



HAL
open science

Utilisation du poids vif pour le monitoring des réserves corporelles et des matières sèches ingérées

Aymeric Charrier

► **To cite this version:**

Aymeric Charrier. Utilisation du poids vif pour le monitoring des réserves corporelles et des matières sèches ingérées . Sciences du Vivant [q-bio]. 2015. dumas-01256936

HAL Id: dumas-01256936

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01256936>

Submitted on 15 Jan 2016

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

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

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes



Année universitaire : 2014 - 2015

Spécialité :

Sciences de l'Animal pour l'élevage de
demain.....

.....

Spécialisation (et option éventuelle) :

.....

.....

Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Utilisation du poids vif pour le monitoring des réserves corporelles et des matières sèches ingérées

Par : Aymeric CHARRIER

Soutenu à Rennes le 21 Septembre 2015

Devant le jury composé de :

Maître de stage : Philippe FAVERDIN

Enseignant référent : Jocelyne FLAMENT

Autres membres du jury : Etienne LABUSSIÈRE, rapporteur

Autres membres du jury : Lucile Montagne, présidente

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible⁽¹⁾.

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).

Date et signature du maître de stage⁽²⁾ :

Droits d'auteur :

L'auteur⁽³⁾ autorise la diffusion de son travail

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Je remercie chaleureusement Philippe Faverdin, pour m'avoir fait confiance et permis d'effectuer ce merveilleux stage. Merci pour ta disponibilité malgré ton emploi du temps plutôt chargé. Merci beaucoup pour tous tes conseils et tes connaissances que tu m'as transmis tout au long de ce stage. J'en ferai bon usage. Enfin merci pour toutes ces conversations sur d'autres sujets que celui du stage qui étaient plus qu'intéressantes et dont je suis friand.

Je tiens aussi à remercier vivement Amélie Fischer, la thésarde qui m'a épaulé et qui a dû me supporter pendant ces 6 mois de stages. Malgré la quantité de travail que tu avais tu as toujours pris le temps de m'écouter, me conseiller et m'encourager. Et ce avec ta bonne humeur et ton sourire habituels ! Ne change surtout pas !

Philippe et Amélie, je vous remercie grandement pour votre encadrement qui a été d'excellente qualité, pour tous ces bons moments d'échanges et pour m'avoir redonné goût à la recherche ! J'espère continuer à avoir de vos nouvelles.

Je remercie également toute l'équipe SysLait pour leur accueil, leur gentillesse. J'ai beaucoup appris à vos côtés aussi bien au niveau scientifique et méthodologique, qu'humain. J'ai apprécié travaillé à vos côtés. Je remercie également toute l'équipe de Méjussaume pour m'avoir accueilli lors des prélèvements et pour leur bonne humeur à toute épreuve ! Plus généralement je remercie toute l'équipe de l'INRA de St Gilles pour ces 6 mois passés avec eux.

Merci à tous les enseignants de production animale d'Agrocampus Ouest (Rennes) pour leurs savoirs, leur écoute, et leurs conseils. Plus particulièrement à ma tutrice, Jocelyne Flament, et ceux de l'équipe SysLait pour les échanges qu'on a pu avoir et vos précieuses réponses à mes questions et problématiques. Merci aussi de m'avoir aidé à élaborer mon projet.

Je tiens aussi à remercier grandement mes collègues de bureaux, tout d'abord Anna et Capucine, puis Alexia et Yvane. Merci pour votre bonne humeur, pour ces pauses détentes et décompressions, ces délires et fous rires qui, même s'ils étaient *excessifs*, m'ont fait passer un excellent stage !

Merci aussi à tous les stagiaires restés sur Rennes pour m'avoir fait passer de bonnes soirées de franche rigolade. Merci à Hélène pour ces excellents moments de défoulement au Hand. Une pensée plus particulièrement à Anaëlle et Florence pour le covoiturage de l'ambiance et tous ces bons moments passés avec vous deux ! Comment ces soirées et week-end auraient-ils pu être aussi géniaux sans vous ?! Mille mercis, vous m'avez fait passer 6 mois magiques !

Sommaire

| | |
|---|------------|
| REMERCIEMENTS | I |
| SOMMAIRE | II |
| LISTE DES ABREVIATIONS | IV |
| LISTE DES FIGURES | V |
| LISTE DES TABLEAUX | VII |
| LISTE DES ANNEXES | VII |
| INTRODUCTION | 1 |
| MATERIELS ET METHODES | 3 |
| 1) DISPOSITIF EXPERIMENTAL..... | 3 |
| 2) MESURES ET ANALYSES..... | 4 |
| 3) MODELISATION DU POIDS VIF | 4 |
| a) <i>Représentation des contenus digestifs dans le modèle du poids vif</i> | 5 |
| b) <i>Bilan énergétique cumulé positif et négatif pour estimer la composante des réserves corporelles</i> | 6 |
| c) <i>Effet de la parité de la vache</i> | 7 |
| 4) PREVISION DES QUANTITES INGEREES A PARTIR D'UN MODELE SIMPLIFIE DU POIDS VIF | 7 |
| 5) DES ERREURS DE MODELES INTERPRETABLES COMME DE L'EFFICIENCE ALIMENTAIRE ?..... | 9 |
| a) <i>Calcul du RFI : indicateur de l'efficacité alimentaire couramment utilisé en recherche</i> | 9 |
| b) <i>L'efficacité alimentaire calculée à partir des erreurs des modèles de poids vif et des quantités ingérées</i> | 10 |
| 6) PREPARATION DE LA BASE DE DONNEES | 11 |
| a) <i>Détection et remplacement des valeurs aberrantes</i> | 11 |
| b) <i>Approximation des valeurs manquantes</i> | 12 |
| 7) ANALYSES STATISTIQUES | 12 |
| RESULTATS | 12 |
| 1) LE CHOIX DU MODELE STATISTIQUE INFLUENCE LES COEFFICIENTS DU MODELE DU POIDS VIF | 12 |
| 2) UN MODELE DU POIDS VIF PERMETTANT D'ESTIMER LES COMPOSANTES D'ENCOMBREMENT ET DE BILAN ENERGETIQUE | 13 |
| a) <i>Une utilisation énergétique différente selon le signe du bilan énergétique</i> | 13 |
| b) <i>Les quantités ingérées des trois derniers jours influencent le poids vif avec des coefficients décroissants</i> | 13 |
| 3) PREDICTION DES QUANTITES INGEREES : UN MODELE ORIGINAL QUI TROUVE SES LIMITES EN DEBUT DE LACTATION..... | 14 |
| 4) L'EFFICIENCE DES VACHES, UN PARAMETRE INDIVIDUEL QUI PEUT EXPLIQUER UNE PARTIE DES RESIDUS DES MODELES | 14 |
| a) <i>Un troupeau avec des efficacités très variables</i> | 14 |
| b) <i>Les erreurs du BE sont significativement corrélées à l'efficacité alimentaire des vaches laitières</i> | 15 |
| c) <i>Les erreurs d'estimation des QI significativement reliées à des différences interindividuelles d'efficacité alimentaire</i> | 15 |
| DISCUSSION | 15 |
| 1) UNE CONVERSION ROBUSTE ET COHERENTE DE L'ENCOMBREMENT DES CONTENUS DIGESTIFS EN POIDS . | 15 |
| 2) UNE ESTIMATION DES RESERVES CORPORELLES PAR LE POIDS VIF ENCOURAGEANTE MAIS ENCORE FRAGILE FAUTE DE REFERENCE FIABLE..... | 16 |
| a) <i>Des coefficients de conversion entre poids vif vie et énergie encore peu robustes</i> | 16 |
| b) <i>Le bilan énergétique reste une référence limitée pour estimer les variations individuelles des réserves corporelles en raison des variations d'efficacité alimentaire</i> | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 3) LE DEBUT DE LACTATION : UNE PERIODE PLUS DIFFICILE A CARACTERISER POUR LA PREDICTION DU POIDS VIF ET DES QUANTITES INGEREES..... | 18 |
| 4) VERS UNE GESTION ET UNE ALIMENTATION DU TROUPEAU PILOTEES PAR LE POIDS VIF ? | 19 |
| CONCLUSION | 20 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE ET SITOGRAPHIQUE..... | 21 |
| ANNEXES | 23 |

Liste des abréviations

AIC=Akaike Information Criterion

BE=bilan énergétique

BEC=bilan énergétique cumulé

JAV=jours après le vêlage

MS=matière sèche

MSE=mean square error

NEC=note d'état corporel

PV = poids vif

PV0=poids vif à t=0, dans cette étude il correspond à la moyenne du poids vif des 3 premiers jours de lactation

PVV=poids vif vide

QI=quantités ingérées

RFI=residual feed intake

RMSE=root mean square error

TB=taux butyreux

TP=taux protéique

Les modèles étudiés :

$$\mathbf{PVlm1} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif}$$

$$\mathbf{PVlm2} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif} + \text{Parité}$$

$$\mathbf{PVlm3} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif} + \text{Parité} + \text{Intéactions}$$

$$\mathbf{PVmlm3} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif} + \text{Vache}^{\#} + \text{JAV}^{\#}$$

$$\mathbf{PVmlm2} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif} + \text{Parité} + \text{Vache}^{\#} + \text{JAV}^{\#}$$

$$\mathbf{PVmlm3} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif} + \text{Parité} + \text{Intéactions} + \text{Vache}^{\#} + \text{JAV}^{\#}$$

Liste des Figures

- FIGURE 01 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU CONCEPT DE L'ELEVAGE DE PRECISION. (ALLAIN ET AL. 2014)**
- FIGURE 02 : CINETIQUE DU POIDS VIF (BW EN KG), DE LA NOTE D'ETAT CORPOREL (BCS, NOTEE DE 1 A 5) ET DE LA PRODUCTION LAITIERE (MILK YIELD EN KG) SELON LA PARITE DES VACHES LAITIERES AU COURS DE LA LACTATION (SPURLOCK ET AL. 2012)**
- FIGURE 03 : SCHEMA REPRESENTANT LES COMPOSANTES PRINCIPALES DU POIDS VIF D'UNE VACHE LAITIERE AU COURS D'UNE LACTATION (CHILLIARD ET AL. 1983).**
- FIGURE 04 : DISTRIBUTION DES VACHES ETUDIEES SELON LEUR PARITE (N=65 VACHES).**
- FIGURE 05 : SCHEMA RECAPITULATIF DES VARIABLES UTILISEES POUR ESTIMER LES COMPOSANTES DU PV ET L'EQUATION UTILISEE POUR LE MODELE PVLM3.**
- FIGURE 06 : ÉVOLUTION DE LA VITESSE DE TRANSIT DES PARTICULES DE FOURRAGES EN FONCTION DES QUANTITES DE MATIERE SECHE INGEREES. EXEMPLE POUR DEUX VACHES DE POIDS VIF 600 KG ET 750 KG. L'EQUATION EST ISSUE DES TRAVAUX DE (SAUVANT ET NOZIERE 2013).**
- FIGURE 07 : ÉVOLUTION DU BILAN ENERGETIQUE (MJ/JOUR) SELON LA PARITE DE 3 RACES DE VACHES (DANISH HOLSTEIN, POINTS ; DANISH RED, TRAIT PLEIN ; JERSEY, TIRETS) ALIMENTER PAR LA MEME RATION (FRIGGENS ET AL. 2007A)**
- FIGURE 08 : CORRELATION ENTRE LA QUANTITE D'ENERGIE NETTE INGEREE CORRIGEE DES INTERACTIONS DIGESTIVES MESUREE ET PREDITE PAR LE MODELE POUR UNE RATION DE 35% DE CONCENTRES.**
- FIGURE 09 : RESIDUS DES MODELES DE POIDS VIF PVLM1 A GAUCHE ET PVMLM1 A DROITE, EN FONCTION DES JOURS APRES LE VELAGE POUR LES 65 VACHES. LE TRAIT BLEU REPRESENTE LE LOESS AVEC UN DEGRE DE LISSAGE DE 50%.**
- FIGURE 10 : MATIERES SECHES INGEREES (MSI) MESUREES (TRAIT PLEIN) ET ESTIMEES (TIRET) POUR UNE VACHE DE L'ESSAI AU COURS DES 120 PREMIERS JOURS DE LACTATION.**
- FIGURE 11 : ÉVOLUTION DES RESIDUS DE LA PREDICTION DES QI EN FONCTION DU TEMPS POUR LES 65 VACHES. LE TRAIT BLEU CORRESPOND A LA MOYENNE LISSEE AVEC UN LOESS(DEGRE DE LISSAGE DE 50%)**
- FIGURE 12 : PV (TRAIT PLEIN) ET PVV (TIRET) D'UNE VACHE DE L'ESSAI AU COURS DE LA LACTATION. LE PVV EST EGAL AU PV MOINS LES CONTENUS DIGESTIFS ESTIME A PARTIR DU MODELE MIXTE DU PVMLM1**
- FIGURE 13 : RFI EN FONCTION DES RESIDUS MOYEN DE $\Delta PVV \sim \Delta BEC$ DES 65 VACHES.**
- FIGURE 14 : POIDS VIF, POIDS VIF VIDE, BILAN ENERGETIQUE CUMULE ET BILAN ENERGETIQUE CUMULE CORRIGE DE L'EFFICIENCE, POUR UNE VACHE MULTIPARE DE L'ESSAI AU COURS DES 120 PREMIERS JOURS DE SA LACTATION.**
- FIGURE 15 : RFI EN FONCTION DES RESIDUS MOYEN DE $Q_{MESUREES} \sim Q_{ESTIMEES}$ DES 65 VACHES.**
- FIGURE 16 : PREDICTION DES QUANTITES INGEREES SELON DIFFERENTS MODELES ET DES QUANTITES INGEREES MESUREES EN FONCTION DU STADE DE LACTATION POUR UNE RATION A 70% ENSILAGE DE MAÏS ET 30% DE CONCENTRES (FAVERDIN ET AL. 2006)**
- FIGURE 17 : DIGESTIBILITE DE DIFFERENTS CONSTITUANTS DE RATION ALIMENTAIRE CHEZ DES VACHES LAITIERES (DOREAU ET REMOND 1982)**
- FIGURE 18 : BILAN DES VALORISATIONS POSSIBLES DU MONITORING DU PV ASSOCIE AU MONITORING DE LA PRODUCTION LAITIERE.**

Liste des Tableaux

TABLEAU 01 : COMPOSITION DE LA RATION ET DE LA VALEUR ENERGETIQUE NETTE DES ALIMENTS.

TABLEAU 02 : FREQUENCE DE MESURE DES DIFFERENTES DONNEES

TABLEAU 03 : RECAPITULATIF DU NOMBRE DE VALEURS ABERRANTES TROUVEES DANS LE JEU DE DONNEES.

TABLEAU 04 : DESCRIPTION DES DONNEES CORRIGEEES ET COMPLETES DU POIDS VIF (PV), QUANTITES INGEREES (QI) ET BILAN ENERGETIQUE CUMULE (BEC).

TABLEAU 05: AIC ET RMSE DES MODELES DE PV ETUDIES

TABLEAU 06 : COEFFICIENTS DES VARIABLES EXPLICATIVES DES MODELES DU POIDS VIF ET DE VARIATIONS DE POIDS VIF PAR LE MODELE LINEAIRE GENERALISE (PVL1) ET PAR LE MODELE MIXTE DE POIDS VIF (PVML1)

TABLEAU 07 : COEFFICIENTS DES VARIABLES EXPLICATIVES DU MODELE DU RFI

TABLEAU 08 : METHODES DE PREDICTION DU POIDS DES CONTENUS DIGESTIFS DE BOVINS LAITIERS UTILISEES DANS NOTRE ETUDE.

