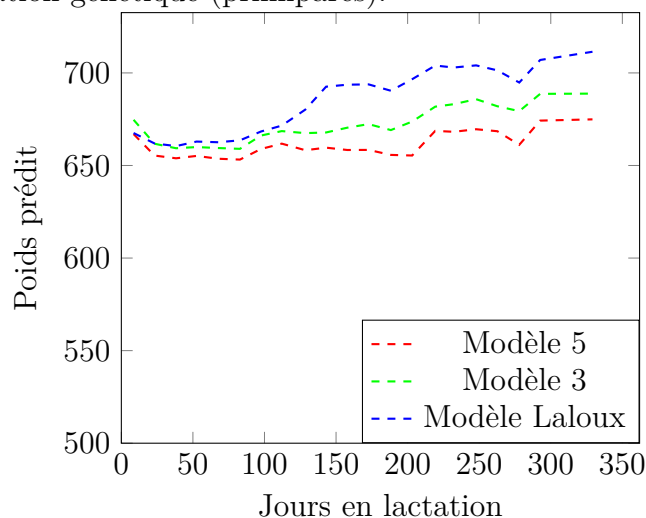


FIGURE 19 – Évolution au cours de la lactation des poids prédits sur les données issues de l'évaluation génétique (multipares).

Si le poids évolue au cours d'une lactation, on peut aussi s'attendre à ce qu'il évolue entre lactations (figure 20). L'inflexion qui s'observe à la seconde lactation est due au passage des équations développées pour les primipares à celles développées pour les multipares. Le but de ce modèle n'étant pas spécialement de prédire le poids d'un animal tout au long de sa vie, ces équations n'ont pas été ajustées dans le but de se joindre sans rupture. Par la suite, l'évolution est légèrement croissante pour les nouveaux modèles alors qu'une saturation est visible dans les prédictions

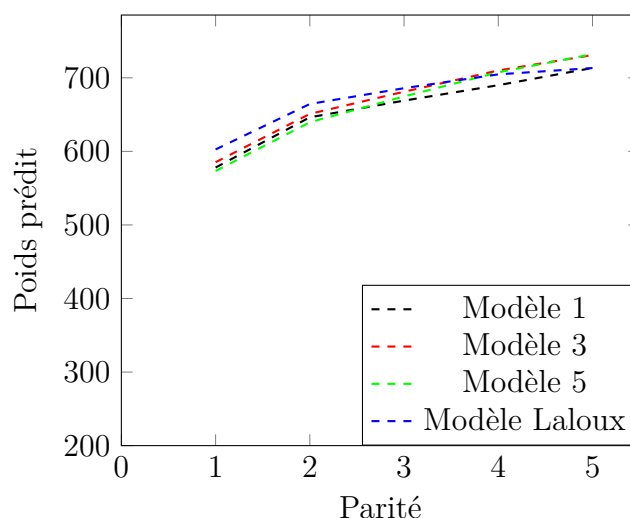


FIGURE 20 – Évolution du poids moyen prédit entre lactations pour les différents modèles.

effectuées par les anciennes équations, ce qui leur donne dans ce contexte un avantage. Cela s'explique par le fait que les nouveaux modèles incluent la parité comme un terme linéaire doté d'un coefficient positif alors que Laloux (2008) considérait cet effet en intégrant à ses équations relatives aux multipares la racine quatrième de l'âge, grandeur qui présente par nature une tendance à la saturation. Toutefois, si on ne considère que les 5 premières lactations, la différence entre le nouveau modèle le plus complet (modèle 5) et l'ancien modèle n'est plus que minime. Or les données relatives à des parités supérieures à 5 ne représentent que 0,52% du jeu de données utilisé.

Si il est plus naturel d'inclure au modèle le nombre de lactation que l'âge, il faut être conscient que son inclusion comme un terme linéaire constitue une des limites de cette modélisation. En effet, si l'on développe les équations du tableau 12, dans le dernier modèle (p_5) une lactation supplémentaire apporte 26,50 kg, ce qui est peut-être excessif pour les parités très élevées.

On a également voulu vérifier l'existence d'une tendance dans les poids prédits selon l'année de classification des animaux (figures 21 et 22). Les données utilisées s'étendent sur 10 ans (2006-2016) mais les années 2006 à 2009 incluse ne représentent qu'environ 3% des données. En ne considérant que la période 2010-2016, on constate, pour les primipares et les multipares, une légère augmentation du poids moyen des animaux. Cette augmentation semble être liée à l'évolution de la morphologie des animaux puisque le modèle 1 qui ne la prend pas en compte ne montre pas ce phénomène (ce modèle ne contient que des facteurs liés au stade de lactation, qui ne sont pas sensés suivre une tendance au cours des années). Pour

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

l'année 2008, la courbe relative au modèle 1 pour les primipares présente une diminution importante du poids moyen prédit pour l'année par rapport aux années voisines. On explique cette baisse, qui se rattrape ensuite, par le fait que pour une raison inexpliquée relative aux données, le nombre moyen de jours en lactation lors de la classification est plus faible pour cette année là : 97 jours en moyenne pour 2008 contre 116 pour 2007 et 2009. L'effet est particulièrement visible dans les résultats du modèle 1 puisque celui-ci prends en compte uniquement le stade de lactation. On voit que dans les modèles 3 et 5, l'effet est compensé par les autres facteurs pris en compte. Toutefois, le faible nombre de données par année complique un peu l'interprétation de ce graphique et de plus, calculer des moyennes annuelles sans corriger sur l'évolution inter-annuelle des autres paramètres n'assure pas que les résultats observés ne sont pas en partie le fruit d'une tendance qui concernerait un autre trait que le poids ou du hasard.

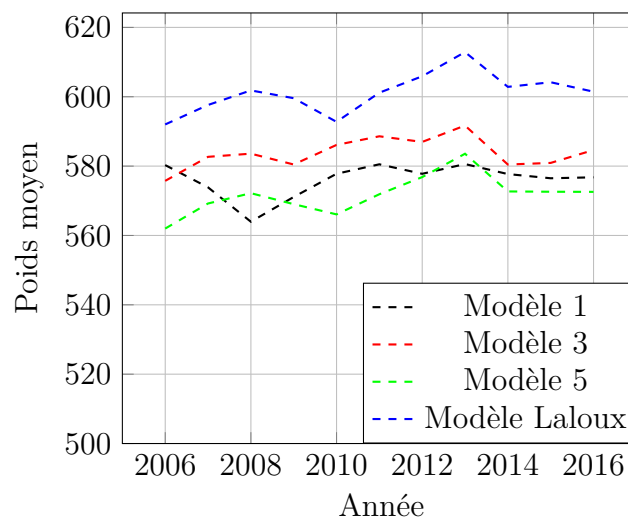


FIGURE 21 – Évolution du poids moyen selon l'année de classification (primipares).

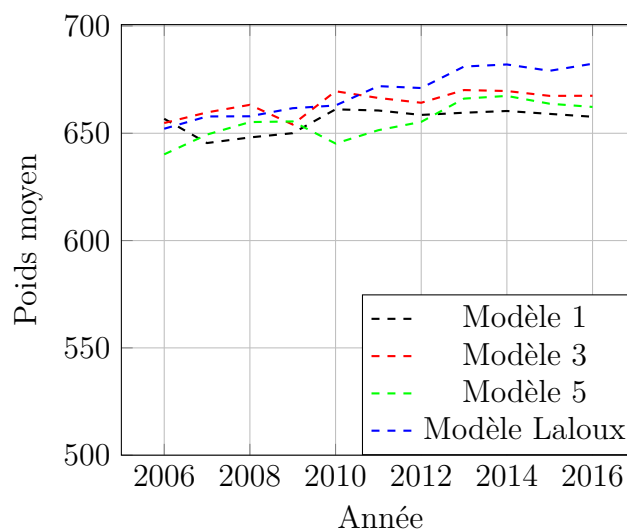


FIGURE 22 – Évolution du poids moyen selon l'année de classification (multipares).

4.4 Prédiction d'ingestion et calcul d'efficience

L'objectif général de ce travail, qui figure dans le titre, était de contribuer à l'évaluation de l'efficience des vaches laitières en Wallonie. Comme l'a montré la revue de la littérature, connaître le poids vif des animaux est un préalable à évaluer leur efficience, d'où l'objectif particulier de ce travail qui fut d'ajuster des équations de prédictions du poids à partir de données morphologiques. Afin de rejoindre l'objectif général, les équations développées ont été utilisées sur un jeu de données comportant des informations de production en plus de la morphologie. A partir des poids prédits sur ces données, des ingestions théoriques ont été calculées grâce à la formule du National Research Council (2001), elles-mêmes servant à calculer un indicateur d'efficience, l'indice de consommation. Les résultats de ces calculs sont présentés dans les sections suivantes, en maintenant toujours la distinction qui existe dans les équations entre primipares et multipares.

Les statistiques descriptives du jeu de données utilisé et des prédictions obtenues qui sont indiquées dans le tableau 17 montrent que l'on dispose d'environ deux fois plus de primipares que de multipares. Ce nombre plus faible de primipares sera à garder à l'esprit au moment d'interpréter les résultats obtenus sur ces animaux. Comme auparavant, les poids vifs prédits pour les primipares sont en moyennes plus faibles que ceux obtenus pour les multipares. Les productions de lait sont en moyenne un peu plus faibles pour les primipares, mais la gamme est similaire pour les deux groupes, et il en va logiquement de même pour le lait corrigé pour l'énergie. Les taux de matière grasse et de protéines sont très similaires pour les deux groupes. Reflétant les différences observées pour le poids et

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

TABLEAU 17 – Statistiques descriptives des prédictions d’ingestion et d’efficience.

Primipares (N=13873)				
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Jours en lactation	122,55	91,36	5,00	365,00
Poids prédit p5	571,92	45,03	356,64	766,74
Lait (kg)	24,60	5,87	3,20	65,20
Mat. grasse (%)	39,50	6,42	16,10	84,90
Protéine (%)	33,19	3,50	14,70	52,80
FPCM	24,27	5,43	4,00	59,91
DMI	18,87	2,49	8,78	33,70
IC	0,81	0,17	0,39	3,07
Multipares (N=6316)				
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Jours en lactation	111,36	85,49	5,00	365,00
Poids prédit p5	656,53	49,17	434,17	841,54
Lait (kg)	31,71	8,57	3,60	61,40
Mat. grasse (%)	40,20	6,57	15,40	80,40
Protéine (%)	33,43	3,72	24,20	55,80
FPCM	31,49	7,82	4,22	61,60
DMI	22,15	3,02	10,50	33,49
IC	0,74	0,19	0,37	3,23

FPCM : lait corrigé pour l’énergie, DMI : ingestion en kg de MS sèche, IC : indice de conversion.

la production, les moyennes d’ingestion prédite diffèrent de 4kg environ entre les deux groupes. Au niveau de l’indice de consommation, les multipares (IC=0,74) semblent en moyenne plus efficaces que les primipares (IC=0,81).

4.4.1 Évolution des prédictions de poids et d’ingestion au cours de la lactation

L’ingestion, le poids vif et la production, qui sont les composantes (indirectement pour le poids) de la mesure d’efficience choisie, évoluent au cours de la lactation. La production évolue de la manière déjà présentée : après le vêlage, elle augmente rapidement jusqu’à un pic pour diminuer ensuite beaucoup plus lentement jusqu’à la fin de la lactation. L’allure attendue pour l’ingestion ressemble à celle de la production, puisque à mesure que la vache produit plus de lait, ses besoins augmentent. Toutefois, on observe en pratique un décalage entre le pic de production et le pic d’ingestion, car l’ingestion augmente plus lentement que la production (Haile-Mariam *et al.*, 2014). Il en résulte qu’en début de lactation, la

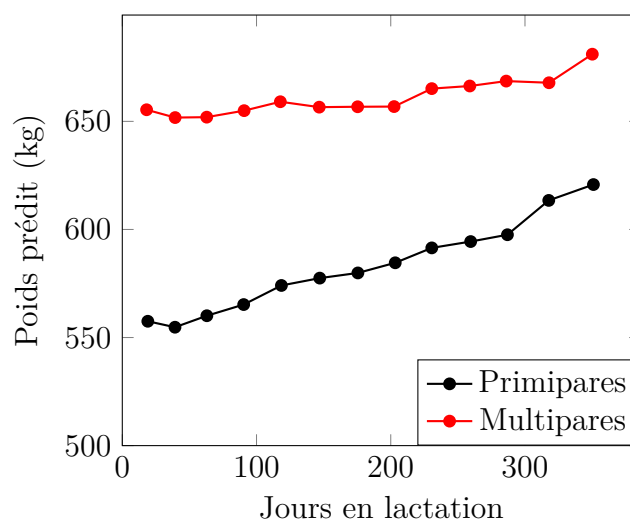


FIGURE 23 – Poids prédits au cours de la lactation pour les primipares et multipares.

vache doit couvrir une partie de ses besoins énergétiques en puisant dans ses réserves corporelles, d'où l'allure attendue pour le poids comportant une diminution rapide en début de lactation suivie d'une reprise progressive.

Les figures 23 à 25 présentent les évolutions du poids prédit, de la production de lait corrigé pour l'énergie, de l'ingestion prédite et enfin de l'indice de consommation, pour les primipares et les multipares. En ce qui concerne les poids, on peut constater que les allures générales sont bien conformes aux attentes. Toutefois, la courbe relative aux multipares présente plus de variations que celle relative aux primipares. Deux facteurs peuvent contribuer à expliquer ce phénomène :

- le plus faible nombre de données de primipares qui fait que les moyennes sont calculées pour chaque point sur moins d'animaux, ce qui contribue à augmenter les variations,
- l'ajustement des équations de prédiction du poids pour les multipares est moins bon que celui qui concerne les primipares.

Un moyen potentiel de remédier à ce problème pourrait se trouver dans l'acquisition de données supplémentaires pour les vaches pluripares, afin à la fois d'améliorer encore les équations prédictives et d'élargir le set utilisé pour estimer les ingestions. Malgré ces réserves, on remarque que les poids prédits en question ne sont pas aberrants et permettent tout de même de poursuivre l'analyse. Les allures obtenues sont similaires à celles qu'obtient Dillon *et al.* (2003) pour des vraies pesées.

L'évolution de la production laitière au cours de la lactation est évalué sur base des données du contrôle laitier, le lait étant transformé pour que les productions de

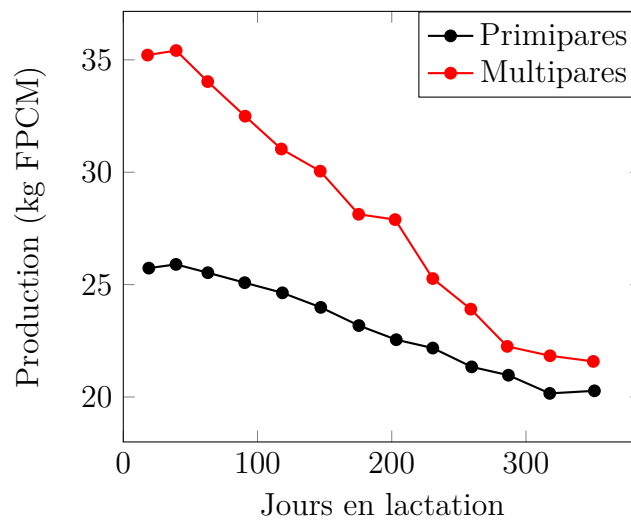


FIGURE 24 – Production observée (contrôle laitier) au cours de la lactation pour les primipares et multipares.