TABLEAU 09 : DIFFERENTES METHODES DE PREDICTION DU POIDS DES CONTENUS DIGESTIFS DE BOVIN LAITIERS ISSUES DE LA LITTERATURE

Liste des Annexes

ANNEXE I : VALEURS ALIMENTAIRES PLUS DETAILLEES DES ALIMENTS DE LA RATION

ANNEXE II : PROTOCOLE DE DETERMINATION DE LA MATIERE SECHE DES ALIMENTS DE LA RATION

ANNEXE III : DEMONSTRATION DES EQUATIONS DE PREDICTION DES QUANTITES INGEREES A PARTIR DU MODELE DU POIDS VIF

ANNEXE IV : COEFFICIENT DES MODELES $PVLM3$ ET $PVMLM3$

ANNEXE V : REDULTATS PAR VACHES DES INDICATEURS D'EFFICIENCE ETUDIES : RFI , RESIDUS DU MODELE $\Delta PVV \sim \Delta BEC$ ET RESIDUS DU MODELE $Q_{MESUREES} \sim Q_{ESTIMEES}$

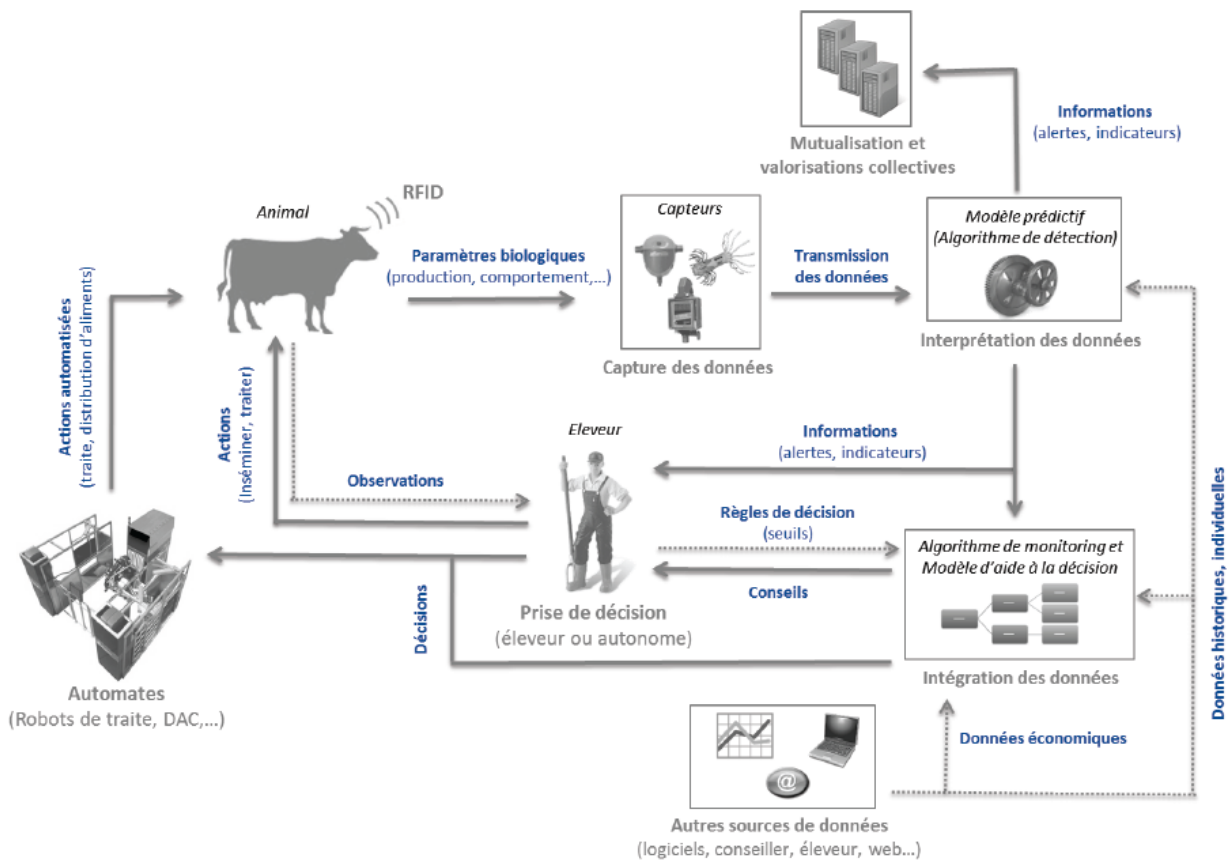


Figure 01 : Représentation schématique du concept de l'élevage de précision. (Allain *et al.* 2014)

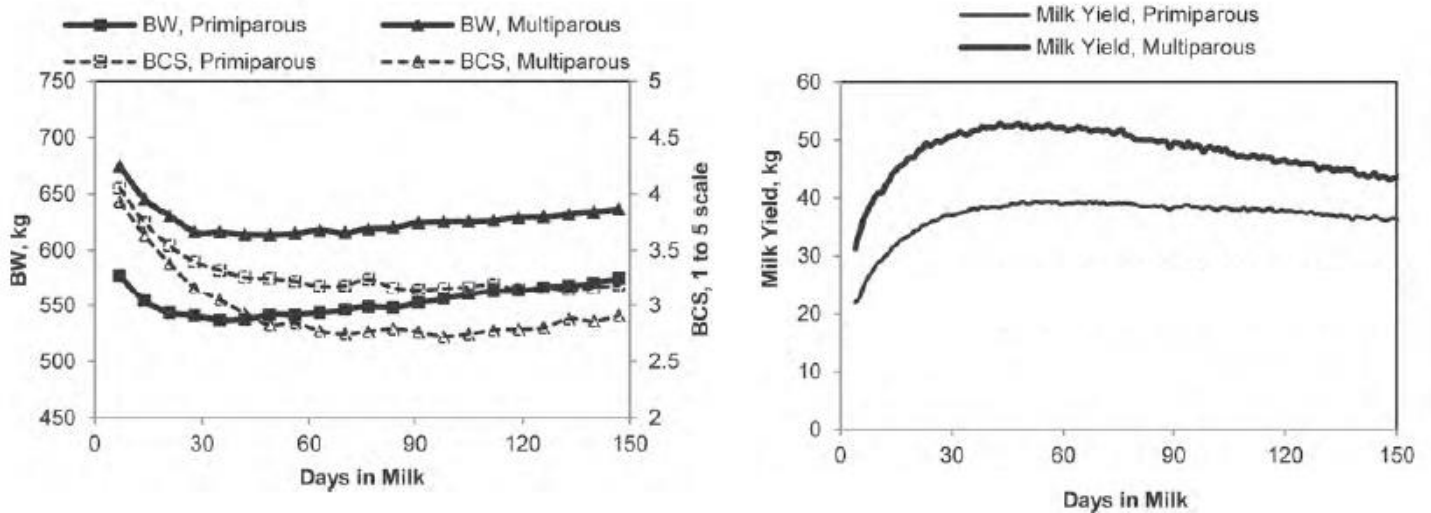


Figure 02 : Cinétique du poids vif (BW en kg), de la note d'état corporel (BCS, notée de 1 à 5) et de la production laitière (Milk Yield en kg) selon la parité des vaches laitières au cours de la lactation (Spurlock *et al.* 2012)

Introduction

Depuis les années 2000, l'élevage de précision est en plein essor. L'élevage de précision peut être défini comme « l'utilisation coordonnée i) de capteurs pour mesurer des paramètres comportementaux, physiologiques ou de production sur les animaux, ii) de technologies de l'information et de la communication pour échanger, stocker, transformer et restituer ces informations à l'éleveur pour l'aider dans sa prise de décision en complément de ses observations » (Allain *et al.* 2014; **Figure 1**). Ce dernier a été impulsé par un désir de rentabilité économique, de réduction de l'astreinte et de confort, autant physique que mental, du travail en exploitation (Allain *et al.* 2014). Son développement rapide a été permis par une expansion technologique qui n'a toujours pas atteint sa limite et une industrialisation permettant d'abaisser les coûts (Allain *et al.* 2014). L'automatisation et surtout le monitoring permettent une meilleure gestion du troupeau. En élevage laitier, le monitoring a été initié dans les années 80 avec le développement de compteurs à lait pour le suivi de la production laitière. Aujourd'hui l'utilisation de système de suivi des paramètres physiologiques (température, pH, etc...), biologiques (dosages de métabolites, conductivité, etc...), morphologiques (poids, état corporel, etc...) et comportementaux (activité, rumination, buvées, etc...) est de plus en plus démocratisée au sein des éleveurs. Les outils de monitoring les plus récents concernent le suivi du comportement alimentaire (durée d'ingestion, de rumination,...) et de la santé de l'animal. Toutefois, certaines de ces données obtenues ne sont pas encore très bien valorisées et leur fiabilité pas toujours démontrée (Allain *et al.* 2014). Peu d'éleveurs utilisent aujourd'hui le poids vif (PV) pour le suivi de l'animal en élevage même si plusieurs systèmes entièrement automatisés sont commercialisés (Taxatron 5000[®] de GEA Farm Technologies, Afiweight[®] de Afimilk, le Gravitor[®] du robot de traite Lely, etc...). Par exemple, le système de Lely utilise les variations de PV à court terme pour détecter les maladies et les variations sur le long terme comme étant des variations des réserves corporelles et par conséquent, d'adapter le régime alimentaire [1].

L'utilisation des réserves corporelles joue un rôle important dans la gestion de l'énergie des vaches laitières hautes productrices. En effet, ces réserves permettent aux vaches de produire beaucoup de lait en début de lactation et de manière continue. Cette mobilisation des réserves en début de lactation semble être programmée génétiquement (Friggens *et al.* 2007b). L'essentiel de l'énergie métabolisable apportée par la ration en début de lactation est orientée en priorité vers la mamelle (Chilliard et Ollier 1994). La cinétique des réserves corporelles au cours de la lactation est un miroir de la production laitière (Spurlock *et al.* 2012 ; **Figure 02**). Lorsque la production atteint son pic, les réserves corporelles sont au plus bas, puis la baisse de production s'accompagne d'une reconstitution des réserves corporelles jusqu'au prochain vêlage (Coffey *et al.* 2001 ; Roche *et al.* 2009). Cette utilisation accrue de l'énergie pour la production de lait peut cependant affecter les fonctions de santé et de reproduction, intrinsèquement liées aux qualités d'élevage des vaches laitières (Roche *et al.* 2009). De ce fait, la mesure de l'état des réserves corporelles, et plus précisément de leur variation, est un indicateur zootechnique très intéressant du point de vue de l'alimentation, de la fertilité, de la santé et du bien-être animal.

Cet indicateur peut soit traduire l'existence d'un problème d'alimentation ou de santé de l'animal, par exemple lorsque l'état ou la variation de l'état des réserves est trop grande, soit être un facteur de risques pour la santé et la reproduction. Par exemple, les troubles de santé peuvent altérer l'appétit des animaux et favoriser l'utilisation des réserves corporelles pour couvrir les besoins de l'animal. Collard *et al.* (2000) mettent en évidence que des troubles de santé tels que des problèmes locomoteurs (fourbure, problème de jambes, de jarret, inflammations,...) ou digestifs (diarrhée, fièvre du lait, déplacement de la caillette,...) affectent l'état des réserves corporelles. D'autre part, un état ou des variations d'état de réserves corporelles trop extrêmes peuvent être responsables d'une détérioration des performances de reproduction (Veerkamp *et al.* 2000 ; Pryce *et al.* 2001). Des réserves corporelles faibles sont synonymes de mauvaise fertilité et de problèmes de cyclicité tels qu'un allongement de l'intervalle vêlage-1^{ère} insémination fécondante. Une variation brutale des réserves corporelles peut induire des problèmes de santé tels qu'une production excessive de corps cétoniques résultant d'une chute brutale des réserves corporelles : la cétose (Roche *et al.* 2009). Malgré son grand intérêt, l'étude de la variation des réserves corporelles est difficilement envisageable dans les fermes, principalement parce que sa mesure est compliquée et coûteuse. Généralement, l'état des réserves corporelles est estimée par des indicateurs indirects tels que le bilan énergétique (BE), la note d'état corporel (NEC) ou encore le PV.

Le bilan énergétique alimentaire, appelé BE dans ce rapport, est calculé par la différence entre les apports d'énergie associées aux quantités ingérées par la vache ainsi qu'à la qualité de la ration et les dépenses d'énergie liées aux besoins de production, gestation, croissance et d'entretien. Le calcul de ces BE diffère selon les pays. En France le BE est calculé d'après les équations définies par les tables INRA (Agabriel *et al.* 2010). Un excès d'énergie apporté par la ration par rapport aux besoins sera stocké sous forme de réserves corporelles, le BE est alors positif ; à l'inverse un déficit d'énergie par rapport aux besoins sera comblé par la mobilisation des réserves corporelles, le BE est négatif. Le bilan énergétique cumulé (BEC), qui est la somme des BE au fil du temps, est représentatif de la variation des réserves corporelles. C'est un indicateur prisé en recherche, mais il n'est pas utilisé en ferme non expérimentale car il nécessite les mesures de quantités ingérées (QI) qui ne sont pas disponibles en ferme commerciale : les infrastructures nécessaires sont trop chères et leur utilisation trop contraignante.

La NEC, qui est la méthode la plus commune en élevage, est une notation visuelle et/ou par palpation de la vache par des experts d'après une grille de référence. Certaines entreprises proposent aujourd'hui un système de notation entièrement automatisé, basé sur des techniques d'imagerie. L'automatisation de cette technique permet non seulement de réduire le coût de la mesure mais surtout faire des mesures à haut débit qui soient plus objectives et plus répétables que la NEC. Cette automatisation fournira dans quelques temps des cinétiques très intéressantes à étudier pour approcher les variations des réserves corporelles.

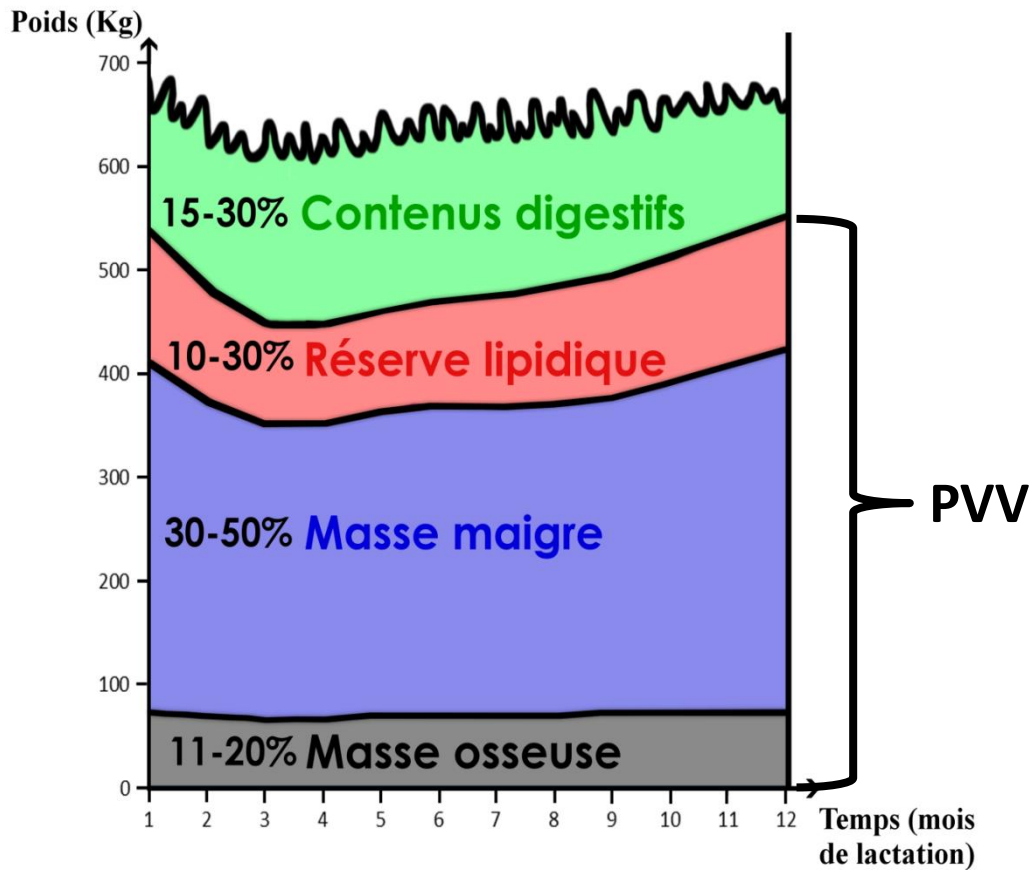


Figure 03 : Schéma représentant les composantes principales du poids vif d'une vache laitière au cours d'une lactation (Chilliard *et al.* 1983).
 Le poids vif vide (PVV) est le poids vif moins les contenus digestifs. Les valeurs sont données à titre d'exemple.
 Par simplification, les poids de l'utérus gravide, du fœtus et de la mamelle ne sont pas représentés ici.

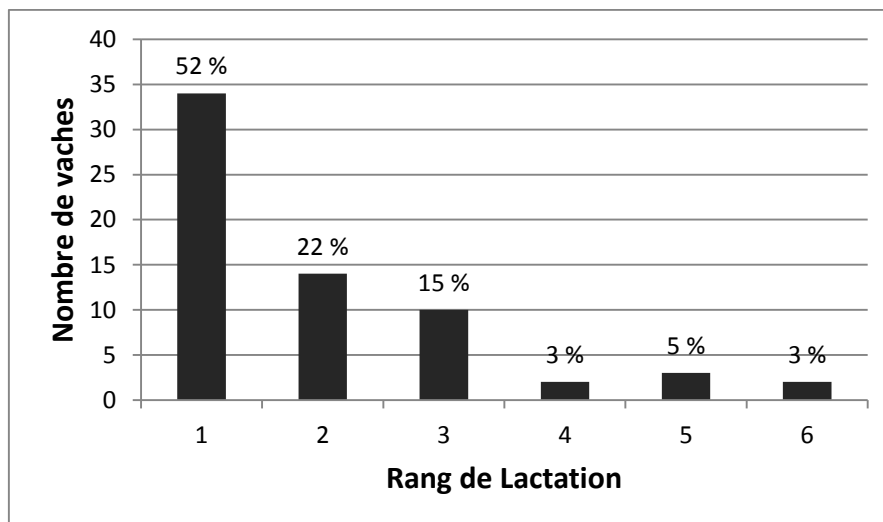


Figure 04 : Distribution des vaches étudiées selon leur parité (n=65 vaches).