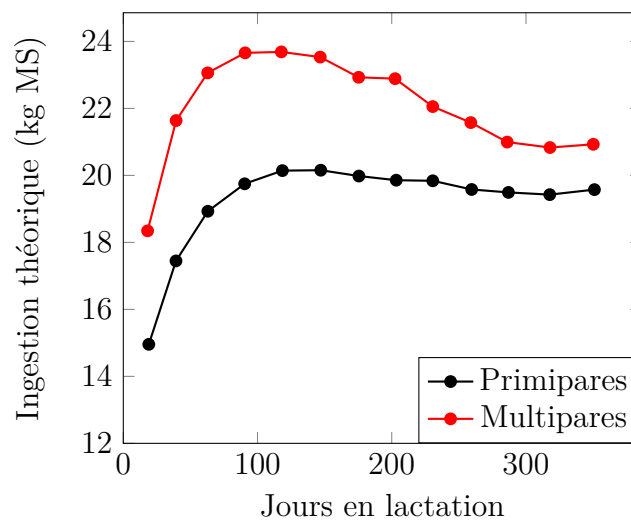


FIGURE 25 – Ingestion prédites au cours de la lactation pour les primipares et multipares.

chaque vache aient la même concentration en énergie selon la procédure explicitée à la section 3.5. Sur la figure 24 on peut constater que la courbe suit bien le schéma décrit d’une croissance rapide suivie d’une diminution plus lente, bien que la croissance rapide ne soit que légèrement visible de part le découpage en classe utilisé. Les multipares ont une production en moyenne plus élevée quelque soit le stade. A nouveau, la courbe relative à ces dernières présente davantage d’irrégularités, probablement imputables au faible nombre de données disponibles.

Il est intéressant de constater que, sur la figure 25, la courbe d’ingestion relative aux multipares présente peu d’oscillations, alors que le poids et la production qui servent à la calculer varie beaucoup plus (phénomène plus marqué pour le poids que pour la production). Ce lissage est à imputer au terme exponentiel multiplicatif présent dans l’équation du National Research Council (2001) (voir la section 3.5 pour les formules et détails). Ceci est à la fois un avantage et un inconvénient de cette équation :

- C’est un avantage dans le sens où cela contribue à limiter l’effet des erreurs de prédiction sur l’ingestion prédite.
- C’est un inconvénient dans le sens où cela diminue l’effet sur l’ingestion théorique d’une vraie variation de poids vif, tendant donc à uniformiser plus que de raison les ingestions calculées.

D’autres équations de prédiction de l’ingestion existent (voir par exemple Faverdin *et al.* (2010)), avec chacune leurs avantages et leurs inconvénients, mais comparer ces équations sort du cadre de ce travail. Dans la littérature, Berry *et al.* (2014) et Coleman *et al.* (2010) trouvent des allures similaires pour l’ingestion au cours de la lactation.

De manière plus générale, comme on pouvait s’y attendre au vu des poids vifs et des productions, les multipares ont des ingestions supérieures à celles des primipares tout à long de la lactation. L’examen conjoint des figures 24 et 25 confirme l’hypothèse d’un pic d’ingestion légèrement plus tardif que le pic de lactation. Ceci est conforme avec l’hypothèse qui dit qu’en début de lactation, une part non négligeable de la production laitière est assurée par la mobilisation des réserves corporelles de la vache.

4.4.2 Effet du niveau de production sur le poids prédit et l’ingestion

Les différents paramètres prédits évoluent en fonction du stade de lactation, mais il est également intéressant de savoir quelle est la relation entre ces caractères et le niveau de production. Sur la figure 26 on peut observer qu’il n’existe pas de relation clairement croissante ou décroissante entre le niveau de production et le poids vif prédit. Pour les primipares, la relation est environ constante, le dernier point de la courbe étant à considérer avec circonspection car il n’est la moyenne que de 4 animaux sur plus de 13000. Pour les multipares, la répartition des animaux sur

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

les différents points est plus équitable, et on peut observer que dans ces données, les animaux de poids prédit élevé se partagent les productions extrêmes hautes et basses alors que les animaux moyens donnent les productions moyennes.

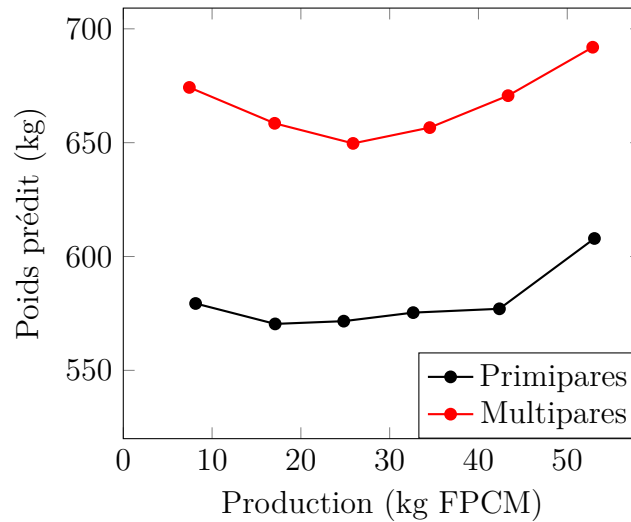


FIGURE 26 – Poids prédit fonction de la production.

Intuitivement, l'ingestion doit suivre le niveau de production, il faut que la vache trouve quelque part l'énergie qu'elle met ensuite dans son lait. Sur la figure 27, on peut voir une relation très clairement linéaire entre ingestion et production laitière. Toutefois, puisque cette ingestion n'est pas une ingestion réelle mais bien une ingestion théorique calculée à partir d'une formule combinant linéairement la production et le poids métabolique, ce qu'on observe est un artefact de calcul et pas une réalité biologique. Il y a donc un grand intérêt pour parvenir, dans le futur à mieux prédire les ingestions, par exemple au moyen des spectres infrarouges du lait.

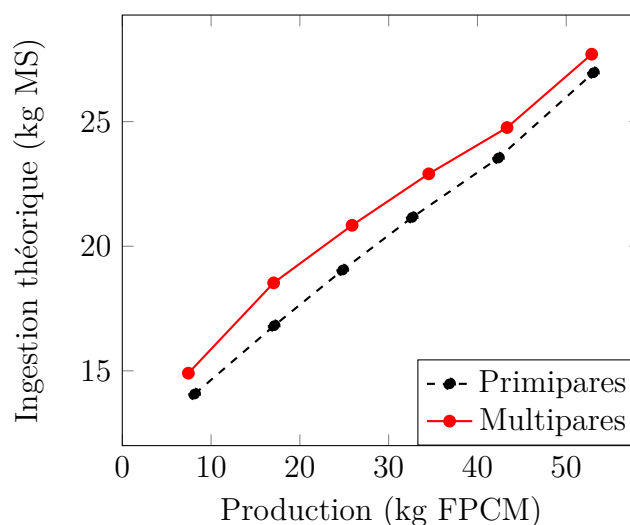


FIGURE 27 – Ingestion théorique fonction de la production.

4.4.3 Exemple de calcul d'efficacité : l'indice de consommation

Le but de ce travail étant de fournir une contribution à l'évaluation de l'efficacité des vaches laitières, cette section illustre brièvement une possibilité d'exploitation des poids prédits pour calculer une efficacité alimentaire.

Le critère d'efficacité choisi pour cet exemple est l'indice de consommation, égal au quotient de l'ingestion théorique par la production laitière (FPCM). Choisi pour sa facilité de calcul et car il est largement utilisé par les éleveurs (de monogastriques essentiellement), ce caractère présente néanmoins l'inconvénient majeur de ne pas permettre de distinguer une modification de production d'une modification d'ingestion (pour une revue des différents indicateurs d'efficacité avec leurs avantages et inconvénients, voir la section 2.1.2). L'interprétation de cet indice de consommation n'est donc pas aisée. Il faut également garder à l'esprit pour la suite qu'une vache efficace présente un indice de consommation faible alors qu'un animal peu efficace est affecté d'une valeur élevée.

La figure 28 présente l'évolution de l'indice de consommation en fonction du stade de lactation. On y constate que l'efficacité diminue à mesure que la lactation progresse. Malgré les différences observées entre primipares et multipares pour les poids et les productions, les indices de consommation sont très comparables entre les deux groupes tout au long de la lactation.