De récents travaux ont montré que la combinaison des variations de PV et de la NEC estimait plutôt bien les variations énergétiques des réserves corporelles (Banos *et al.* 2005 ; Friggens *et al.* 2011 ; Thorup *et al.* 2012). En ce sens, les variations de PV constituent un phénotype intéressant et accessible pour estimer les variations des réserves corporelles. Le PV est constitué de 4 principales composantes : la « masse osseuse », « la masse maigre » qui est riche en eau, « la masse grasse », et la « masse des contenus digestifs » (**Figure 03**). Cependant, par ses différentes composantes, les variations de PV restent difficilement assimilables aux variations de la seule composante « masse lipidique » souvent assimilée aux réserves corporelles. L'utilisation du poids vif pour estimer les réserves corporelles doit par conséquent obligatoirement passer par l'élimination de la composante « contenus digestifs » (Friggens *et al.* 2011 ; Thorup *et al.* 2012) : c'est l'estimation d'un poids vif vide (PVV). Les variations du PVV représentent mieux celles des réserves corporelles. En début de lactation, les contenus digestifs augmentent beaucoup à cause de l'augmentation rapide des QI et masquent en partie la perte de PV liée à la mobilisation des réserves corporelles. Pour pallier au besoin d'avoir des QI, certains ont considéré que le poids des contenus digestifs était fonction du PV et en ont déduit le PVV (Friggens *et al.* 2011)

L'objectif de ce stage est d'améliorer l'estimation des réserves corporelles à partir des données de PV. Pour cela, nous allons orienter le travail autour de 3 questions :

- Peut-on construire un modèle du PV qui permette de mieux estimer le poids des contenus digestifs afin d'établir des liens plus étroits entre les variations des réserves corporelles et les variations de PVV ?
- Peut-on estimer les QI à partir des variations de PV et de la production laitière, pour rendre la mesure du PVV accessible en ferme ?
- Les problèmes d'ajustement du modèle aux données individuelles, notamment les écarts entre le BEC et la variation des réserves corporelles estimée par la variation de PVV, pourraient-ils provenir de différences d'efficacité alimentaire entre vaches ?

Matériels et méthodes

1) Dispositif expérimental

Les données utilisées sont issues d'une expérience qui s'est déroulée dans l'installation expérimentale INRA de Méjusse avec pour objectif d'étudier la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire au cours d'une lactation. Dans le cadre du stage, les données regroupent les 120 premiers jours après le vêlage des 65 vaches laitières Prim'Holstein suivies (de Septembre 2014 à Février 2015). Le lot expérimental était composé de 34 primipares et de 31 multipares (**Figure 04**). Les vaches étaient traitées deux fois par jour et alimentées après chaque traite avec une ration iso-protéique et iso-énergie à base d'ensilage de maïs.

Tableau 01 : Composition de la ration et de la valeur énergétique nette des aliments.

| Aliment | Proportion dans la ration (en % de MS _{totale}) | UFL / kg MS |
|--|--|---|
| Ensilage de maïs | 64,7 | 0,89 (13/08/2014 - 22/12/2014) et 0,95 (23/12/2014 - 02/02/2015) |
| Concentré énergétique | 13,5 | 1,07 |
| Tourteau de soja | 10,5 | 1,17 |
| Luzerne | 10 | 0,62 |
| Sulfate de NH ₄ | 1 | / |
| Compléments Minéraux Vitaminés 6/24/4 | 0,3 | / |

MS_{totale} : matière sèche de la ration totale distribuée ; UFL=unité fourragère lait = énergie nette pour la production laitière, 1UFL=1 700kcal.

Protocole de la détermination de la MS en ANNEXE II

Tableau 02 : Fréquence de mesure des différentes données

| Données | Fréquence des mesures |
|---|-----------------------|
| - Poids vif | 2 / jour |
| - Production laitière - Quantités ingérées (quantité offerte – quantité refusée) | 1 / jour |
| - Teneur en matière sèche de l'ensilage de maïs | 4 à 6 / semaine |
| - Note d'état corporel 3D (NEC3D) - Le taux butyreux, le taux protéique | 2 / semaine |
| - Teneur en matière sèche des concentrés | 1 / semaine |
| - Note d'état corporel par palpation | 1 / mois |

La composition de la ration (**Tableau 01 ; ANNEXE I**) est restée identique tout au long de la lactation et pour toutes les vaches : l'objectif était de n'étudier que la variation interindividuelle de l'efficacité alimentaire et donc de minimiser l'influence de l'environnement, notamment l'influence d'un changement de ration. Ce point est essentiel pour l'étude du PV car un changement de ration peut avoir des conséquences sur le poids des contenus digestifs et donc de l'interprétation du PV

2) Mesures et analyses

Toutes les mesures effectuées et leurs fréquences sont résumées dans le **Tableau 02**.

Le PV est mesuré tous les jours à la sortie de la traite par une stalle de pesée automatique statique : W-2000[®], un prototype développé par DeLaval (Tumba, Suède).

Les vaches sont traitées 2 fois par jour dans une salle de traite rotative avec traite par l'arrière (DeLaval). La production laitière est mesurée à chaque traite puis cumulée quotidiennement. Les taux butyreux et protéique sont collectés lors de 4 traites (2 matins et 2 soirs) par semaine sur deux jours : le mardi et le jeudi. 2% de la quantité de lait récupéré à chaque récolte est alors envoyé au laboratoire d'analyse pour déterminer la composition fine du lait par spectrophotométrie infrarouge. On obtient deux valeurs journalières pour chaque taux par semaine qui sont la moyenne du jour.

La ration est distribuée deux fois par jour, à 9h puis à 17h, dans des auges individuelles : chaque vache a son auge et n'a pas accès à l'auge des autres vaches. La quantité d'aliments offerts est pesée par le roulimètre, les quantités refusées sont pesées et retirées de l'auge chaque matin avant la distribution suivante. La teneur en MS de chaque aliment est connue et mesurée 1 à plusieurs fois par semaine selon l'aliment considéré (**Tableau 02 ; ANNEXE II**). La quantité d'aliments offerts est pesée en kg brut, et à partir de la teneur en matière sèche (MS) des aliments qui constitue la ration, on en déduit la quantité d'aliments offerts. La teneur en MS des refus est supposée identique à celle des quantités offertes, on en déduit les quantités refusées en kg de MS. La quantité d'aliments ingérés en MS (QI) est ensuite calculée quotidiennement comme la différence entre la quantité offerte en MS moins la quantité refusée en MS pour chaque auge. La valeur alimentaire de chaque aliment est déterminée au laboratoire départemental d'analyse, soit à la récolte pour les fourrages, soit à chaque livraison pour les concentrés. Un échantillon de chaque aliment est récolté et congelé chaque semaine dans le cas où des analyses *a posteriori* sont nécessaires sur la valeur alimentaire de la ration en cours d'essai. Dans le cadre de ce travail, nous nous focaliserons surtout sur la valeur énergie nette des aliments, exprimés en UFL pour les bovins laits.

3) Modélisation du poids vif

L'objectif est de développer un modèle des variations quotidiennes du PV des vaches laitières au cours de la lactation en prenant en compte les facteurs de variation des différentes composantes du PV, en particulier les variations liées aux contenus digestifs et celles des réserves corporelles (**Figure 03**).

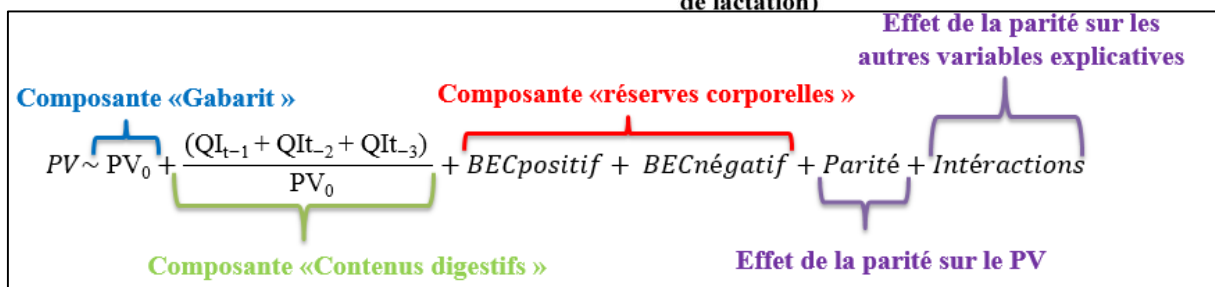
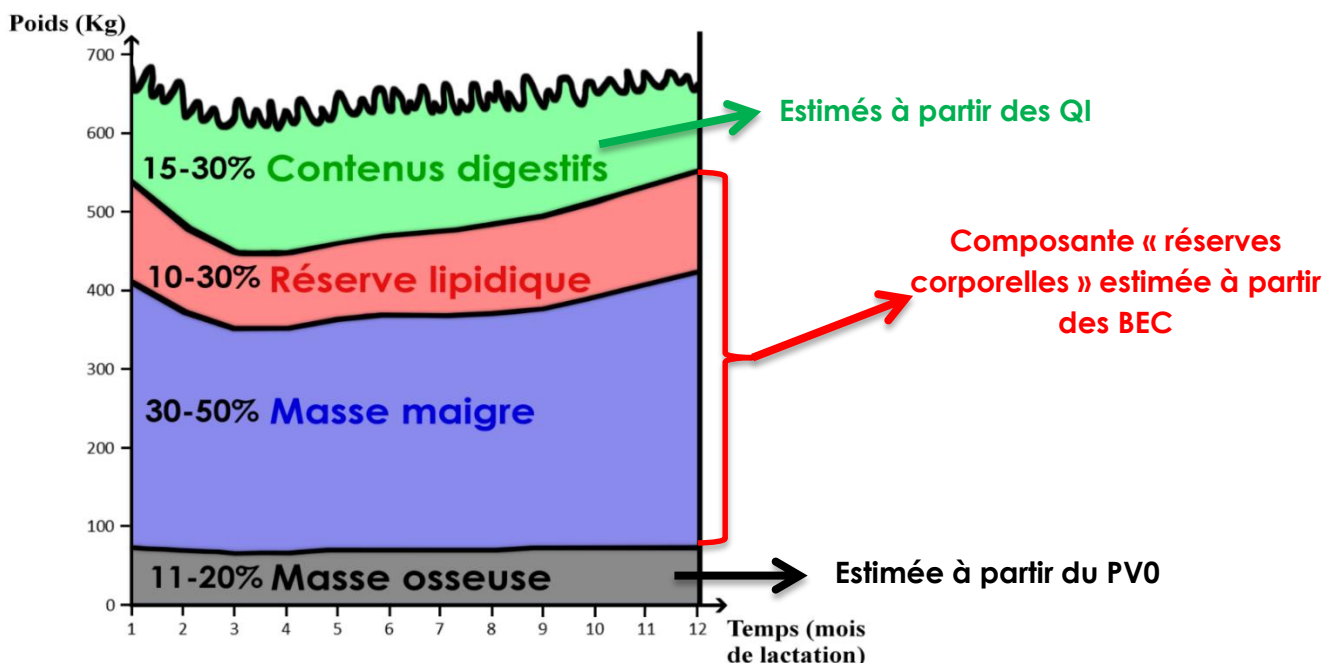


Figure 05 : Schéma récapitulatif des variables utilisées pour estimer les composantes du PV et l'équation utilisée pour le modèle PVlm3.

Les interactions sont celles entre la parité et les autres variables explicatives, à savoir relatives aux contenus digestifs et aux réserves corporelles.

$BEC_{positif}$ = bilan énergétique positif cumulé ; $BEC_{negatif}$ = bilan énergétique négatif cumulé ; PV = poids vif ; QI = quantité ingérée ; PV_0 = PV moyen des 3 premiers jours après le vêlage.

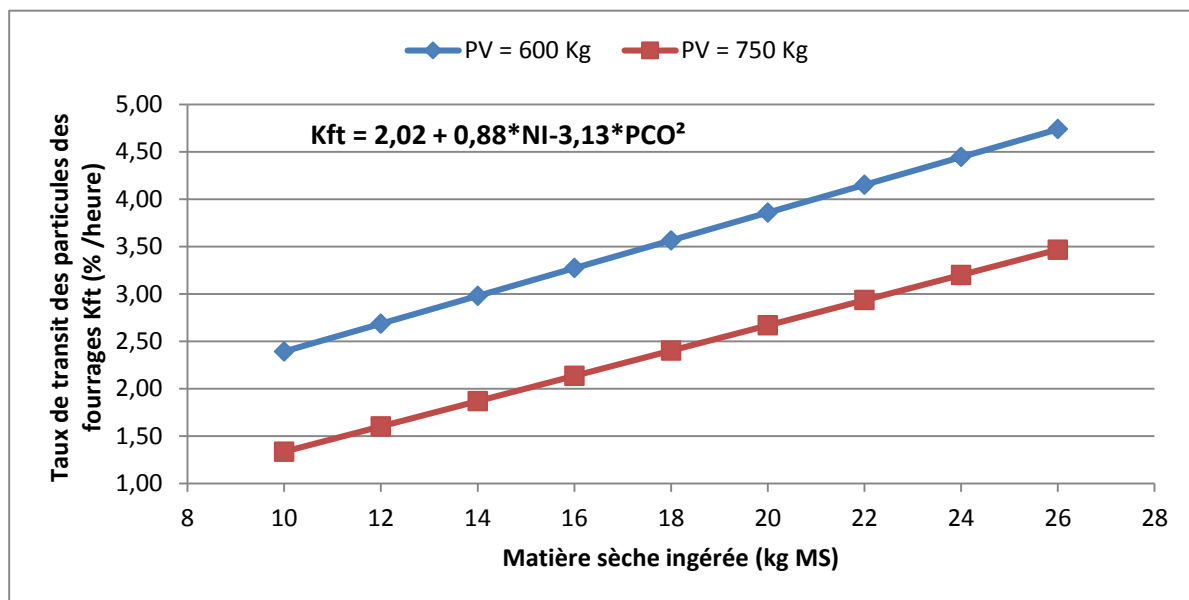


Figure 06 : Évolution de la vitesse de transit des particules de fourrages en fonction des quantités de matière sèche ingérées. Exemple pour deux vaches de poids vif 600 kg et 750 kg. L'équation est issue des travaux de (Sauvant et Nozière 2013).

PCO = pourcentage de concentrés dans la ration, la valeur de 0,35 a été prise pour illustrer avec notre ration ; NI = niveau d'ingestion de matière sèche exprimé en pourcentage du poids vif = $MSI/PV*100$.

Dans toute l'étude, seul le PV du matin a été utilisé, car il est moins sujet à des variations dues aux repas que le PV du soir, le 1^{er} repas de la journée étant distribué après la pesée. De plus, la pesée est effectuée après la traite lorsque la mamelle est vide, ce qui permet d'éviter les variations de poids liées à la production de lait. Le poids de l'utérus gravide et du fœtus ont été négligés car la période d'étude est inférieure à 150 jours de gestation où les poids de ceux-ci deviennent significativement importants (Thorup *et al.* 2012).

Deux modèles de simulation du PV ainsi que de ses variations liées aux contenus digestifs et aux variations des réserves ont été comparés. Les choix des variables du modèle sont explicités après la présentation des modèles. Le premier modèle du PV, PVlm3, est une analyse de covariance (ANCOVA¹ ; **Figure 05**), issue de PVlm1 :

$$PVlm1 = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BECpositif + BECnegatif$$

$$PVlm3 = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BECpositif + BECnegatif + Parité + \text{Intéractions}$$

Avec comme interactions celles entre le BECpositif, BECnegatif et les encombrements avec la parité

Si les coefficients sont robustes au cours du temps, l'effet du stade de lactation n'a pas besoin d'être introduit dans le modèle ANCOVA car il est intrinsèque aux variables explicatives du modèle. Pour vérifier cette absence de l'effet temps, un second type de modèle a été adopté pour tester la stabilité des coefficients du modèle : un modèle linéaire mixte. Ce type de modèle permet notamment d'intégrer un effet temporel dans le modèle come un effet aléatoire. De plus, pour corriger l'estimation des coefficients du modèle de l'effet aléatoire du choix des vaches de l'essai, nous avons également ajouté l'effet aléatoire « vaches » dans le modèle. On obtient le modèle *PVmlm1* puis *PVmlm3* en ajoutant la parité et les interactions.

$$PVmlm1 = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BECpositif + BECnegatif + Vache^\# + JAV^\#$$

$$PVmlm3 = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BECpositif + BECnegatif + Parité + \text{Intéractions} + Vache^\# + JAV^\#$$

Avec comme interactions celles entre le BECpositif, BECnegatif et les encombrements avec la parité. Vache[#] et JAV[#] sont des variables à effets aléatoires.

Pour chaque modèle, un poids de référence a été choisi comme point de départ en début de lactation. Compte tenu de la variabilité importante de la mesure du PV, la moyenne sur les 3 premiers jours de lactation a été choisie pour représenter le poids de référence (PV₀).

a) Représentation des contenus digestifs dans le modèle du poids vif

Sauvant et Nozière (2013) ont montré que le transit de la ration dans le tractus digestif augmentait avec les QI et que cet encombrement était proportionnel au format de l'animal, pour une ration donnée (**Figure 06**).

¹ l'ANCOVA est une analyse de covariance, elle crée un modèle de manière similaire qu'une analyse de variance sauf qu'elle explique une variable quantitative (ici le PV) par des variables quantitatives et qualitatives

Par ailleurs, Mambrini (1990) montre que pour une vache laitière le temps de séjour des aliments dans l'ensemble du tractus digestif varie d'une 40^{aine} d'heures à une 60^{aine} d'heures selon la composition de la ration (hors herbe fraîche) : soit entre 2 et 3 jours. L'idée a donc été de modéliser le poids des contenus digestifs par l'encombrement de la ration ingérée sur les 3 jours précédents : encombrement de la veille (à $t-1$), de l'avant-veille ($t-2$) et 3 jours avant ($t-3$). Chacun des 3 encombrements est calculé comme le rapport entre les QI et le PV moyen des 3 premiers jours de lactation (PV_0) qui est un indicateur du format de l'animal. La composante des contenus digestifs à l'instant t est donc estimée à partir des encombrements à $t-1$, $t-2$ et $t-3$:

$$\text{Contenu digestif à } t \sim \frac{QI \text{ à } t-1}{PV_0} + \frac{QI \text{ à } t-2}{PV_0} + \frac{QI \text{ à } t-3}{PV_0}$$

b) Bilan énergétique cumulé positif et négatif pour estimer la composante des réserves corporelles

La composante « masse lipidique » et la partie labile de la « masse maigre » constitue les réserves corporelles de la vache. Ces réserves corporelles sont dans notre étude estimées par l'indicateur utilisé en recherche : le BEC.

Le BE est calculé d'après les modèles des tables INRA 2010 (Agabriel *et al.* 2010) comme la différence entre l'apport en énergie nette de la ration ingérée et les besoins énergétiques pour la production laitière, l'entretien, la croissance et la gestation. Un BE positif indique que les apports sont supérieurs par rapport aux besoins, cet excès d'énergie ingérée est stocké sous forme de réserves corporelles : c'est une phase de constitution des réserves. A l'inverse un BE négatif s'interprète comme un déficit en énergie apportée, donc une phase de mobilisation des réserves corporelles. Le cumul des BE quotidien reflète donc l'évolution du niveau des réserves corporelles au cours de la lactation. Le calcul du BE en UFL, d'après Agabriel *et al.* (2010) :

BE = apports énergétiques - besoins énergétiques (entretien, production, croissance, gestation)

avec apports (en UFL) = somme des apports en énergie des aliments ingérés × E

apports d'un aliment (en UFL) = valeur énergétique de l'aliment (en UFL/ kg MS) × (QI (en kg MS) × % de l'aliment dans la ration × teneur MS aliment)

Ces apports alimentaires sont ensuite corrigés des interactions digestives, E, pour estimer l'énergie nette réellement disponible pour la vache :

$$E = (0,00063 \times \%C^2) - (0,017 \times \text{Apport}_{\text{ingérée total}}) + (0,002 \times \text{Apport}_{\text{ingérée total}}^2)$$

Avec %C le pourcentage de concentrés dans la ration, soit ici 35%, donc %C=35

Les besoins en gestation ont été considérés comme négligeables puisque l'on étudie seulement les 120 premiers jours de lactation (Agabriel *et al.* 2010).

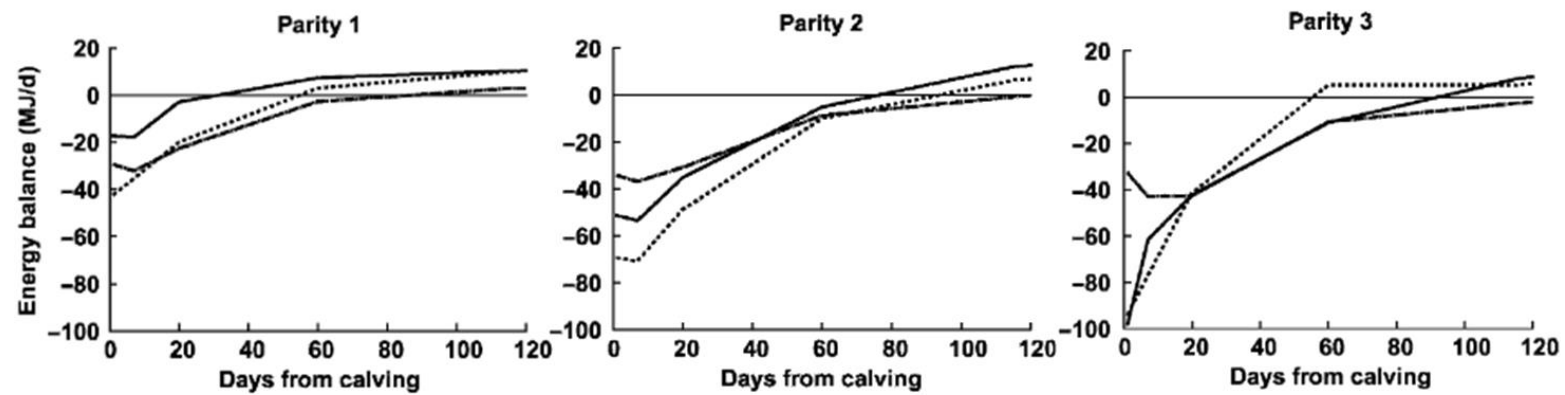


Figure 07 : Évolution du bilan énergétique (MJ/jour) selon la parité de 3 races de vaches (Danish Holstein, points ; Danish Red, trait plein ; Jersey, tirets) alimentées par la même ration (Friggens *et al.* 2007a)

Seuls les besoins de production ($Besoin_{production}$) et d'entretien ($Besoin_{entretien}$) ont été pris en compte :

$$Besoin_{entretien} = 0,041 \times PV^{0.75} \times 1,1$$

$$Besoin_{production} = PL \times [0,44 + (0,0055 \times (TB - 40)) + (0,0033 \times (TP - 31))]]$$

Avec le PV en kg, la production laitière (PL) en kg, TB et TP en g/kg

Chilliard *et al.* (1987) ont mis en évidence qu'un gain d'1 kg de PV est associé à un apport excédentaire de 4,5 UFL par la ration alors que la perte d'1 kg de PV équivaut à un déficit énergétique des apports de 3,5 UFL. Un BE positif ne serait donc pas associé à la même variation de PV qu'un BE négatif. Pour intégrer ces observations dans la construction du modèle de PV, nous avons séparé le BEC en deux variables : une cumulant les BE positif ($BE_{positif}$), l'autre les BE négatif ($BEC_{négatif}$).

En somme, les réserves corporelles sont estimées par :

$$Réserves\ corporelles\ à\ t \sim \sum_{i=1}^t BE_i\ positif + \sum_{i=1}^t BE_i\ négatif$$

c) Effet de la parité de la vache

L'âge de la vache influence la composition corporelle, les animaux jeunes sont généralement plus maigres que les plus âgés. De ce fait, les variations de poids peuvent représenter des équivalents énergétiques différents de celles de vaches adultes. La parité a alors un impact sur les réserves corporelles (**Figure 07**). Un facteur « *parité* » à 2 modalités ainsi que l'interaction de ce facteur avec les variables $BEC_{positif}$ et $BEC_{négatif}$ ont donc été ajoutés dans le modèle pour tenir compte de cette différence entre primipares et multipares.

Par ailleurs, Faverdin (1992) observe que les primipares ont une capacité d'ingestion plus faible que les multipares, et ce même après correction des différences de PV entre primipares et multipares. Cela peut se traduire par un effet spécifique de la parité sur l'encombrement du tractus digestif par les aliments ingérés. Des interactions entre l'effet « *parité* » et les 3 variables d'encombrement ont donc aussi été ajoutées au modèle.

4) Prévion des quantités ingérées à partir d'un modèle simplifié du poids vif

Dans les modèles construits, $PVlm3$ et $PVmlm3$, 2 composantes sont au centre du modèle : les contenus digestifs, modélisés par l'encombrement et les réserves corporelles, modélisées par le BEC. Ces 2 composantes sont fonction des QI : les QI sont au numérateur de l'encombrement et conditionnent les apports énergétiques dans le calcul du BE. Ceux deux variations reposent donc sur les variations des QI. L'idée est donc de partir d'un modèle expliquant le PV avec l'encombrement et le BEC (I) pour isoler les QI et de cette manière prédire les QI avec les variations de PV et des besoins énergétiques.

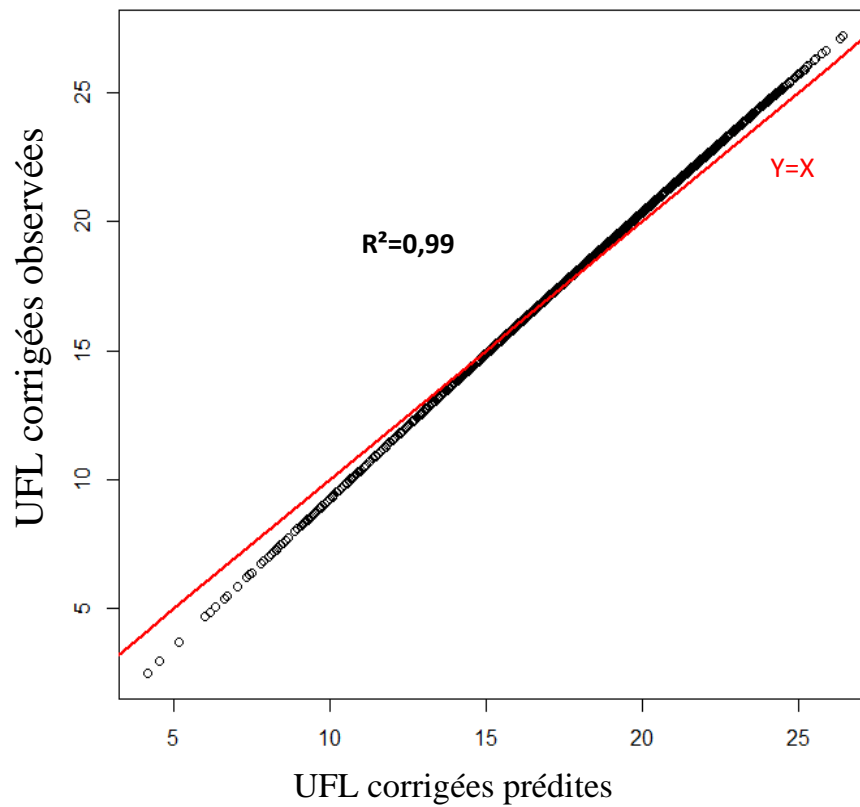


Figure 08 : Corrélation entre la quantité d'énergie nette ingérée corrigées des interactions digestives mesurée et prédite par le modèle pour une ration de 35% de concentrés.

Les UFL prédites ont été obtenues par l'équation : $UFL_{corrigée} = 0,863 \times (QI \times UFL_{ration}) + 1,35$, avec $UFL_{corrigée}$ les UFL ingérées corrigées des interactions digestives ; UFL_{ration} la teneur en UFL de la ration et QI les quantités ingérées en kg MS.

$$\Delta PV = \Delta \text{contenus digestifs} + \Delta \text{réserves corporelles}$$

$$\Delta PV = \delta \times \Delta QI + \alpha \times BEC \quad (1)$$

Avec $\Delta \text{contenus digestifs}$: variation des contenus digestifs, elle peut être calculée à partir des variations de QI comme cela a été proposé pour les modèles $PVlm3$ et $PVmlm3$ et $\Delta \text{réserves corporelles}$: variation des réserves corporelles, estimée comme précédemment par le BEC. On part d'un modèle simple de régression linéaire (2) du PV en fonction du BEC, de l'encombrement et du PV de référence (PV_0).

$$PV_t \sim \alpha BEC_{t-1} + \delta \times QI_{t-1} + \gamma PV_0 \quad (2)$$

En exprimant le BEC en fonction des QI, on a :

$$BEC = \sum_1^{t-1} \text{apports} - \sum_1^{t-1} \text{besoins} = \sum_1^{t-1} (QI \times \text{teneur UFL}) - \sum_1^{t-1} \text{besoins}$$

En remplaçant BEC dans l'équation mathématique issue du modèle (2), on a :

$$PV_t = \alpha \left(\sum_1^{t-1} QI(\text{teneur UFL}_{t-1}) - \text{besoins}_{t-1} \right) + \delta \times QI_{t-1} + \gamma PV_0$$

La variation de PV inter-jour se réduit à (3) :

$$PV_t - PV_{t-1} = \alpha(QI(\text{teneur UFL})_{t-1} - \text{besoins}_{t-1}) + \delta \times (QI_{t-1} - QI_{t-2}) \quad (3)$$

Avec *teneur en UFL* : la teneur en UFL de la ration le jour de mesure des QI, corrigée des interactions digestives ; PV_t : le poids vif du jour t ; BEC_{t-1} : le BEC le jour $t-1$; QI_{t-1} et QI_{t-2} : les QI du jour $t-1$ et $t-2$.

A partir de l'équation (3), on peut isoler QI_{t-1} . La teneur en UFL de la ration est la teneur en UFL de la ration corrigée des interactions digestives, E (cf partie 3.b). Afin d'éviter une équation quadratique des QI qui compliquerait l'équation (3), on utilise une simplification du calcul de l'énergie nette corrigée. Un modèle de régression linéaire entre l'énergie nette ingérée (UFL = QI x UFL_{ration}) et l'énergie nette ingérée corrigée des interactions digestives (UFL_{corrigées} = UFL - E) a été réalisé à partir d'un étalonnage d'énergie nette ingérée avec une ration caractéristique de la ration utilisée dans l'essai contenant 35% de concentrés. Les valeurs d'UFL_{corrigées} ont été calculées d'après Sauvante et Nozière (2013). La régression obtenue (4) sur les données simulées a une bonne validation quand elle est appliquée sur nos données : les UFL_{corrigées} calculées d'après les tables INRA (Agabriel *et al.* 2010) et les UFL_{corrigées} prédites par la régression (4) sont très corrélés avec un coefficient de détermination très proche de 1 (**Figure 08**)

$$UFL_{\text{corrigées}} = 0,863 \times (QI \times UFL_{\text{ration}}) + 1,35 \quad (4)$$

Cette équation n'est valable que pour une ration de même composition que celle étudiée lors de ce stage. Pour une ration différente, il faut réajuster le modèle. En combinant les équations (3) et (4), on arrive à isoler QI_{t-1} d'après l'équation (5) (Démonstration en ANNEXE III).

$$QI_{t-1} = \frac{(PV_t - PV_{t-1} - 1,35\alpha + \delta \times QI_{t-2} + \alpha \times Besoins_{t-1})}{\delta + 0,86 \times \alpha \times UFL_{ration_{t-1}}} \quad (5)$$

*Avec α et δ les constantes, issues de la régression multiple : $PV \sim K + \alpha BEC + \gamma PV_0 + \delta QI_{t-1}$, respectivement du bilan énergétique et du QI_{t-1} ; K une constante et UFL_{ration} : la teneur en UFL de la ration
On a $\alpha=0,21, \gamma=0,82, \delta=4,63$ et $K=35,42$*

Le modèle ainsi formalisé est une suite qui part de $QI_{t=0}$. Pour calculer les QI , il suffit donc d'estimer un $QI_{t=0}$ et d'avoir un monitoring du PV et de la PL. Les valeurs prédites des QI sont comparées à celles mesurées dans l'expérience. Pour tester la validité de cette méthode, on calcule la MSE (Mean Square Error), qui est la somme des différences au carré entre les valeurs mesurées et prédites, divisées par le nombre de valeurs.

5) Des erreurs de modèles interprétables comme de l'efficacité alimentaire ?

Les modèles construits font intervenir la notion de BE estimé par des bilans alimentaires qui reposent sur la qualité de prévision de modèles d'alimentation tel que le modèle INRA 2010 (Agabriel *et al.* 2010). Ces modèles sont déterministes et peuvent induire des erreurs importantes de prévision à l'échelle individuelle car ils sont ajustés sur un groupe d'animaux. Les vaches présentent des spécificités individuelles qu'il est toujours difficile de capter par ces modèles. Ces particularités peuvent venir de dépenses énergétiques spécifiques qui ne sont pas intégrées dans le modèle telles que la suractivité, la thermogénèse, (etc...) ou d'une allocation de l'énergie nette ingérée différente de celle prévue par le modèle. Le rendement de l'utilisation de l'énergie peut varier d'une vache à l'autre : on parle d'efficacité alimentaire. Il est donc intéressant de voir si un modèle permettant de classer les vaches en fonction de leur efficacité alimentaire permettrait d'expliquer une partie des erreurs des modèles de prévision du PVV et des QI .

a) Calcul du RFI : indicateur de l'efficacité alimentaire couramment utilisé en recherche

Cette notion d'efficacité alimentaire est couramment estimée avec le RFI (Residual Feed Intake ; Berry et Crowley 2013). Le RFI correspond aux résidus du modèle de prédiction des quantités ingérées à partir des variables qui expliquent les différences de quantités ingérées à l'échelle de l'animal. Une vache qui ingère plus que ce que prédit le modèle est considérée comme moins efficace, les résidus du modèle sont positifs : le RFI est positif. A l'inverse, une vache qui mange moins que prédit par le modèle est considérée comme plus efficace : son RFI est négatif. Le modèle des quantités ingérées qui permettra de calculer le RFI (6) comme différence entre les QI observées et prédites a été construit à partir de variables associées aux besoins de production, d'entretien et de mobilisation/constitution des réserves corporelles.