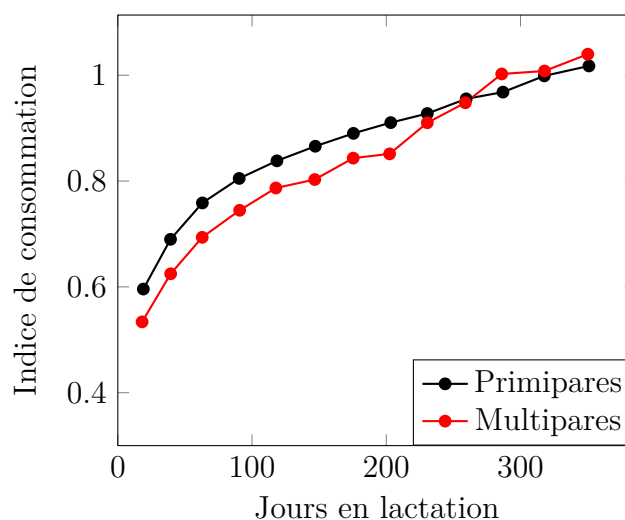


FIGURE 28 – Indices de consommation moyens au cours de la lactation pour les primipares et multipares.

Pour les deux groupes d'animaux, les corrélations à travers la lactation entre l'indice de consommation et le poids, la production et l'ingestion sont similaires, dans les valeurs et dans l'évolution. La corrélation avec le poids prédit est faible, bien qu'elle tende à augmenter légèrement en cours de lactation. La corrélation entre indice de consommation et ingestion est fortement négative, avec une décroissance marquée en début de lactation. L'évolution de la corrélation avec la production (FPCM) est similaire mais avec une décroissance moins marquée en début de lactation. Sur les figures 29 et 30 on peut constater que le début de lactation se distingue du reste en terme de corrélations entre l'IC et les autres paramètres. Ceci s'explique à nouveau par la dynamique particulière des réserves corporelles sur cette période.

Ces corrélations permettent d'illustrer la remarque précédente sur la difficulté d'interpréter l'indice de consommation. Pour les primipares, la corrélation en fin de lactation de l'indice de consommation avec la production est d'environ -0,9, et celle avec l'ingestion d'environ -0,8. C'est à dire que l'indice de consommation est diminué (c'est-à-dire que l'efficacité s'améliore) lorsque l'ingestion augmente ou que la production augmente. Mais ces deux grandeurs augmentent simultanément : les corrélations observées entre FPCM et ingestion vont de 0,83 à 0,96 sur la lactation. On ne peut donc pas dire en voyant une diminution d'ingestion à quel terme de l'indice de consommation il faut l'imputer.

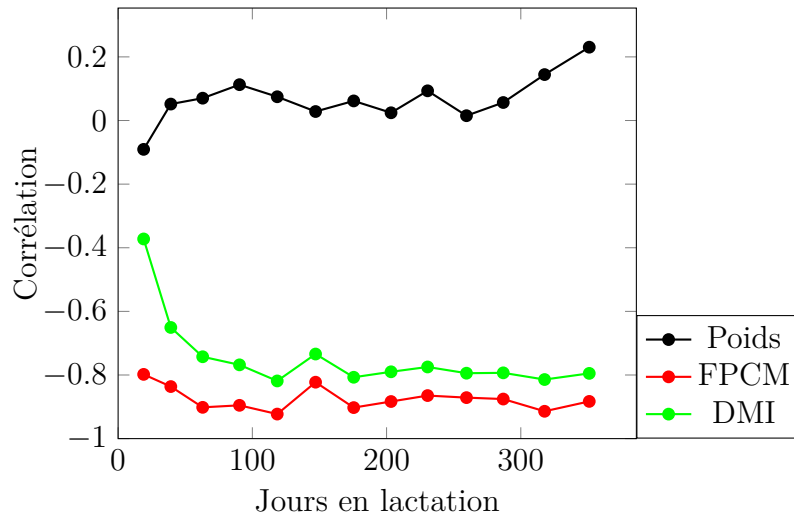


FIGURE 29 – Corrélations des différentes variables avec l'indice de consommation au cours de la lactation, pour les primipares.

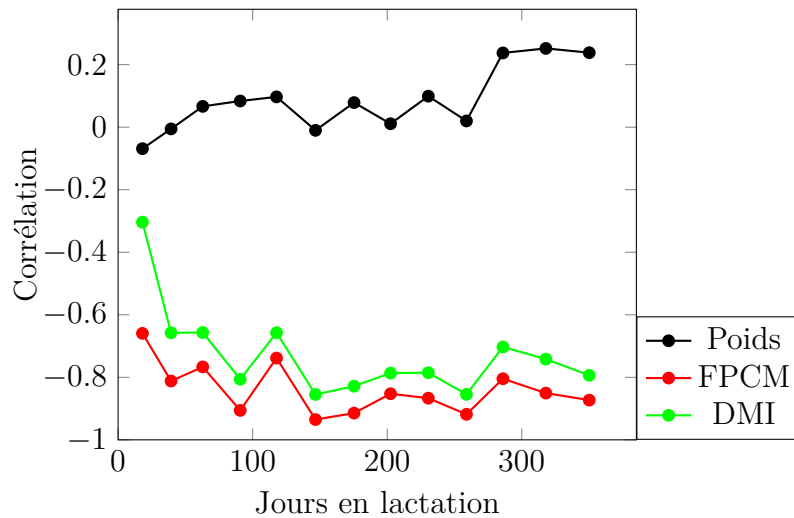


FIGURE 30 – Corrélations des différentes variables avec l'indice de consommation au cours de la lactation, pour les multipares.

Les prédictions d'ingestion et d'efficacité calculées ici suivent donc bien les allures attendues et sont en accord avec les observations d'études plus anciennes (Berry *et al.*, 2014; Coleman *et al.*, 2010; Prendiville *et al.*, 2011). Sur base des calculs effectués ici, on peut résumer avec Prendiville *et al.* (2011) l'évolution de l'efficacité au cours de la lactation en disant qu'elle suit l'évolution de la production

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

laitière : plus favorable en début de lactation elle décline ensuite jusqu'à la fin de la lactation. Remarquons que contrairement à ce qui est fait dans cette dernière étude, nous ne sommes ici pas en mesure d'évaluer l'efficacité sur la période où la vache est tarie puisque aucune donnée ne correspond à une vache tarie dans notre jeu. Selon Prendiville *et al.* (2011), il existe toutefois des variations importantes entre individus et groupes d'individus à ce niveau. Or on sait que l'efficacité intégrée sur la durée de vie est fortement influencée par les périodes improductives (Manafiazar *et al.*, 2012). Pour l'avenir, l'évaluation de l'efficacité pourrait être grandement améliorée si l'on disposait de données d'ingestion réelles permettant de calculer un ingéré résiduel beaucoup plus explicatif que l'indice de consommation. Disposer d'outils d'évaluation de l'efficacité alimentaire sur les périodes non productives permettrait également de mieux envisager l'efficacité globale de la vache sur toute sa vie.

5 Conclusions et perspectives

Le but de ce travail de fin d'études était de contribuer à l'évaluation de l'efficacité des vaches laitières en Wallonie par la mise au point d'équations de prédiction du poids vif à partir de la morphologie, ce qui est une première étape importante vers la mise au points d'une évaluation de l'efficacité alimentaire des bovins laitiers.

A partir d'une série de pesées acquises en 2017 par l'awé, des équations de prédictions du poids ont pu être ajustées, avec des R^2 maximaux de validation croisée de 0,53 et 0,46 pour les primipares et les multipares respectivement, ce qui les rend plus performantes que l'ancienne méthode qui ne donne que des R^2 de 0,50 et 0,30 sur les mêmes données). La prise en compte du stade de lactation qui joue de manière importante sur le poids vif observé a également été améliorée par l'utilisation d'une fonction initialement créée pour ajuster l'évolution de la production laitière au cours de la lactation. Afin de comparer les prédictions nouvelles et anciennes, les différentes équations ont ensuite été appliquées sur un extrait de la base de données alimentant l'évaluation génétique wallonne. Il en résulte que les nouvelles prédictions sont bien cohérentes et améliorent effectivement la prise en compte du stade de lactation.