Le besoin de production a été représenté par 3 variables : le cumul des quantités de lait produites (PL), le cumul des quantités de matière grasse produites (MG) et le cumul des quantités de matière protéique produite (MP) sur la période d'étude. Le besoin d'entretien est représenté par le PVV moyen calculé d'après l'équation (7) de Piton (1975). La dynamique des réserves corporelles est calculée par 2 variables : $\Delta PVV_{\text{final-initial}}$ et $\Delta PVV_{\text{final-min}}$. $\Delta PVV_{\text{final-initial}}$ est calculée comme la différence entre PVV final et initial. $\Delta PVV_{\text{final-min}}$ est calculée comme la différence entre PVV final et minimal. On suppose qu'à même bilan sur la période, à même $\Delta PVV_{\text{final-initial}}$, une cinétique plus marquée de mobilisation/reconstitution des réserves corporelles, donc un $\Delta PVV_{\text{max-min}}$ plus grand, engendre un coût énergétique supplémentaire.

Le modèle utilisé pour prédire les QI est alors :

$$QI \sim PL + MG + MP + PVV + \Delta PVV_{\text{final} - \text{min}} + \Delta PVV_{\text{final} - \text{initial}} \quad (6)$$

Avec *QI* les quantités ingérées (en kg MS), *PL* la production laitière (en kg), *MG* la matière grasse du lait (en kg), *MP* la matière protéique du lait (en kg), *PVV* le poids vif vide (en kg).

$$PVV \text{ (kg)} = PV \text{ (kg)} - 4.5 \times QI \text{ (kg MS)} \quad (7)$$

Le RFI d'une vache correspond au résidu issu du modèle du QI (7).

b) L'efficacité alimentaire calculée à partir des erreurs des modèles de poids vif et des quantités ingérées

- Calcul à partir des erreurs des modèles du PV

Le PVV correspond à la différence entre le PV et le poids du contenu digestif. Les variations de PVV représentent les variations des réserves corporelles au cours de la lactation. L'estimation de ces dernières n'est pas mesurable directement, mais ont été estimées par le BE. Le PVV est estimé à partir du modèle *PVmlm1* en retirant les composantes associées à l'encombrement aux PV observés (8) car ces encombrements, multipliés par leurs coefficients dans le modèle, modélisent la composante « contenus digestifs » du PV. D'après la définition du PVV, on a :

$$PVV_t = PV_t - \text{le poids du contenu digestif}_t$$

En reprenant le modèle *PVmlm1* on a .:

$$PVV_t = PV_t - \frac{(\delta_1 QI_{t-1} + \delta_2 QI_{t-2} + \delta_3 QI_{t-3})}{PV_0} \quad (8)$$

Avec δ_1 , δ_2 et δ_3 les coefficients respectifs de l'encombrement à *t-1*, *t-2* et *t-3*, issus du modèle mixte *PVmlm1*.

Normalement le BEC a la même cinétique que le PVV. Dans le cas contraire, un BEC constant ou qui diminue alors que le PVV augmente indiquerait que le BEC sous-estime la constitution des réserves corporelles, donc que la vache est plus efficace que prévue ; et inversement. La méthode employée a donc été dans un premier temps d'estimer l'écart de cinétique entre le PVV et le BEC et dans un second temps de corrélérer cet écart au RFI pour savoir si l'écart est explicable par l'efficacité alimentaire des vaches.

L'écart de cinétique a été calculé comme les résidus de la régression linéaire entre les variations de PVV au cours de l'essai et les variations de BEC. La comparaison entre les deux méthodes de détermination de l'efficacité s'effectue en étudiant la relation entre le RFI et les résidus du modèle (9).

$$(PVV_t - PVV_{t-1}) = \mu + \beta \times (BEC_t - BEC_{t-1}) + \varepsilon \quad (9)$$

Quand les résidus du modèle (9), ε , sont positifs, cela signifie que la variation de PVV prévue par le BEC est inférieure à la variation de PVV observée : la vache gagne plus de poids que prévu, elle est plus efficace que prévu et inversement pour des résidus négatifs. Ainsi si l'écart entre la cinétique du PVV et celle du BEC est expliquée par de l'efficacité énergétique alors on devrait avoir un RFI corrélé négativement aux résidus du modèle (9) une vache efficace a un RFI négatif et des résidus de modèle (9) positifs

- Calcul à partir des erreurs du modèle estimant les QI

De la même manière, la différence entre les QI observées et les QI prédit à partir des variations de PV d'après l'équation (6) pourrait mettre en évidence des différences d'efficacité alimentaire entre vaches. Une différence moyenne positive sur la période étudiée s'interpréterait de la même manière qu'un RFI positif à savoir que la vache a ingéré plus que prévu pour couvrir ses besoins, donc qu'elle est moins efficace que prévu et inversement pour une différence négative. Si la relation entre cette différence et le RFI existe et est positive, une partie des erreurs du modèle d'ingestion pourraient s'expliquer par les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire.

6) Préparation de la base de données

a) Détection et remplacement des valeurs aberrantes

Les données utilisées dans le cadre de stage sont issues d'outils de monitoring qui peuvent parfois tomber en panne ou fournir des données aberrantes issues de dysfonctionnement de l'outil. La stalle de pesées en sortie de traite présentait des problèmes d'identification ou de tare à certains moments, pouvant expliquer ces valeurs. De même l'automate de distribution de la ration a eu quelques dysfonctionnements pendant la période d'essai, à l'origine de données de QI aberrantes. Les données de production de lait peuvent parfois être erronées suite à un problème de fonctionnement des préleveurs du roto. Par ailleurs, certaines analyses de composition fines du lait réalisées par le laboratoire d'analyses étaient erronées pour des causes encore mal identifiées. La détection de ces valeurs aberrantes a été faite à l'aide de régressions locales de type Loess (LOcally wEighted Scatter plot Smoothing). Le Loess est un outil de lissage qui permet de prendre en compte plusieurs valeurs voisines autour de chaque valeur. C'est une méthode de détection de valeurs aberrantes couramment utilisée en statistique et qui est peu sensible aux points extrêmes. Ceci est très utile pour des séries temporelles non stationnaires², ce qui est notre cas. Pour le PV, la PL, les QI, les TB et TP, le Loess a été ajusté aux données avec un degré de lissage de 50%. Toute valeur en dehors d'un intervalle de plus ou moins 2 écart-types autour de ce Loess a été considérée comme aberrante et supprimée.

² : Une série est stationnaire si sa moyenne et sa variance sont stables au cours du temps

Tableau 03 : récapitulatif du nombre de valeurs aberrantes trouvées dans le jeu de données.

| Variable | Nombre de valeurs aberrantes | Nombre totale de valeurs |
|---------------------|------------------------------|--------------------------|
| Poids vif | 185 (2,9%) | 6 489 |
| Production laitière | 76 (1,2%) | 6 489 |
| Quantité ingérée | 264 (4,0 %) | 6 489 |
| Taux butyreux | 70 (3,6%) | 1 919 |
| Taux protéique | 33 (1,7%) | 1 919 |

Tableau 04 : Description des données corrigées et complètes du poids vif (PV), quantités ingérées (QI) et bilan énergétique cumulé (BEC).

| Variable | Min / Max | Médiane | Ecart type |
|-----------|----------------|---------|------------|
| PV (kg) | 430 / 811 | 566,7 | 71,3 |
| QI (kg) | 3,6 / 31,5 | 20,3 | 3,9 |
| BEC (UFL) | -293,4 / 191,2 | -36,2 | 77,1 |

Ces valeurs ont été choisies de manière empirique pour maximiser la détection de valeurs aberrantes tout en conservant les bonnes valeurs. La valeur supprimée a été remplacée par la valeur estimée à partir du Loess. Le pourcentage de données aberrantes trouvées est résumé dans le **Tableau 03**.

b) Approximation des valeurs manquantes

Dans une optique d'un modèle journalier, il est préférable de n'avoir aucune valeur manquante. Même si le nombre très élevé de données et le faible taux de valeurs à estimer de notre jeu de données fait que l'ajout de valeurs non mesurées n'a que peu d'impact sur les degrés de liberté du modèle statistique. Les valeurs manquantes (bug des outils de monitoring ou valeur non enregistrée) de la matière sèche, des taux et de la production laitière ont été approximées par régression linéaire entre le plus proche voisin précédant et le plus proche voisin suivant à la valeur manquante. Afin de conserver un maximum les variations du PV et des QI, les données manquantes ont été estimées à partir du Loess de degré de lissage 50%. Le **Tableau 04** décrit les données corrigées et complétées pour les variables principales, à savoir PV, QI et BEC.

7) Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été effectuées sur la version 3.1.2 du logiciel statistique R[®] (<http://www.R-project.org>). Les analyses de variance/covariance sont de type III et proviennent du package *FactoMineR* [2]. Le seuil de significativité a été fixé à 5% comme à l'usuel. Le meilleur modèle du PV a été déterminé par l'étude des résidus et notamment la comparaison du Root Mean Square Error (RMSE) des différents modèles :

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \times (Y_{i\text{mesuré}} - Y_{i\text{prédit}})^2} = \sqrt{MSE}$$

Avec N le nombre de données.

Les modèles mixtes *PVmlm1,2 et 3* ont été réalisés à l'aide du package *lme4* [3]. Pour déterminer le meilleur modèle mixte, l'AIC (Akaike Information Criterion) a été utilisé. Le modèle avec le plus petit AIC est conservé, c'est celui qui minimise la perte naturelle d'informations lors de l'ajout de variables dans le modèle. L'ajout de nouvelle variable doit être pertinent puisque l'AIC va se retrouver pénalisé par cet ajout. Rappelons enfin que l'AIC ne témoigne pas de la qualité d'une prédiction, il compare des modèles et indique seulement lequel est le plus pertinent (AIC le plus faible).

Résultats

1) Le choix du modèle statistique influence les coefficients du modèle du poids vif

Tableau 05: AIC et RMSE des modèles de PV étudiés

| Modèles étudiés | AIC | RMSE |
|-----------------|--------|-------|
| <i>PVlm1</i> | 68 179 | 23,3 |
| <i>PVlm2</i> | 68 181 | 23,3 |
| <i>PVlm3</i> | 68 101 | 23,1 |
| <i>PVmlm1</i> | 59 048 | 11,73 |
| <i>PVmlm2</i> | 59 049 | 11,73 |
| <i>PVmlm3</i> | 58 934 | 11,64 |

PVlm1 = PV - BECpositif + BECnégatif + PV0 + (QIt-3 + QIt-2 + QIt-1)/PV0 ; *PVlm2* = *PVlm1* + Parité et *PVlm3* = *PVlm2* + interactions*

PVmlm1 = *PVlm1* + JAV et VL en variable aléatoire ; *PVmlm2* = *PVmlm1* + Parité et *PVmlm3* = *PVmlm2* + interactions**

Interactions* = Parité X BE cumulé positif + Parité X encombrement à t-1

Interactions** = Interactions* + Parité X variation d'encombrement à t-2

Tableau 06 : Coefficients des variables explicatives des modèles du poids vif et de variations de poids vif par le modèle linéaire généralisé (*PVlm1*) et par le modèle mixte de poids vif (*PVmlm1*)

| Variables | Modèle <i>PVlm1</i> | Modèle <i>PVmlm1</i> |
|-------------------------|---------------------|----------------------|
| constante | -27,3 (***) | -20,9 () |
| PV0 (kg) | 0,943 (***) | 0,974 (***) |
| BECneg (UFL) | 0,093 (***) | 0,214 (***) |
| BECpos (UFL) | 0,434 (***) | 0,116 (***) |
| Encombrement t-1 (kgMS) | 902 (***) | 731 (***) |
| Encombrement t-2 (kgMS) | 693 (***) | 614 (***) |
| Encombrement t-3 (kgMS) | 386 (***) | 462 (***) |

Code de Significativité : 0 < '***' < 0,001 < '**' < 0,01 < '*' < 0,05 < '.' < 0,1 < ' ' < 1

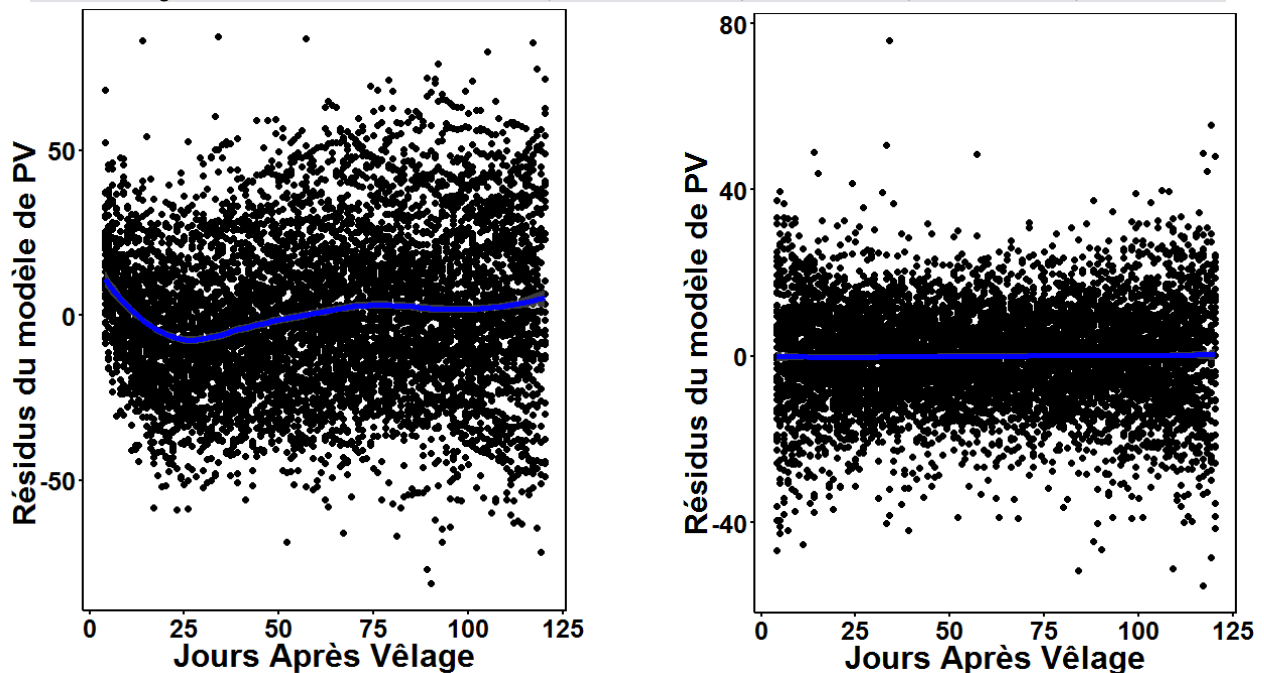


Figure 09 : Résidus des modèles de poids vif *PVlm1* à gauche et *PVmlm1* à droite, en fonction des jours après le vêlage pour les 65 vaches. Le trait bleu représente le Loess avec un degré de lissage de 50%.

Les modèles étudiés ont une bonne qualité de prédiction puisque les RMSE sont autour de 23 kg pour les modèles *PVlm* et autour de 12 kg pour les modèles mixtes *PVmlm* sachant que l'écart type intravache du PV est en moyenne de 20 kg (**Tableau 05**). De plus, quel que soit le type de modèle étudié, l'ajout de l'effet parité et des interactions ne diminue pas beaucoup l'AIC et la RMSE au prorata du nombre de variables ajoutées (**Tableau 05, ANNEXE IV** pour les coefficients). Pour cette raison, nous poursuivons les analyses uniquement sur les modèles *PVlm1* et *PVmlm1*. La comparaison de *PVlm1* et *PVmlm1* montre que la RMSE est presque 2 fois plus petite pour *PVmlm1* : le modèle aboutit à un meilleur modèle. Les coefficients sont différents entre les 2 modèles, sauf pour le PV_0 (**Tableau 06**). Pour les 2 modèles, les coefficients relatifs à l'encombrement diminuent de t-1 à t-3 : plus l'ingestion est ancienne, moins son effet sur les contenus digestifs est important. Par contre on observe que les coefficients du modèle mixte *PVmlm1* sont plus faibles que ceux de la régression multiple *PVlm1*. La différence entre les 2 modèles est plus marquée pour les coefficients associés aux BEC. D'une part l'écart entre les coefficients du $BEC_{positif}$ et $BEC_{negatif}$ est 3,5 fois plus important pour le modèle *PVlm1* par rapport à l'écart absolu de ces coefficients pour *PVlm1*. D'autre part la variation de PV associée à une variation de $BEC_{positif}$ est supérieure à celle engendrée par une variation identique du $BEC_{negatif}$ ($0,43 > 0,09$) pour le modèle *PVlm1* alors que c'est l'inverse pour le modèle *PVmlm1*. Les coefficients du modèle *PVlm1* et plus particulièrement ceux associés aux BEC ne sont donc pas stables vu qu'ils ne sont pas similaires à ceux de *PVmlm1*. L'étude des résidus des 2 modèles au cours de la lactation met en évidence que *PVmlm1* a des résidus distribués aléatoirement au cours du temps alors que *PVlm1* a des résidus dépendant du stade de lactation (**Figure 09**).

2) Un modèle du poids vif permettant d'estimer les composantes d'encombrement et de bilan énergétique

a) Une utilisation énergétique différente selon le signe du bilan énergétique

Les coefficients pour les BEC du modèle *PVmlm1* sont respectivement de 0,21 kg/UFL et 0,12 kg/UFL pour le BEC négatif et le BEC positif (**Tableau 06**). Pour perdre 1 kg de PV, il faut un déficit énergétique de la ration de $1/0,21=4,8$ UFL pour *PVmlm1* alors qu'il faut $1/0,093=10,8$ UFL en déficit pour le modèle *PVlm1*. Pour gagner 1 kg de PV, il faut un excès énergétique de la ration $1/0,12=8,3$ UFL d'après le modèle *PVmlm1* alors qu'il en faut $1/0,434=2,3$ UFL d'après le modèle *PVlm1*. Pour une même variation absolue de BE la variation absolue de PV sera plus importante quand le BEC est négatif que lorsqu'il est positif, d'après *PVmlm1* et inversement pour *PVlm1*. Dans les 2 cas, le gain de PV n'a pas le même coût énergétique que la perte de PV.

b) Les quantités ingérées des trois derniers jours influencent le poids vif avec des coefficients décroissants

Les QI des trois jours précédant la pesée sont toutes significatives et ont donc été conservées dans le modèle (**Tableau 06**).

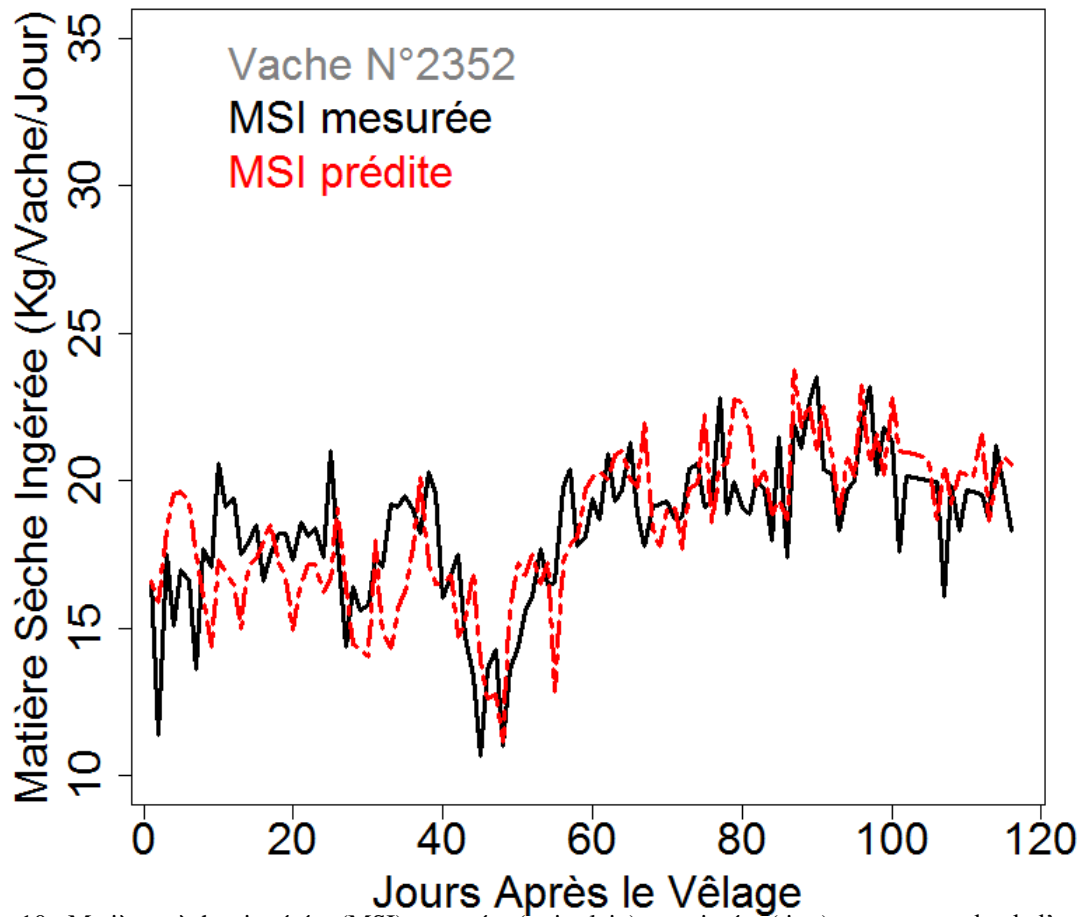


Figure 10 : Matières sèches ingérées (MSI) mesurées (trait plein) et estimées (tiret) pour une vache de l'essai au cours des 120 premiers jours de lactation.

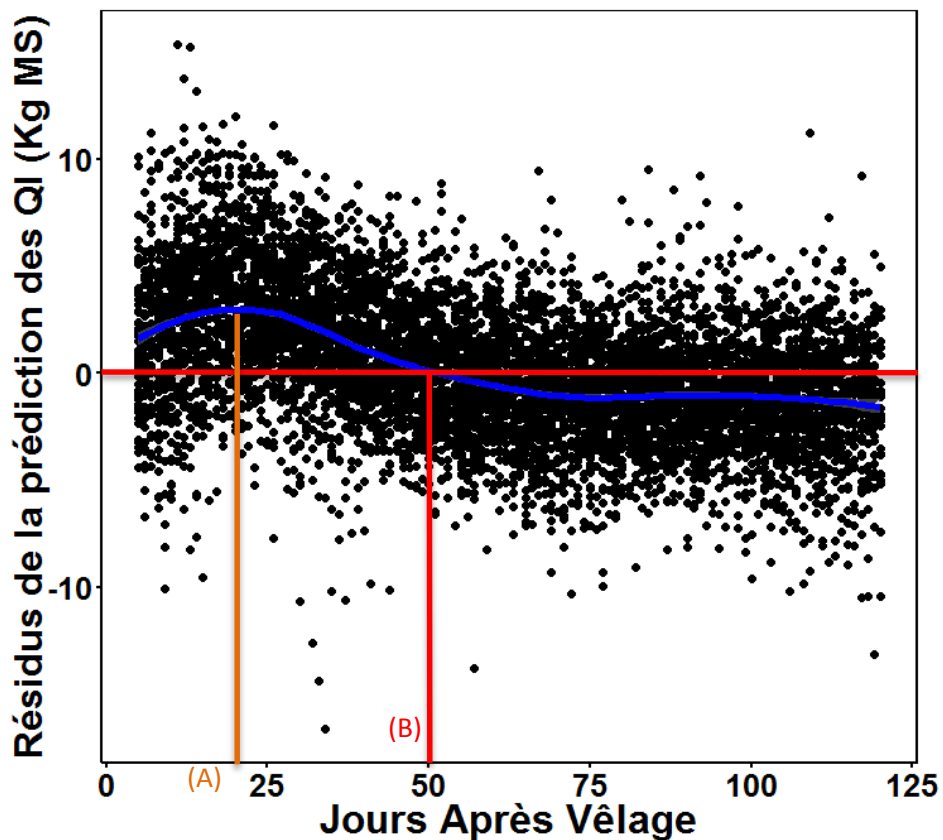


Figure 11 : Évolution des résidus de la prédiction des QI en fonction du temps pour les 65 vaches. Le trait bleu correspond à la moyenne lissée avec un Loess(degré de lissage de 50%)
Avec (A) = la date à laquelle les résidus sont au maximum. (B) = la date à laquelle les résidus redeviennent nuls

D'après le modèle *PVmlm1* (respectivement *PVlm1*) pour un PV0 de 650kg, une augmentation des QI d'1 kg MS à t-1, t-2 et t-3, entraîne respectivement une augmentation de PV de $731/650=1,1$ kg ($902/650=1,4$ kg), $614/650=0,94$ kg ($693/650=1,1$ kg) et de $462/650=0,7$ kg ($386/650=0,6$ kg) de PV (**Tableau 06**). Que ce soit à t-1, t-2 ou t-3, la variation de PV provoquée par une même variation de QI est plus faible dans le modèle *PVmlm1* que *PVlm1*. Par contre, quel que soit le modèle, on observe que les coefficients des encombrements diminuent de t-1 à t-3. L'encombrement des QI sur le PV diminue donc avec l'ancienneté de l'ingestion des QI.

3) Prédiction des quantités ingérées : un modèle original qui trouve ses limites en début de lactation

La comparaison entre les valeurs prédites à partir de l'équation (5) et les valeurs de QI mesurées donne une RMSE plutôt faible de 3,31 kg MS. Sachant que l'écart type des QI est de 3,85 kgMS, la prédiction des QI par l'équation (6) est performante (exemple d'une vache sur la **Figure 10**). Les résidus sont plus importants entre le 4^{ème} et le 40^{ème} jour de lactation (**Figure 11**) : l'équation (5) sous-estime les QI en début de lactation. Ce biais du début de lactation est présent pour la majorité des vaches y compris lorsqu'on utilise le modèle mixte *PVmlm1* avec le temps et l'effet vache en variable aléatoire.

4) L'efficacité des vaches, un paramètre individuel qui peut expliquer une partie des résidus des modèles

a) Un troupeau avec des efficacités très variables

Le RFI est ici utilisé comme référence pour estimer l'efficacité alimentaire. Le modèle du RFI présente une bonne prédiction de la somme des QI sur la période puisque le RMSE, qui est de 104,2 kg MS, est très inférieure à l'écart type de la somme des QI qui est de 315 kg MS. Le R² de la régression multiple est de 0,89, donc proche de 1. Les coefficients du modèle du RFI sont résumés dans le **Tableau 07**. On observe que la quantité de lait n'influence pas significativement les QI (Pvalue > 0,05). La prise en compte des matières grasses et protéiques suffiraient à représenter la production laitière, le volume de lait n'apporte apparemment rien de plus. Le coefficient de la matière grasse est inférieur à celui de la matière protéique. Une augmentation de la matière protéique d'1g induira une plus grande augmentation des QI qu'1g de matière grasse. Il est intéressant de noter que la différence entre le PVV final et le PVV minimal a un effet très positif sur l'ingestion : plus la vache perd et reconstitue ses réserves corporelles au cours de la lactation, plus les variations de QI associées seront élevées.

Au final, l'efficacité alimentaire au sein des 65 vaches est très variable (**ANNEXE V**) avec un écart-type de 105 UFL : la vache la plus efficace a économisé 224 UFL alors que la moins efficace a ingéré 242 UFL en plus par rapport à ce qui était attendu pour les 120 premiers jours de lactation.

Tableau 07 : Coefficients des variables explicatives du modèle du RFI

| Variables explicatives | Coefficients |
|--------------------------|-----------------------------|
| Constante | 127,5 (***) |
| Matière grasse (g) | $2,579 \cdot 10^{-3}$ (***) |
| Matière protéique (g) | $1,068 \cdot 10^{-2}$ (***) |
| Quantité de lait (kg) | $-1,292 \cdot 10^{-2}$ (.) |
| PVV (kg) | -1,003 (***) |
| PVVfinal-PVVmin (kg) | 1,918 (***) |
| PVVfinal-PVVinitial (kg) | -1,024 (***) |

code de significativité : 0 < '***' < 0,001 < '**' < 0,01 < '*' < 0,05 < '.' < 0,1 < ' ' < 1

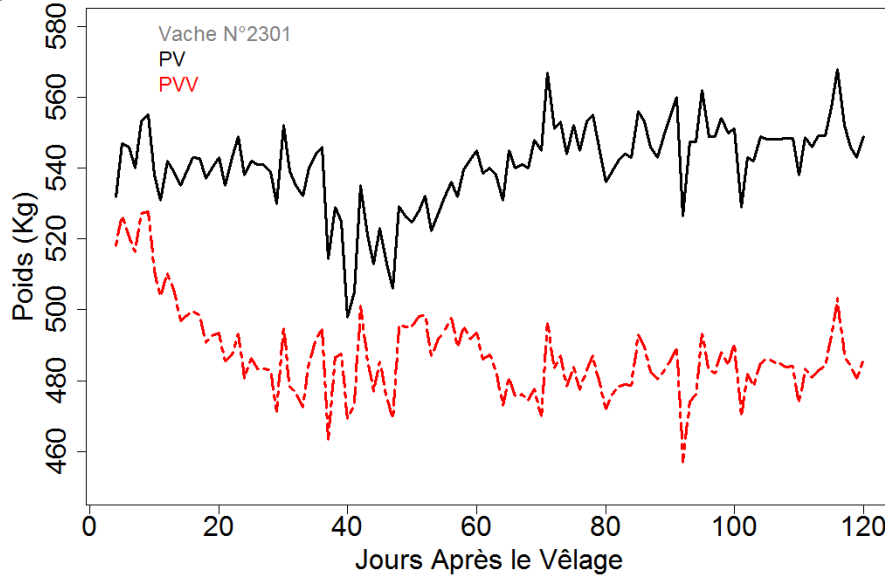


Figure 12 : PV (trait plein) et PVV (tiret) d'une vache de l'essai au cours de la lactation. Le PVV est égal au PV moins les contenus digestifs estimé à partir du modèle mixte du PV_{mlml}

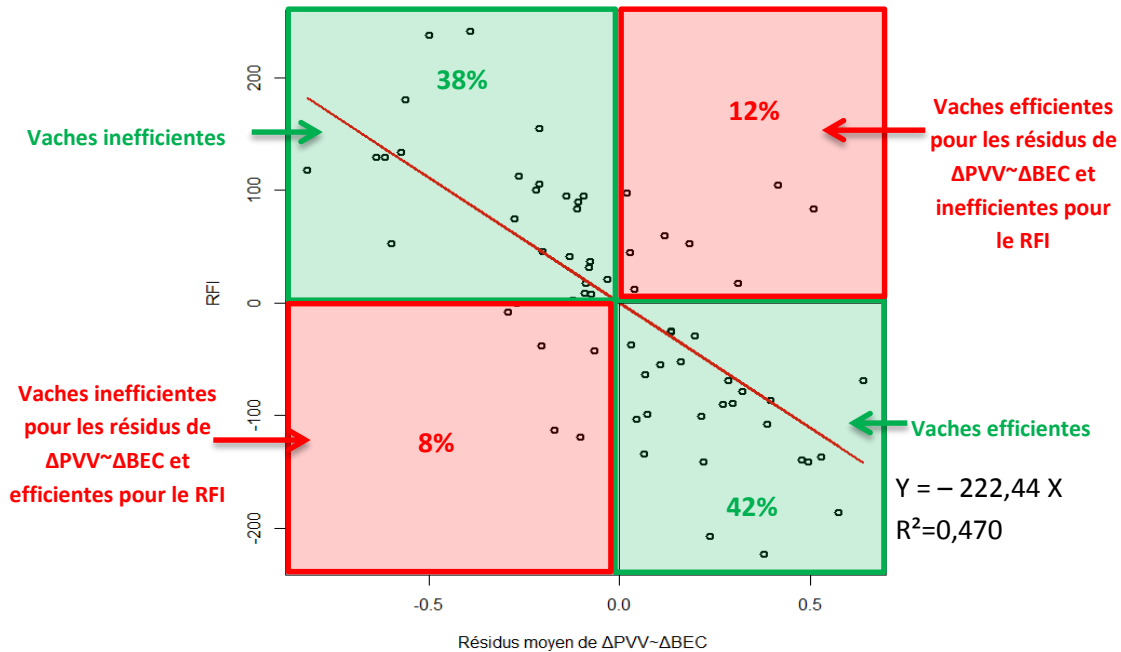


Figure 13 : RFI en fonction des résidus moyen de $\Delta PVV \sim \Delta BEC$ des 65 vaches. Les zones vertes représentent les zones de concordances entre les indicateurs d'efficacité : en rouge les zones de discordances.

b) Les erreurs du BE sont significativement corrélées à l'efficacité alimentaire des vaches laitières

La cinétique du PVV reflète la cinétique du niveau des réserves corporelles au cours du temps. Le PVV a été obtenu par différence entre le PV et la somme des 3 encombrements multipliés par leur coefficient respectif dans le modèle *PVmlm1*. La comparaison du PVV avec le PV met en évidence l'importance du poids des contenus digestifs dans la variation du PV. De plus, l'écart entre les deux est variable au cours du temps (exemple pour une vache de l'essai : **Figure 12**). Cet écart est d'autant plus variable entre le jour 10 et le jour 40 de lactation, lorsque les QI augmentent fortement (**Figure 12**)

La cinétique du PVV et du BEC au cours de la lactation devrait être la même étant donné que les 2 paramètres reflètent les réserves corporelles. Les résidus du modèle linéaire entre la variation de PVV et la variation de BEC témoignent de la force de cette correspondance. La moyenne des résidus de ce modèle et le RFI sont corrélés négativement, comme on l'attendait (**Figure 13**). L'écart entre les cinétiques du PVV et du BEC s'explique donc en partie par des différences d'efficacité alimentaire interindividuelles, non prises en compte dans le calcul du BEC. La **Figure 14** montre l'exemple d'une vache efficace : le PV et le PVV de la vache augmente alors que le BEC n'augmente pas ou du moins pas autant. Toutefois, la variabilité autour de la droite de régression entre le RFI et les résidus reste grande et témoigne que toute l'erreur du modèle *PVmlm1* n'est pas uniquement expliquée par des différences interindividuelles d'efficacité.

c) Les erreurs d'estimation des QI significativement reliées à des différences interindividuelles d'efficacité alimentaire

De la même manière que pour le PVV et le BEC, le RFI est comparé à la moyenne pour chaque vache des résidus du modèle $QI_{mesurées} - QI_{estimées}$. Ces deux indicateurs concordent à 63% (41 vaches sur 65) sur le statut efficient ou inefficient des vaches (**ANNEXE V**) et plus particulièrement pour les vaches les plus ou les moins efficaces (**Figure 15**). Comme prévu, la corrélation significative entre le RFI et les résidus moyens est positive : un RFI négatif et des résidus négatifs témoignent ici que la vache a ingéré moins que prévu, elle est efficace et inversement pour des indicateurs positifs. Toutefois cette corrélation reste faible ($R^2=0,14$) et met en évidence que la plupart de l'erreur du modèle qui estime les QI n'est pas expliquée par les différences interindividuelles d'efficacité alimentaire.