Puisque le but de ce travail est de permettre à terme une évaluation de l'efficacité alimentaire des animaux, un exemple d'exploitation des prédictions de poids a ensuite été réalisé. Les poids prédits et les données de production issues du contrôle laitier ont été utilisés pour prédire des ingestions théoriques. Combinées aux données de production, ces ingestions ont permis de calculer des indices de consommation, grandeur qui est un indicateur d'efficacité énergétique. Il ressort deux choses de cette analyse :

1. L'évolution de l'ingestion théorique calculée au cours de la lactation est conforme à ce qui était attendu selon la littérature. On peut donc conclure que les équations de prédiction du poids sont utilisables dans ce but.
2. L'indice de consommation est d'interprétation difficile, et en devient donc peu utilisable en pratique. Pour l'avenir, il conviendra donc de choisir comme indicateur d'efficacité une variable plus adaptée, par exemple une production ou un ingéré résiduel. Dans l'idée de développer une évaluation génétique d'efficacité, la théorie des index de sélection fournit également les outils pour prendre en compte les relations complexes qui lient poids vif, production et efficacité.

La mise au point de ces équations de prédiction du poids offre pour l'avenir plusieurs perspectives intéressantes. Tout d'abord, si il est possible dans les années à venir de continuer à mener des campagnes de pesées, par exemple en récupérant les poids à partir des robots de traite comme ce fut le cas pour ce travail, les

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

équations pourront être améliorées, rendant ainsi les prédictions plus précises. A moyen terme, il est de toute façon nécessaire de les actualiser pour tenir compte de l'évolution de la morphologie et du poids des animaux. Puisque ce travail a permis de détecter quelles exploitations étaient équipées de robots utilisables et d'établir des contacts avec les éleveurs à ce sujet, on pourrait envisager que les agents de l'awé continuent de récupérer les poids à chaque contrôle laitier, ou du moins à chaque classification afin de constituer un fichier de poids observés. Toutefois le risque avec cette méthode est que l'échantillonnage limité toujours au mêmes troupeaux ne couvre pas correctement la variabilité présente dans la population.

Comme illustré sur la figure 31 l'awé pourrait donc constituer une base de données accumulant au fil des années les poids réels récupérés à partir de robots ou acquis par pesée, qui servirait à actualiser les équations de prédictions (celles issues de ce travail, voire d'autres encore à développer). En parallèle de cela se trouverait une base de données contenant les poids prédits à partir de la classification linéaire, ainsi qu'éventuellement d'autres prédictions encore à développer, qui rendrait possible la mise en place d'une évaluation génétique sur le poids vif, qui pourrait donner un outil supplémentaire aux éleveurs pour raisonner leurs accouplements.

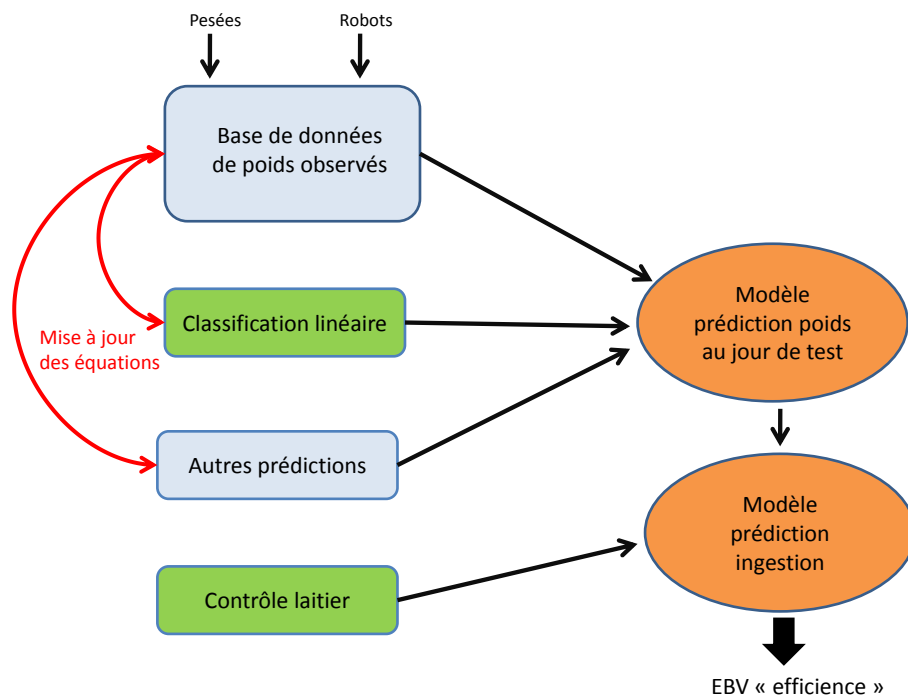


FIGURE 31 – Schéma proposé pour l'exploitation future des poids prédits.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La méthode publiée par Vanrobays *et al.* (2015) qui permet, à partir de pesées ou de prédictions du poids ponctuelles (correspondant dans notre cas au jour de la classification linéaire) d'étendre les poids prédits pour chaque jour de test pourrait également se trouver améliorée en remplaçant les anciennes équations de prédiction du poids par les nouvelles. Ces prédictions étendues pourraient être calculées comme sous-produit de l'évaluation génétique du poids. Il serait ainsi possible, pour chaque vache ayant une classification au cours de la lactation, de calculer un poids pour chaque jour de test. Connaissant donc le poids et la production, il est ainsi possible de calculer une ingestion. Cette ingestion pourrait être prédite par un modèle plus complexe que celui utilisé ici, qui combinerait l'ingestion théorique (comme dans notre exemple) et une ingestion prédite à partir du spectre infra-rouge du lait (Garnsworthy et Unal, 2004; McParland *et al.*, 2014; Shetty *et al.*, 2017) afin de mieux coller à la réalité. Une équipe wallonne rassemblant le Centre de Recherche Agronomique Wallon et Gembloux Agro-Bio Tech travaille d'ailleurs à la mise au point de prédictions d'ingestion à partir des spectres du lait. Une fois connus le poids, l'ingestion et les données de production, plus rien ne manque pour calculer une mesure d'efficacité, laquelle pourrait ensuite faire l'objet d'une évaluation génétique ou être intégrée dans un outil d'aide à la décision à destination des éleveurs. Rappelons toutefois ici que d'autres leviers existent pour améliorer l'efficacité des animaux et de l'élevage, allant du management au sens large à la nutrition fine.

Pour finir, au vu de l'intérêt que suscite les questions relatives à l'efficacité alimentaire des bovins laitiers tant auprès de la communauté scientifique qu'auprès des acteurs de terrain comme l'awé, on ne peut qu'appeler les pouvoirs publics à se mobiliser pour soutenir la recherche sur ces problématiques. Une priorité de ce point de vue serait de parvenir à acquérir des données réelles d'ingestion, qui permettraient de développer des calculs d'ingérés résiduels, indicateurs d'efficacité très largement utilisés dans la littérature. L'évaluation génétique voire génomique d'efficacité alimentaire que ces travaux permettrait d'obtenir offrirait aux éleveurs un outil supplémentaire de gestion pour tenter d'assurer leur rentabilité en cette période troublée.