Discussion

1) Une conversion robuste et cohérente de l'encombrement des contenus digestifs en poids

Dans notre travail, les coefficients des variables QI des trois jours qui précèdent la pesée du matin sont significatifs et leur somme correspond environ à 3Kg de poids par Kg de MSI. Ces résultats sont répétables quel que soit le modèle utilisé (**Tableau 08**). D'après Mambrini (1990) et le modèle dynamique de digestion de Martin et Sauvant (2010), le temps de séjour des aliments dans les différentes parties de l'appareil digestif est supérieur à 1 jour.

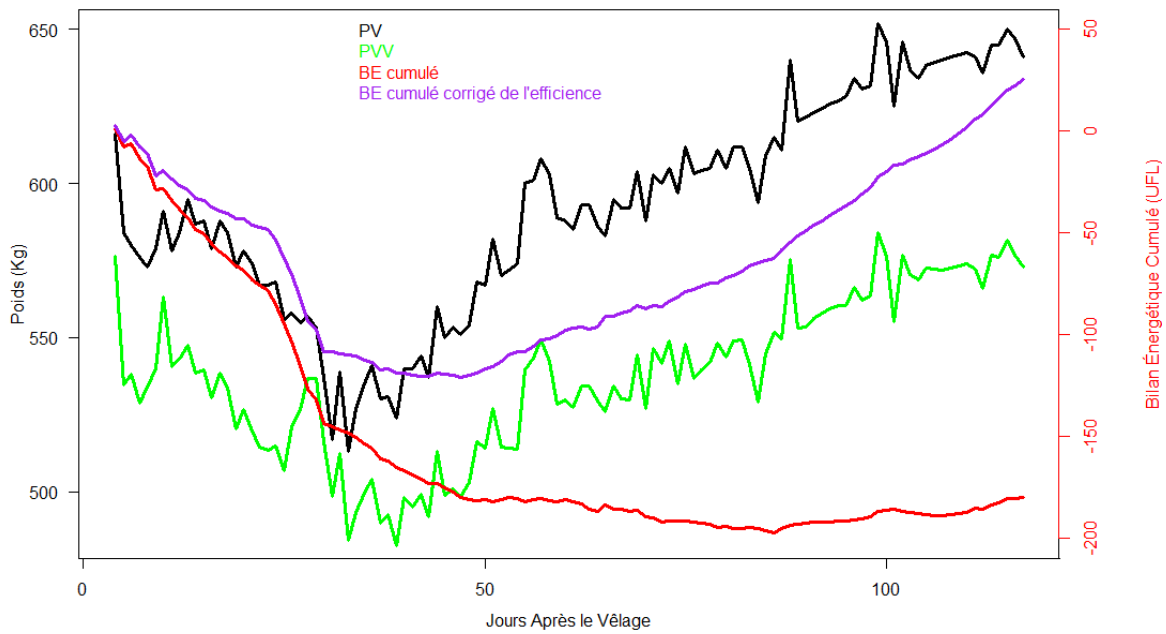


Figure 14 : Poids vif, poids vif vide, bilan énergétique cumulé et bilan énergétique cumulé corrigé de l'efficacité, pour une vache multipare de l'essai au cours des 120 premiers jours de sa lactation.

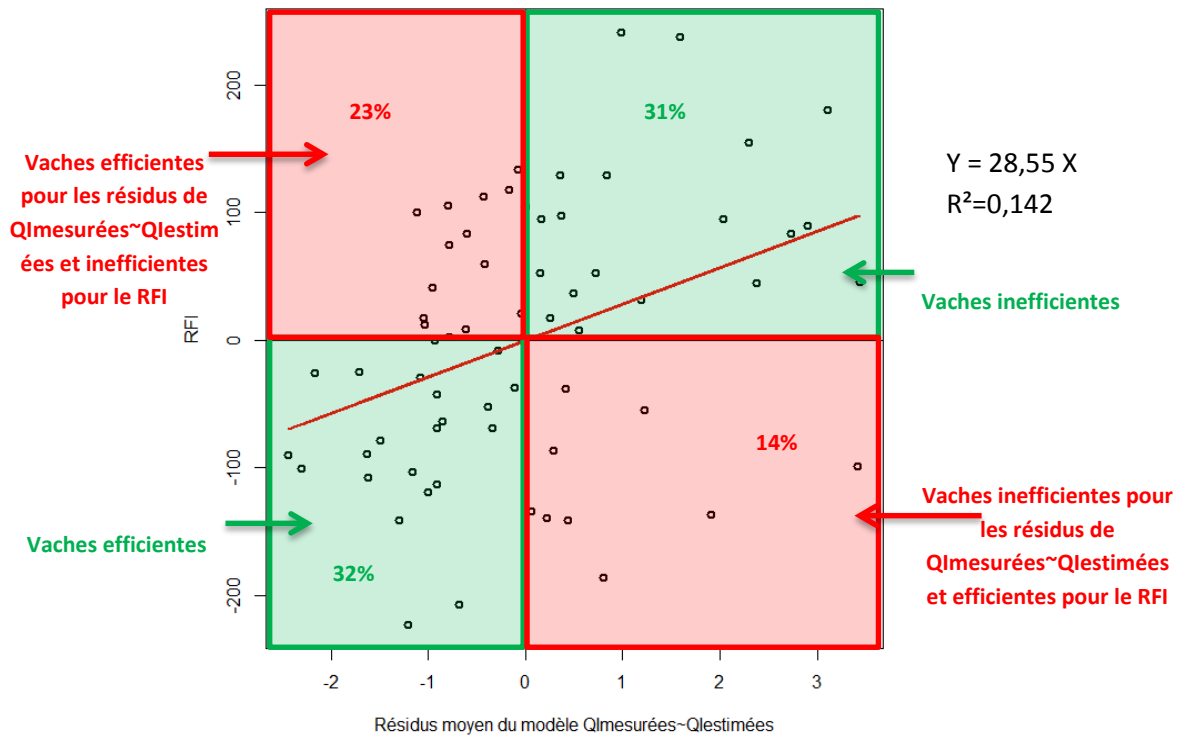


Figure 15 : RFI en fonction des résidus moyen de $Q_{Imesurées} - Q_{Iestimées}$ des 65 vaches. Les zones vertes représentent les zones de concordances entre les indicateurs d'efficacité. En rouge les zones de discordances.

Tableau 08 : Méthodes de prédiction du poids des contenus digestifs de bovins laitiers utilisées dans notre étude.

| Estimation du poids des contenus digestifs | Avec une vache moyenne de PV=600 kg et QI0=13 kgMS | Nom du modèle |
|--|---|---------------|
| $(902 + 693 + 386) \times \frac{MSI \text{ des } 3 \text{ jours précédents}}{PV0}$ | $3,30 \times MSI \text{ des } 3 \text{ jours précédents}$ | PVlm |
| $(731 + 614 + 462) \times \frac{MSI \text{ des } 3 \text{ jours précédents}}{PV0}$ | $3,01 \times MSI \text{ des } 3 \text{ jours précédents}$ | PVmlm |

Avec $\Delta MSI = MSI \text{ du jour} - MSI_{t=0}$; MSI = matière sèche ingérée en kg

Les QI à un instant t sont donc susceptibles d'affecter le PV de l'animal sur plusieurs jours après l'ingestion. Le poids des contenus digestifs à un temps t doit par conséquent intégrer les QI précédents et nos résultats semblent indiquer que 3 jours sont réellement importants. Dans la littérature, différents travaux ont déjà estimé le poids des contenus digestifs (Piton 1975 ; Rémond 1988 ; Martin et Sauvant 2003 ; Friggens *et al.* 2011 ; **Tableau 09**) et les coefficients obtenus dans notre étude ont tendance à être inférieurs à ces valeurs (**Tableau 08**). Les données obtenues par Piton (1975) ou Rémond (1988) à partir de données de vidage de contenus de rumen qui sont plutôt de l'ordre de 4 à 4,5 kg de PV par kg de MSI (**Tableau 09**). L'équation de Martin et Sauvant (2003) qui prend en compte le NDF ingéré conduit à des valeurs plus élevées de 5,3 kg par kg de MSI. Par contre, notre coefficient est identique au coefficient obtenu par Rémond (1988) pour estimer le poids du seul contenu du réticulo-rumen. La question de savoir comment varient les contenus digestifs totaux en fonction du contenu du réticulo-rumen peut faire partie des éléments d'incertitude. Beranger et Robelin (1978) ont estimé que le contenu du réticulo-rumen représentait environ 68 à 74% du contenu digestif total, mais cette relation inclue des variations inter-individus et inter-régime. L'augmentation des contenus de la caillette et des intestins en fonction de l'augmentation des contenus du réticulo-rumen semble déjà moins nette intra-régime dans leurs résultats. Une explication possible de notre sous-estimation serait donc que les variations de MSI reflètent davantage les variations du poids du contenu réticulo-rumen, les contenus des partis distales de l'intestin variant moins. Friggens *et al.* (2011) considèrent que les contenus digestifs sont composés d'une part permanente qui est supposée constante à court terme et d'une part variable dépendante des QI. Martin et Sauvant (2010) ont supposé que cette part constante pouvait s'approcher comme un pourcentage du PVV. En d'autres termes, la seule utilisation des QI pour estimer les contenus digestifs n'expliquerait que la part variable des contenus digestifs et non la part permanente des contenus digestifs.

Une autre hypothèse liée au transit pourrait expliquer des coefficients un peu plus faibles dans notre étude. En effet, la bibliographie montre clairement que le temps de séjour des aliments dans le tractus digestif diminue lorsque les QI augmentent (Sauvant et Nozière 2013). De ce fait l'encombrement marginal des aliments pourrait diminuer lorsque les niveaux d'ingestions augmentent. Ceci devrait se traduire par une relation quadratique entre le PV et les QI. C'est une question qui a été abordé par Martin et Sauvant (2003) mais sans être vraiment résolue. Dans le cas de notre étude, l'utilisation des QI^2 en plus des QI a été testée, mais les effets curvilinéaires n'ont pas été significatifs et le modèle quadratique n'a pas été retenu.

2) Une estimation des réserves corporelles par le poids vif encourageante mais encore fragile faute de référence fiable

a) Des coefficients de conversion entre poids vif vide et énergie encore peu robustes

Les modèles statistiques permettent de montrer des effets significatifs du BE sur le PV, mais les modèles basés sur le modèle linéaire généralisé $PVlm$ et ceux basés sur le modèle mixte avec un effet aléatoire du temps et de la vache $PVmlm$ conduisent à des estimations de la valeur énergétique des variations de PV très différentes.

Tableau 09 : Différentes méthodes de prédiction du poids des contenus digestifs de bovin laitiers issues de la littérature

| Estimation du poids des contenus digestifs | Référence |
|---|-------------------------------|
| $(1 - \frac{0,20}{1,25 - 0,026 \times NEC}) \times PV$ | (Friggens <i>et al.</i> 2011) |
| $\frac{34,6 + 8,13 \times NDFI - 0,65 \times t}{0,696}$ | (Martin et Sauvant 2003) |
| $(\frac{3}{0,75}) \times MSI = 4 \times MSI$ | (Rémond 1988) |
| $4,5 \times MSI$ | (Piton 1975) |

Avec PV=poids vif, NEC=note d'état corporel, NDFI = la teneur en NDF de la ration multipliée par les quantités de matière sèche ingérées. t = le temps écoulé depuis le dernier repas, MSI = la quantité de matière sèche ingérée par la vache.

De plus les résidus en début de lactation présentent un biais systématique. Le modèle linéaire généralisé *PVlm* conduit à un écart important entre les coefficients pour les BE négatifs et positifs (jusqu'à 4 fois plus importants pour le bilan positif ; **Tableau 07** ; **ANNEXE IV**) et contraires à ce que l'on pourrait s'attendre à savoir plus d'énergie libérée pour un kg de PV perdu qu'il n'en a fallu pour le constituer. A l'opposé, le modèle mixte *PVmlm1* donne des coefficients plus proches et plus conformes à la littérature avec un gain de PV apparemment plus coûteux en énergie qu'une perte de PV. Quand le BE est positif, le gain de PV associé est de 0,12 kg pour chaque UFL excédentaire ingérée alors qu'un BE négatif associe à chaque UFL déficitaire une perte de poids de 0,21 kg. Selon Chilliard *et al.* (1987), ces coefficients sont respectivement de 0,22 kg par UFL excédentaire ingérée et de 0,28 kg par UFL déficitaire produite. Pour une même énergie excédentaire apportée ou déficitaire produite, on retrouve bien la notion d'une plus grande perte de poids dans un contexte de BEC négatif que de gain de poids lorsque ce dernier est positif. Cette différence entre un BEC négatif et positif s'explique par la perte d'énergie liée à un rendement de stockage ou d'utilisation de l'énergie inférieur à 1. On peut s'attendre à ce que l'énergie valorisée par la perte d'un kg de PV soit plus faible que le coût énergétique nécessaire à la constitution de ce kg de poids. Ces éléments semblent donner un peu plus de poids aux coefficients du modèle mixte *PVmlm1*.

Les coefficients associés au BEC négatif et positif seraient variables en fonction de l'âge de la vache et de son stade de lactation. L'aspect de la croissance de l'animal impose aussi des limites à notre modèle. Il n'a pas été pris en compte dans le modèle car il est difficile à implémenter dans celui-ci. Néanmoins, les primipares et quelques multipares n'ont pas fini leur croissance et déposent plus masse maigre que les vaches adultes (Agabriel *et al.* 2010). Or le rendement énergétique d'une protéine et d'un lipide est différent : 9,37 kcal/g de lipides et 5,48 kcal/g de protéines. S'ajoute à cela les possibles substitutions des lipides en protéines et eau, et inversement (Moe *et al.* 1971). Pour une même quantité d'énergie nette ingérée, une vache en croissance déposera donc plus de masse maigre (protéine et eau) que de masse grasse, donc aura un gain de PV plus grand que les vaches adultes. Avec un dépôt plus important de protéines pour les vaches en croissance, on peut avoir une vache qui gagne du PV tout en ayant un BE négatif. On retrouve cela dans les coefficients des modèles, les interactions positives entre la parité et les BEC positif et négatif pour les primipares soutiennent ce postulat (**ANNEXE IV**). Pour un même apport énergétique, les primipares ont un gain de poids plus important de 0,05 kg/UFL et une perte de poids plus importante de 0,02 kg/UFL (**ANNEXE IV**). La prise en compte de la croissance dans le modèle du PV est essentielle. N'ayant pas les données nécessaires pour caractériser les variations de PV associées à la croissance, les besoins de croissance n'ont pas été inclus dans le calcul du BE. Le BE représente alors la mobilisation et la reconstitution des réserves corporelles maigres et grasses ainsi que l'énergie utilisée pour la croissance. Dans un futur proche, des phénotypes caractérisant la croissance de la vache telle que les mensurations de la vache obtenues par imagerie 3D pourraient être intégrés au modèle pour estimer la part du PV liées à la croissance.

b) Le bilan énergétique reste une référence limitée pour estimer les variations individuelles des réserves corporelles en raison des variations d'efficacité alimentaire

Au niveau individuel, l'estimation des réserves corporelles à partir du PVV pourrait à terme être plus fiable que l'utilisation du bilan énergétique alimentaire cumulé. En effet, les cinétiques du PVV et du BEC ne correspondent pas toujours (**Figure 14**). Cette difficulté avait déjà été mentionnée par Friggens *et al.* (2011) en remettant en cause la précision du bilan alimentaire. Nos résultats montrent clairement qu'il est possible d'expliquer une partie des erreurs du modèle du poids par les variations interindividuelles d'efficacité alimentaire estimée par une approche indépendante. Un coefficient d'efficacité peut être calculé à partir du RFI, ici considéré comme l'indicateur de référence pour mesurer l'efficacité alimentaire des vaches laitières. Ce coefficient a été calculé comme le rapport entre les MSI prédites par le modèle RFI et les MSI observées : un coefficient supérieur à 1 indique que la vache a ingéré moins d'énergie que prévue par le modèle RFI, elle est plus efficace que prévu ; inversement un coefficient inférieur à 1 est relatif à une vache moins efficace. Le calcul du BE peut en effet être biaisé si les apports ou les besoins sont mal estimés à cause des différences d'efficacité alimentaire. Par conséquent, une vache plus efficace est associée à un gain de poids prédit par le PVV supérieur à celui prédit par le BEC et inversement pour les vaches moins efficaces. Le BEC calculé sous-estime les BE réels pour les vaches les plus efficaces et les surestime pour les vaches les moins efficaces. Une correction simple peut consister à multiplier les apports énergétiques par ce coefficient pour tenir compte des variations d'efficacité alimentaires pour ré-estimer le modèle du poids (10). Ce coefficient a été calculé comme étant :

$$(10) = BEC \text{ corrigé} \\ = (\text{coefficient d'efficacité} \times \text{apports énergétiques}) - \text{besoins énergétiques} \\ \text{Avec Coefficient d'efficacité} = \frac{MSI \text{ prédite par le modèle RFI}}{MSI \text{ observées}}$$

La cinétique du PVV semble bien plus cohérente avec le BEC corrigé pour certaines vaches (**Figure 14**). Toutefois cette amélioration n'est pas homogène pour toutes les vaches, dans certains cas, la correction accentue la différence entre le BEC et le PVV. La correction n'est pas suffisante mais reste une piste intéressante à étudier pour les travaux futurs cherchant à utiliser le BE pour estimer des variations individuelles de réserves corporelles.