Bibliographie

- AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE (2015). Projet deffilait. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-15-CE20-0014>. Page consultée en juillet 2017.
- ALI, T. et SCHAEFFER, L. (1987). Accounting for covariances among test day milk yields in dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science*, 67:637–644.
- AWÉ (2015). Rapport d'activité 2015. Rapport technique, Association Wallonne de l'Élevage.
- BANOS, G. et COFFEY, M. (2012). Technical note : Prediction of liveweight from linear conformation traits in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 95:2170–2175.
- BASARAB, J., COLAZO, M., AMBROSE, D., NOVAK, S., MCCARTNEY, D. et BARON, V. (2011). Residual feed intake adjusted for backfat thickness and feeding frequency is independent of fertility in beef heifers. *Canadian Journal of Animal Science*, 91:573–584.
- BASTIN, C., LALOUX, L., GILLON, A., BERTOZZI, C., VANDERICK, S. et GENGLER, N. (2007). First results of body condition score modeling for wallon holstein cows. *Interbull Bulletin*, 37:170–174.
- BECKERS, Y. (2015). Cours de zootechnie laitière. Ulg Gembloux AgrobioTech.
- BERRY, D., BUCKLEY, F., DILLON, P., EVANS, R., RATH, M. et VEERKAMP, R. (2003). Genetic relationships among body condition score, body weight, milk yield, and fertility in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 86:2193–2204.
- BERRY, D., COFFEY, M., PRYCE, J., DE HAAS, Y., LØVENDAHL, P., KRATTENMACHER, N., CROWLEY, J., WANG, Z., SPURLOCK, D., WEIGEL, K. *et al.* (2014). International genetic evaluations for feed intake in dairy cattle through the collation of data from multiple sources. *Journal of Dairy Science*, 97:3894–3905.

BIBLIOGRAPHIE

- BERRY, D. et CROWLEY, J. (2013). Cell biology symposium : genetics of feed efficiency in dairy and beef cattle. *Journal of Animal Science*, 91:1594–1613.
- BEWLEY, J., PEACOCK, A., LEWIS, O., BOYCE, R., ROBERTS, D., COFFEY, M., KENYON, S. et SCHUTZ, M. (2008). Potential for estimation of body condition scores in dairy cattle from digital images. *Journal of Dairy Science*, 91:3439–3453.
- CAMPENEERE, S. d., FIEMS, L., BOUCQUÉ, C. *et al.* (2000). In vivo estimation of body composition in cattle. In *Nutrition Abstracts and Reviews. Series B, Livestock Feeds and Feeding*, volume 70, pages 495–508.
- CHANTELOUBE, A., GICQUEL, M., LE CHENADEC, H., LEROY, M., FISCHER, A., MONTAGNE, L. et JURQUET, J. (2015). Etat des lieux de l'utilisation de la notion d'efficience alimentaire par la filière bovin lait. In *Renc. Rech. Rum*, volume 22.
- CHAUCHEYRAS-DURAND, F., AMEILBONNE, A., BICHAT, A., MOSONI, P., OSSA, F. et FORANO, E. (2016). Live yeasts enhance fibre degradation in the cow rumen through an increase in plant substrate colonization by fibrolytic bacteria and fungi. *Journal of Applied Microbiology*, 120:560–570.
- COFFEY, M., SIMM, G., HILL, W. et BROTHERSTONE, S. (2003). Genetic evaluations of dairy bulls for daughter energy balance profiles using linear type scores and body condition score analyzed using random regression. *Journal of Dairy Science*, 86:2205–2212.
- COLEMAN, J., BERRY, D., PIERCE, K., BRENNAN, A. et HORAN, B. (2010). Dry matter intake and feed efficiency profiles of 3 genotypes of holstein-friesian within pasture-based systems of milk production. *Journal of Dairy Science*, 93:4318–4331.
- COMMISSION EUROPÉENNE - AGRICULTURE ET DÉVELOPPEMENT RURAL (2017a). Dg agri dashboard : dairy products. https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/market-observatory/milk/pdf/dashboard-dairy_en.pdf. Page consultée en juillet 2017.
- COMMISSION EUROPÉENNE - AGRICULTURE ET DÉVELOPPEMENT RURAL (2017b). Lait et produits laitiers. https://ec.europa.eu/agriculture/milk_fr. Page consultée en juillet 2017.
- CONNOR, E. (2014). Invited review : improving feed efficiency in dairy production : challenges and possibilities. *Animal*, 9:395–408.

BIBLIOGRAPHIE

- CONNOR, E., HUTCHISON, J., OLSON, K. et NORMAN, H. (2012). Triennial lactation symposium : Opportunities for improving milk production efficiency in dairy cattle. *Journal of Animal Science*, 90:1687–1694.
- CRV (2013). Statistical indicators e 21 breeding value weight. Rapport technique, CRV. Disponibl à <https://www.crv4all-international.com/wp-content/uploads/2016/03/E-21-Body-Weight.pdf>, page consultée en avril 2017.
- DECHOW, C. (2013). Genetic selection opportunities to improve feed efficiency. *In Proceedings of the 49th Florida dairy production conference*, pages 33–38.
- DEHARENG, F., DELFOSSE, C., FROIDMONT, E., SOYEURT, H., MARTIN, C., GENGLER, N., VANLIERDE, A. et DARDENNE, P. (2012). Potential use of milk mid-infrared spectra to predict individual methane emission of dairy cows. *Animal*, 6:1694–1701.
- DILLON, P., BUCKLEY, F., O’CONNOR, P., HEGARTY, D. et RATH, M. (2003). A comparison of different dairy cow breeds on a seasonal grass-based system of milk production : Milk production, live weight, body condition score and dm intake. *Livestock Production Science*, 83:21–33.
- DOREAU, M., GRIMAUD, P. et MICHALET DOREAU, B. (2000). La sous-alimentation chez les ruminants : ses effets sur la digestion. *INRA Productions Animales*, 13:247–255.
- DORMAN, J. (2012). A study of traits other than production in the new zealand dairy industry national breeding objective.
- EASTRIDGE, M. (2006). Major advances in applied dairy cattle nutrition. *Journal of Dairy Science*, 89:1311–1323.
- ENEVOLDSEN, C. et KRISTENSEN, T. (1997). Estimation of body weight from body size measurements and body condition scores in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 80:1988–1995.
- FABRY, L. (2009). Économie de la production laitière wallonne - évolutions et caractéristiques. *In Carrefour des productions animales*. CRA-W et FUSAGx.
- FAVERDIN, P., DELAGARDE, R., DELABY, L. et MESCHY, F. (2010). *Alimentation des vaches laitières*. Editions Quae.
- FISCHER, A., LUGINBUHL, T., DELATTRE, L., DELOUARD, J. et FAVERDIN, P. (2014). Améliorer la mesure de l’état des réserves corporelles des vaches laitières en analysant la surface 3d du dos de la vache. *In Renc. Rech. Rum*, volume 21. Institut de l’Elevage-INRA.

BIBLIOGRAPHIE

- FRIGGENS, N., BERG, P., THEILGAARD, P., KORSGAARD, I. R., INGVARTSEN, K. L., LØVENDAHL, P. et JENSEN, J. (2007). Breed and parity effects on energy balance profiles through lactation : Evidence of genetically driven body energy change. *Journal of Dairy Science*, 90:5291–5305.
- FRIGO, E., DECHOW, C., PEDRON, O. et CASSELL, B. (2010). The genetic relationship of body weight and early-lactation health disorders in two experimental herds. *Journal of Dairy Science*, 93:1184–1192.
- GARNSWORTHY, P. et UNAL, Y. (2004). Estimation of dry-matter intake and digestibility in group-fed dairy cows using near infrared reflectance spectroscopy. *Animal Science*, 79:327–334.
- GENGLER, N. (1996). Persistency of lactation yields : A review. *Interbull Bulletin*, 12:87–96.
- GRIEVE, D., KORVER, S., RIJPKEMA, Y. et HOF, G. (1986). Relationship between milk composition and some nutritional parameters in early lactation. *Livestock Production Science*, 14:239–254.
- GUAN, L. L., NKRUMAH, J. D., BASARAB, J. A. et MOORE, S. S. (2008). Linkage of microbial ecology to phenotype : correlation of rumen microbial ecology to cattle's feed efficiency. *FEMS Microbiology Letters*, 288:85–91.
- HAILE-MARIAM, M., GONZALEZ-RECIO, O. et PRYCE, J. (2014). Prediction of liveweight of cows from type traits and its relationship with production and fitness traits. *Journal of Dairy Science*, 97:3173–3189.
- HALACHMI, I., KLOPČIČ, M., POLAK, P., ROBERTS, D. et BEWLEY, J. (2013). Automatic assessment of dairy cattle body condition score using thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99:35–40.
- HANSEN, L., COLE, J., MARX, G. et SEYKORA, A. (1999). Productive life and reasons for disposal of holstein cows selected for large versus small body size. *Journal of Dairy Science*, 82:795–801.
- HEINRICHS, A., ROGERS, G. et COOPER, J. (1992). Predicting body weight and wither height in holstein heifers using body measurements. *Journal of Dairy Science*, 75:3576–3581.
- HERD, R. et ARTHUR, P. (2009). Physiological basis for residual feed intake. *Journal of Animal Science*, 87:E64–E71.

BIBLIOGRAPHIE

- HUNTINGTON, G., LEONARD, E. et BURNS, J. (2011). Technical note : Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict intake and digestibility in bulls and steers. *Journal of Animal Science*, 89:1163–1166.
- HURLEY, A., LÓPEZ-VILLALOBOS, N., MCPARLAND, S., LEWIS, E., KENNEDY, E., O'DONOVAN, M., BURKE, J. et BERRY, D. (2017). Genetics of alternative definitions of feed efficiency in grazing lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*.
- INRA (2016). Mieux comprendre les facteurs de variation de l'efficience alimentaire des vaches laitières. <https://www6.inra.fr/deffilait/Plaquettes/Mieux-comprendre-les-facteurs-de-variation-de-l-EA-des-vaches-laitieres>. Page consultée en juillet 2017.
- KAWASAKI, M., KAWAMURA, S., TSUKAHARA, M., MORITA, S., KOMIYA, M. et NATSUGA, M. (2008). Near-infrared spectroscopic sensing system for on-line milk quality assessment in a milking robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63:22–27.
- KEREN, E. N. et OLSON, B. E. (2007). Applying thermal imaging software to cattle grazing winter range. *Journal of Thermal Biology*, 32:204–211.
- KOCH, R. M., SWIGER, L. A., CHAMBERS, D. et GREGORY, K. E. (1963). Efficiency of feed use in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 22:486–494.
- KOENEN, E. et GROEN, A. (1998). Genetic evaluation of body weight of lactating holstein heifers using body measurements and conformation traits. *Journal of Dairy Science*, 81:1709–1713.
- KORVER, S., VAN ARENDONK, J. et KOOPS, W. (1985). A function for live-weight change between two calvings in dairy cattle. *Animal Science*, 40:233–241.
- LALOUX, L. (2008). Elaboration de formules de prédiction du poids vif des vaches en lactation à partir des cotes de classifications linéaires et du bcs. Rapport technique, Association Wallone de l'Élevage.
- LUKUYU, M., GIBSON, J., SAVAGE, D., DUNCAN, A., MUJIBI, F. et OKEYO, A. (2016). Use of body linear measurements to estimate liveweight of crossbred dairy cattle in smallholder farms in kenya. *SpringerPlus*, 5:63.
- MALTZ, E., DEVIR, S., METZ, J. et HOGVEEN, H. (1997). The body weight of the dairy cow i. introductory study into body weight changes in dairy cows as a management aid. *Livestock Production Science*, 48:175–186.

BIBLIOGRAPHIE

- MANAFIAZAR, G., OKINE, E., GOONEWARDENE, L., MCFADDEN, T. et WANG, Z. (2012). *Factors That Affect Energy Efficiency and Indirect Response of Selection for Efficiency on Related Traits*. INTECH Open Access Publisher.
- MCGUFFEY, R., RICHARDSON, L. et WILKINSON, J. (2001). Ionophores for dairy cattle : current status and future outlook. *Journal of Dairy Science*, 84:E194–E203.
- MCPARLAND, S. et BERRY, D. (2016). The potential of fourier transform infrared spectroscopy of milk samples to predict energy intake and efficiency in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99:4056–4070.
- MCPARLAND, S., LEWIS, E., KENNEDY, E., MOORE, S., MCCARTHY, B., O'DONOVAN, M., BUTLER, S., PRYCE, J. et BERRY, D. (2014). Mid-infrared spectrometry of milk as a predictor of energy intake and efficiency in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 97:5863–5871.
- MOALLEM, U., LEHRER, H., LIVSHITZ, L., ZACHUT, M. et YAKOBY, S. (2009). The effects of live yeast supplementation to dairy cows during the hot season on production, feed efficiency, and digestibility. *Journal of Dairy Science*, 92:343–351.
- MOUBARECK, C., BOURGEOIS, N. et DOUCET-POPULAIRE, F. (2003). L 'utilisation des antibiotiques en pratique vétérinaire et ses risques pour la santé humaine. *Environnement, Risques & Santé*, 2:97–104.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2001). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. National Academies Press, seventh revised edition édition.
- NEGRETTE, P., BIANCONI, G., BARTOCCI, S., TERRAMOCCIA, S. et VERNA, M. (2008). Determination of live weight and body condition score in lactating mediterranean buffalo by visual image analysis. *Livestock Science*, 113:1–7.
- PARAGON, B., BLANCHARD, G., VALETTE, J., MEDJAOUI, A., WOLTER, R. *et al.* (2000). Zootechnical survey of 439 foals in basse-normandie : body growth, conformation and estimation of weight. In *26e Journée de la recherche équine, 1 mars 2000*, pages 3–11. Les Haras Nationaux, Les Haras Nationaux Direction Du Développement.
- PARC NATUREL RÉGIONAL DE L'AUBRAC (2013). La politique agricole commune. <http://www.projet-pnr-aubrac.fr/fr/actualites/documents/agri-conf-pac-12112013-sidam.pdf>. Page consultée en juillet 2017.

BIBLIOGRAPHIE

- PEIPER, U., EDAN, Y., DEVIR, S., BARAK, M. et MALTZ, E. (1993). Automatic weighing of dairy cows. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 56:13–24.
- PERROT, C., MOTTET, A. et YOU, G. (2011). Les modèles laitiers européens du nord de l’union européenne à l’épreuve de la volatilité. *Renc. Rech. Rum*, 18:317–320.
- PETER, W. (2016). Technote 3 : Feed saved abv. Rapport technique, DataGene.
- PEYRAUD, J., LE GALL, A., DELABY, L., FAVERDIN, P., BRUNSCHWIG, P. et CAILLAUD, D. (2009). Quels systèmes fourragers et quels types de vaches laitières demain. *Fourrages*, 197:47–70.
- PFLIMLIN, A. (2008). Evolution de l’europe laitière et des systèmes fourragers. argumentaire pour une autre politique. *Fourrages*, 196:401–424.
- PHOCAS, F., AGABRIEL, J., DUPONT-NIVET, M., GEURDEN, I., MEDALE, F., MIGNON-GRASTEAU, S., GILBERT, H. et DOURMAD10, J. (2014). Le phénotypage de l’efficacité alimentaire et de ses composantes, une nécessité pour accroître l’efficience des productions animales. *INRA Productions Animales*, 27:235–248.
- PHOCAS, F., BELLOC, C., BIDANEL, J., DELABY, L., DOURMAD, J., DUMONT, B., EZANNO, P., FORTUN-LAMOTHE, L., FOUCRAS, G., FRAPPAT, B. *et al.* (2017). Quels programmes d’amélioration génétique des animaux pour des systèmes d’élevage agro-écologiques ? *INRA Productions Animales*, 30:31–46.
- PODLAHOVA, S., SMUTNY, L. et SOCH, M. (2011). Potential utilization of automatic cows weighing for evaluation of health and nutritional condition of herd. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*, 44:308–314.
- PRENDIVILLE, R., PIERCE, K., DELABY, L. et BUCKLEY, F. (2011). Animal performance and production efficiencies of holstein-friesian, jersey and jersey× holstein-friesian cows throughout lactation. *Livestock Science*, 138:25–33.
- PRYCE, J., GONZALEZ-RECIO, O., NIEUWHOF, G., WALES, W., COFFEY, M., HAYES, B. et GODDARD, M. (2015). Hot topic : Definition and implementation of a breeding value for feed efficiency in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 98:7340–7350.
- PRYCE, J., WALES, W. d., DE HAAS, Y., VEERKAMP, R. et HAYES, B. (2014). Genomic selection for feed efficiency in dairy cattle. *Animal*, 8:1–10.

BIBLIOGRAPHIE

- RICHARDSON, E., KILGOUR, R., ARCHER, J. et HERD, R. (1999). Pedometers measure differences in activity in bulls selected for high or low net feed efficiency. *Proc. Aust. Soc. Study Anim. Behav*, 26:16.
- SAKOWSKI, T. et CYTOWSKI, J. (1996). Video image analysis was employed to evaluate carcass composition of live cattle. *Stocarstvo* 50, 205, 208.
- SCHINGOETHE, D., LINKE, K., KALSCHUR, K., HIPPEN, A., RENNICH, D. et YOON, I. (2004). Feed efficiency of mid-lactation dairy cows fed yeast culture during summer. *Journal of Dairy Science*, 87:4178–4181.
- SHETTY, N., LØVENDAHL, P., LUND, M. et BUITENHUIS, A. (2017). Prediction and validation of residual feed intake and dry matter intake in danish lactating dairy cows using mid-infrared spectroscopy of milk. *Journal of Dairy Science*, 100:253–264.
- SOYEURT, H., DARDENNE, P., DEHARENG, F., LOGNAY, G., VESELKO, D., MARLIER, M., BERTOZZI, C., MAYERES, P. et GENGLER, N. (2006). Estimating fatty acid content in cow milk using mid-infrared spectrometry. *Journal of Dairy Science*, 89:3690–3695.
- SOYEURT, H., DEHARENG, F., GENGLER, N., MCPARLAND, S., WALL, E., BERRY, D., COFFEY, M. et DARDENNE, P. (2011). Mid-infrared prediction of bovine milk fatty acids across multiple breeds, production systems, and countries. *Journal of Dairy Science*, 94:1657–1667.
- SPF ECONOMIE, PME, CLASSES MOYENNES ET ENERGIE (2014). Mise à jour de l'étude sur la filière laitière. http://statbel.fgov.be/fr/binaries/Mise_a_jour_Etude_filiere_laitiere_tcm326-253253.pdf. Page consultée en juillet 2017.
- SPW - DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE AGRICULTURE, RESOURCES NATURELLES ET ENVIRONNEMENT (2017). Baromètre laitier wallon mars 2017. <https://agriculture.wallonie.be/documents/20182/21909/201702-Barom%C3%A8tre.pdf/4df87a93-2dd8-40c9-83fe-6b1ba73a97ed>. Page consultée en juillet 2017.
- TASDEMIR, S., URKMEZ, A. et INAL, S. (2011). Determination of body measurements on the holstein cows using digital image analysis and estimation of live weight with regression analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76:189–197.

BIBLIOGRAPHIE

- TASK FORCE INTERPROFESSIONNEL DURABILITÉ POUR LE SECTEUR LAITIÈRE (2013). Monitoring de la durabilité de la production laitière. http://www.ikm.be/content/files/010576_BCZ_Monitoring_Duurzaamheid_FR_02092013_LOW1.pdf. Page consultée en juillet 2017.
- TSURUTA, S., MISZTAL, I. et LAWLOR, T. (2004). Genetic correlations among production, body size, udder, and productive life traits over time in holsteins. *Journal of Dairy Science*, 87:1457–1468.
- VALLIMONT, J., DECHOW, C., DAUBERT, J., DEKLEVA, M., BLUM, J., BARLIEB, C., LIU, W., VARGA, G., HEINRICHS, A. et BAUMRUCKER, C. (2010). Genetic parameters of feed intake, production, body weight, body condition score, and selected type traits of holstein cows in commercial tie-stall barns. *Journal of Dairy Science*, 93:4892–4901.
- VALLIMONT, J., DECHOW, C., DAUBERT, J., DEKLEVA, M., BLUM, J., BARLIEB, C., LIU, W., VARGA, G., HEINRICHS, A. et BAUMRUCKER, C. (2011). Short communication : Heritability of gross feed efficiency and associations with yield, intake, residual intake, body weight, and body condition score in 11 commercial pennsylvania tie stalls. *Journal of Dairy Science*, 94:2108–2113.
- VALLIMONT, J., DECHOW, C., DAUBERT, J., DEKLEVA, M., BLUM, J., LIU, W., VARGA, G., HEINRICHS, A. et BAUMRUCKER, C. (2013). Short communication : Feed utilization and its associations with fertility and productive life in 11 commercial pennsylvania tie-stall herds. *Journal of Dairy Science*, 96:1251–1254.
- VAN ARENDONK, J., NIEUWHOF, G., VOS, H. et KORVER, S. (1991). Genetic aspects of feed intake and efficiency in lactating dairy heifers. *Livestock Production Science*, 29:263–275.
- Van der WERF, J. (2004). Is it useful to define residual feed intake as a trait in animal breeding programs? *Animal Production Science*, 44:405–409.
- VANDEHAAR, M. (2014). Feeding and breeding for a more efficient cow. *WCDS Advances in Dairy Technology*, 26:17–30.
- VANDEHAAR, M. J. (1998). Efficiency of nutrient use and relationship to profitability on dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 81:272–282.
- VANDEHAAR, M. J. *et al.* (2016). Understanding the physiological aspects to improving feed efficiency in dairy cows. In *Tri-State Dairy Nutrition Conference, 18-20 April 2016, Fort Wayne, Indiana, USA. 25th Anniversary*, pages 27–34. The Ohio State University.

BIBLIOGRAPHIE

- VANDEHAAR, M. J. et ST-PIERRE, N. (2006). Major advances in nutrition : Relevance to the sustainability of the dairy industry. *Journal of Dairy Science*, 89:1280–1291.
- VANDERICK, S., BASTIN, C. et GENGLER, N. (2015). Description des systèmes d'évaluations génétiques utilisés en wallonie. Rapport technique, Association Wallonne de l'élevage.
- VANRADEN, P. (2004). Invited review : Selection on net merit to improve lifetime profit. *Journal of Dairy Science*, 87:3125–3131.
- VANROBAYS, M.-L., VANDENPLAS, J., HAMMAMI, H., FROIDMONT, E. et GENGLER, N. (2015). Short communication : Novel method to predict body weight of primiparous dairy cows throughout the lactation. *Journal of Dairy Science*, 98:692–697.
- VEERKAMP, R. (1998). Selection for economic efficiency of dairy cattle using information on live weight and feed intake : A review. *Journal of Dairy Science*, 81:1109–1119.
- VEERKAMP, R., EMMANS, G., CROMIE, A. et SIMM, G. (1995). Variance components for residual feed intake in dairy cows. *Livestock Production Science*, 41:111–120.
- VISSER, K. (2017). Le repoussage automatique du fourrage augmente l'efficacité alimentaire! <https://www.lely.com/be/fr/actualites/2017/05/31/Le-repoussage-automatique-du-fourrage-augmente/>. Page consultée en juin 2017.
- WAGHORN, G. et HEGARTY, R. (2011). Lowering ruminant methane emissions through improved feed conversion efficiency. *Animal Feed Science and Technology*, 166:291–301.
- WALL, E., COFFEY, M. et AMER, P. (2008). A theoretical framework for deriving direct economic values for body tissue mobilization traits in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 91:343–353.
- WEIGEL, K., YAO, C., HOFFMAN, P., ARMENTANO, L., SPURLOCK, D., TEMPELMAN, R. et VANDEHAAR, M. (2014). Improving biological and economic aspects of production efficiency through genetic selection and genome-guided replacement management. In *Proceedings, 10th World Congress of Genetics Applied to Livestock Production, Vancouver*. American Society of Animal Science.

BIBLIOGRAPHIE

WHITE, R., SCHOFIELD, C., GREEN, D., PARSONS, D. et WHITTEMORE, C. (2004). The effectiveness of a visual image analysis (via) system for monitoring the performance of growing/finishing pigs. *Animal Science*, 78:409–418.