3) Le début de lactation : une période plus difficile à caractériser pour la prédiction du poids vif et des quantités ingérées

Les résidus des modèles ne prenant pas en compte le stade de lactation sont plus importants en début de lactation (**Figure 09**). L'effet aléatoire lié au temps est en partie corrigé en passant au modèle mixte *PVmlm* qui inclut le temps comme effet aléatoire. Le biais de début de lactation est toujours présent dans les résidus du modèle mixte *PVmlm* : la distribution des résidus du modèle *PVmlm1* est en forme de cônes en début et fin de lactation (**Figure 09**). Ce biais de début de lactation est encore plus marqué avec les résidus issus de la prédiction des QI : les QI sont en moyennes sous-estimées sur les 40 premiers jours de lactations (**Figure 11**).

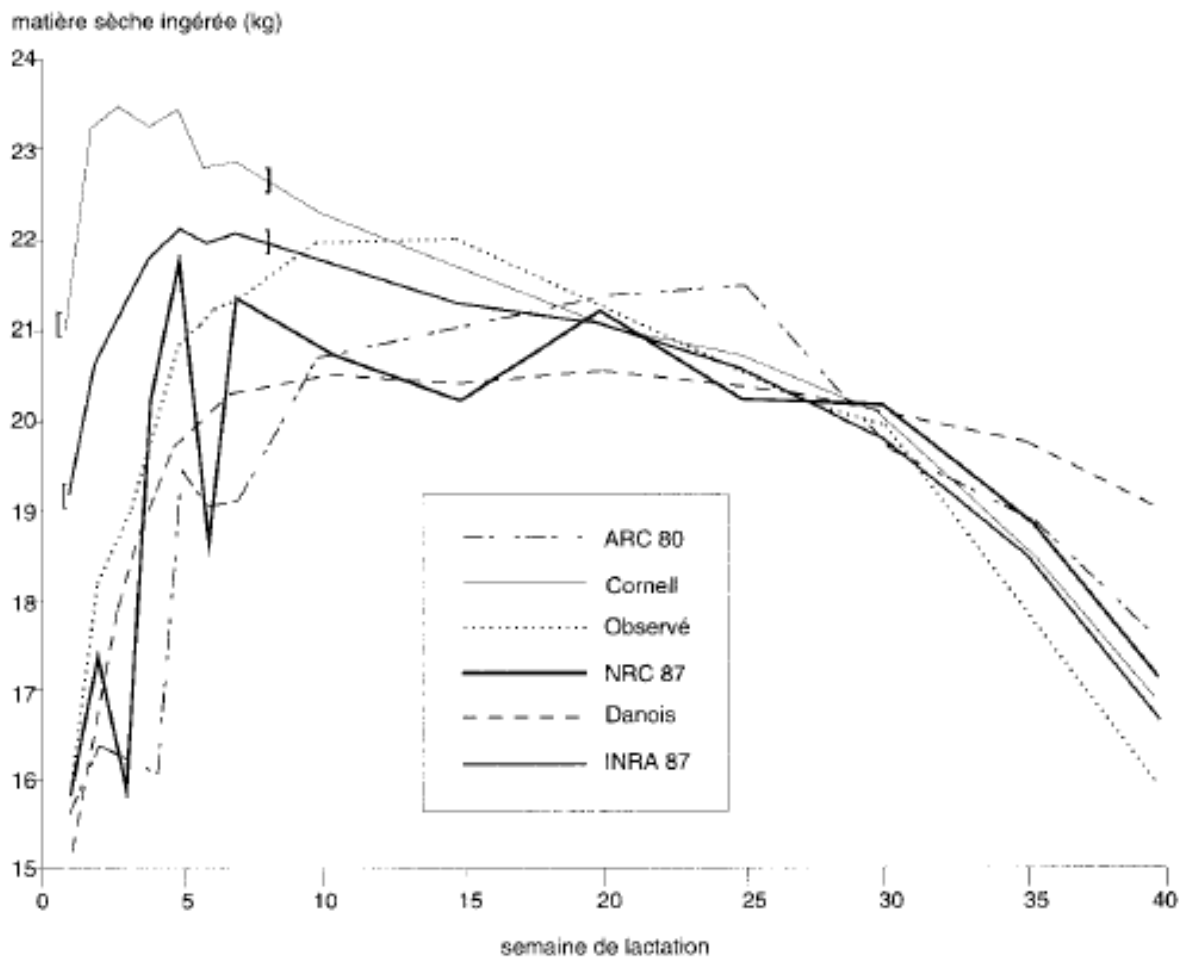


Figure 16 : Prédiction des quantités ingérées selon différents modèles et des quantités ingérées mesurées en fonction du stade de lactation pour une ration à 70% ensilage de maïs et 30% de concentrés (Faverdin *et al.* 2006)

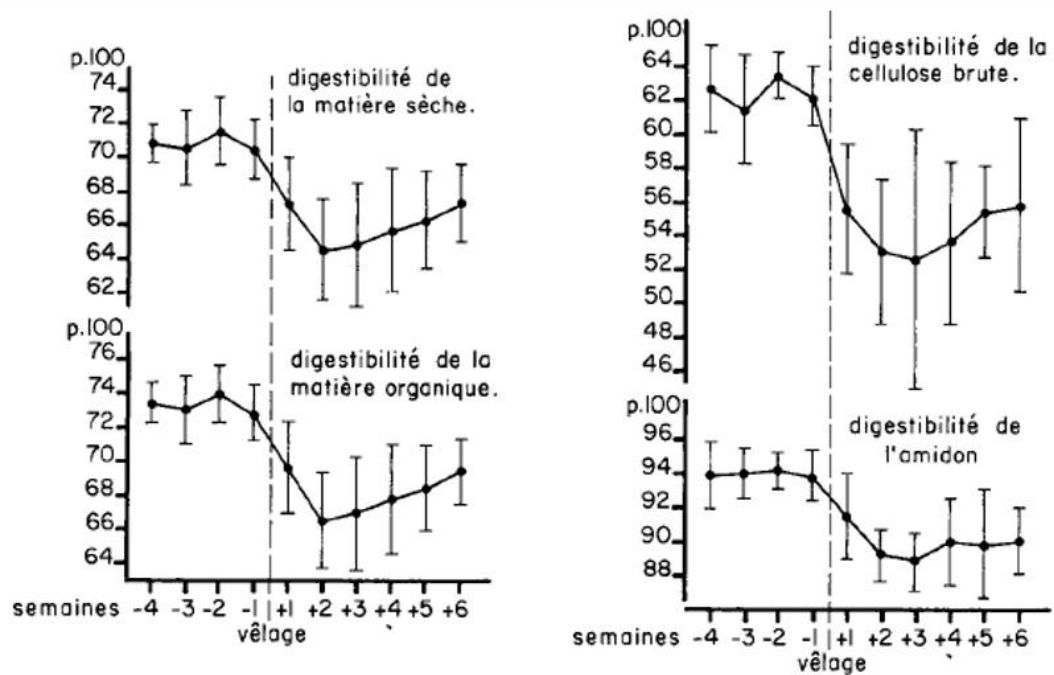


Figure 17 : Digestibilité de différents constituants de ration alimentaire chez des vaches laitières (Doreau et Rémond 1982)

Faverdin *et al.* (2006) a soulevé ce même problème en comparant différents modèles de prédiction des QI (**Figure 16**). Ce défaut d'ajustement laisse présager une inaptitude du modèle à prendre en compte certains phénomènes importants en début de lactation. Dans notre cas, les résidus du modèle de prévision des QI sont en moyenne positifs en début de lactation : le modèle sous-estime les QI. En fait, l'évolution des QI est beaucoup plus importante en début de lactation que pour le reste de la lactation. Une première hypothèse soulevée ici est que l'effet linéaire de l'encombrement n'est pas adapté pour modéliser le début de lactation pour lequel un modèle quadratique serait plus adapté (Moe *et al.* 1971; Doreau et Rémond 1982 ; Faverdin *et al.* 2006). C'est une hypothèse déjà mentionnée précédemment qui reste à tester et comparer avec le modèle actuel. Ceci compliquerait pas mal le modèle étant donné que pour chaque encombrement, il y aurait l'effet linéaire et l'effet quadratique. Une seconde hypothèse, fondée sur les résultats de Doreau et Rémond (1982) et Doreau *et al.* (1988), est que la digestibilité des aliments est plus faible en début de lactation que pour le reste de la lactation (**Figure 17**). D'après Doreau et Rémond (1982) et Doreau *et al.* (1988), la digestibilité diminue jusqu'à 4 à 6 semaines après le vêlage, là où la moyenne de nos résidus du modèles des QI sont au maximum. La digestibilité redevient la même qu'avant le vêlage après la semaine 6 après le vêlage, soit une quarantaine de jours, moment où la moyenne de nos résidus du modèles des QI redescendent autour de 0 (**Figure 11**). Les apports énergétiques réels seraient donc surestimés dans le calcul du BE en début de lactation. Dans l'équation (5), les UFL_{ration} qui sont au dénominateur seraient surestimées, par conséquent les QI prédit sont sous-estimés. Tout comme pour la correction des différences d'efficacité alimentaire pour le BEC, une méthode à tester serait de calculer un coefficient de digestibilité et de corriger les apports énergétiques de début de lactation dans le calcul du BE, bien que cela ne soit pas pris en compte actuellement par les systèmes d'alimentation français ou étrangers.

4) Vers une gestion et une alimentation du troupeau pilotées par le poids vif ?

Le PV, à travers le PVV, est un indicateur des réserves corporelles dont l'état et la variation renseignent sur l'état de santé et le bien-être des vaches (Maltz 1997). L'accès au PVV est donc un critère intéressant pour améliorer la gestion des vaches au sein d'un troupeau. Des modèles existe déjà (exemple des robots Lely® ; [1]) mais ne se base que sur les variations de PV et non de PVV, ce qui peut notamment sous-estimer certaines phases de mobilisations. Les variations à court terme du PV étant davantage assimilées à des variations de QI, le modèle n'est pas assez précis pour détecter rapidement des problèmes de santé, alors qu'une forte variation de PVV à court termes, reflétant une forte variation des réserves corporelles, peut être assimilée à des troubles de santé ou à un défaut d'alimentation.

Comme les variations de PVV sont associées à des variations des réserves corporelles, les variations de PVV renseignent rapidement sur le statut énergétique de la vache : une augmentation du PVV est assimilée à une phase de reconstitution des réserves corporelles, donc d'excès énergétique apporté par l'alimentation et inversement pour une diminution. Le pilotage de précision de l'alimentation des vaches directement suivant le BE montre des gains possibles de production (Maltz *et al.* 2013).

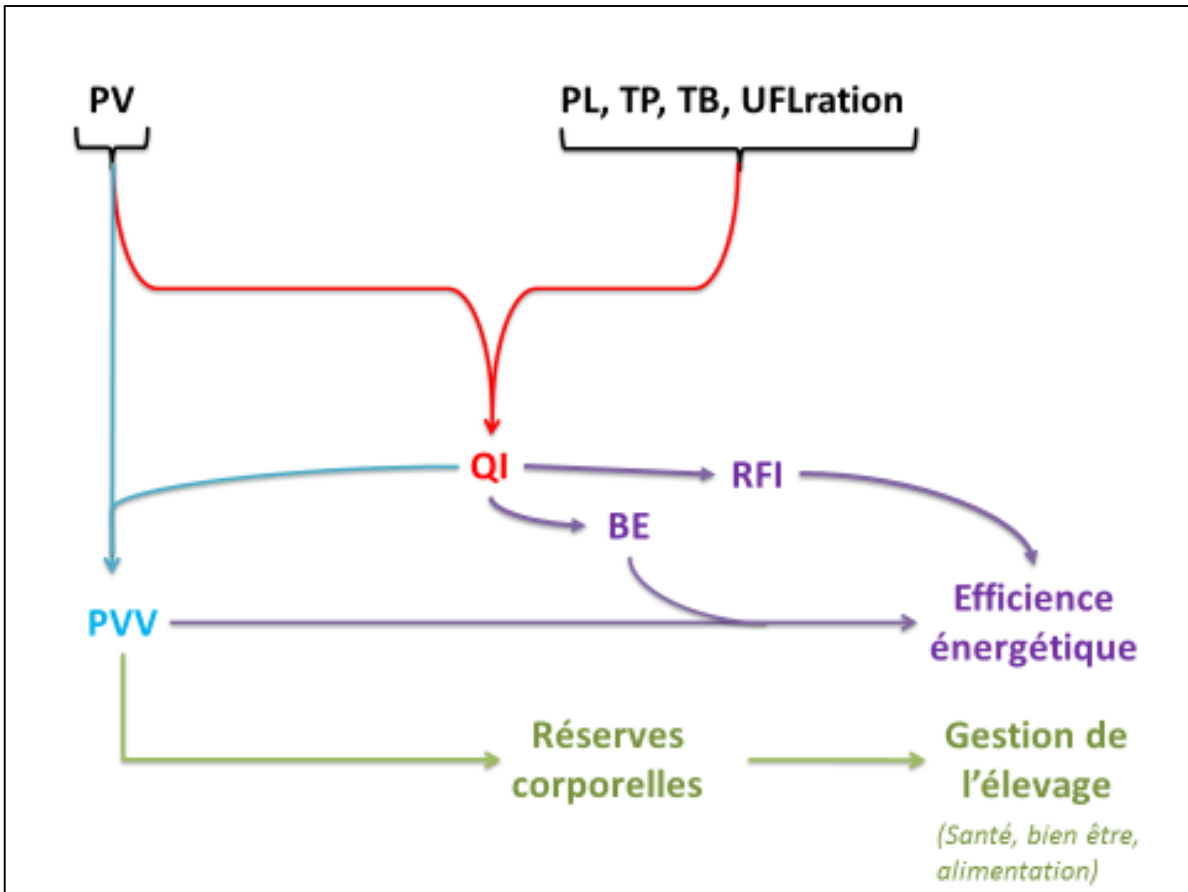


Figure 18 : bilan des valorisations possibles du monitoring du PV associé au monitoring de la production laitière.
PV=pois vif, PL=production laitière, TP=taux protéique, TB=taux butyreux, QI=quantités ingérées, PVV=pois vif vide, BE=bilan énergétique, RFI=residual feed intake.

On peut ainsi optimiser l'allocation des ressources par les vaches laitières en prenant en compte les variations individuelles ainsi que leur capacité d'ingestion et pourquoi pas leur efficacité alimentaire. Un monitoring combiné de la production laitière et des variations de PVV couplé à des systèmes automatiques de distribution d'aliments permettraient une gestion automatisée et optimisée du troupeau et de l'économie de l'exploitation. André *et al.* (2010) ont montré une amélioration de la gestion du troupeau et des gains économiques lorsque l'on adapte individuellement les apports de concentrés selon les variations de production laitière. Quel que soit l'issue de l'utilisation du PV en exploitation agricole, il reste toutefois à définir les règles de pilotage d'un tel système : définir les différents seuils d'alerte, définir les conseils adaptés aux différentes alertes ou variation de PVV et de la production laitière. La principale limite actuelle de l'utilisation du modèle, tel qu'il a été développé, en élevage commercial reste l'accessibilité aux QI. Dans cette optique d'utilisation en élevage commercial, des modèles de PVV ont été estimés sans les QI, à partir d'un pourcentage du PV (Beranger et Robelin 1978 ; Friggens *et al.* 2011). Ces méthodes moins précises ont le mérite d'être facilement transposable dans des fermes non expérimentales. Toutefois, la prédiction des QI à partir du PV et de la production laitière effectuée dans cette étude semble être une piste prometteuse et pourrait être étudiée comme piste pour améliorer à terme les prévisions de variations des réserves en utilisant le PV.

Conclusion

Les objectifs de cette étude étaient de trouver une meilleure estimation des réserves corporelles à partir des variations de PV et d'explorer quelques pistes d'applications en élevage. L'élaboration d'un modèle de PV à partir de ses différentes composantes (contenus digestifs, masse maigre et grasse), pour obtenir un PVV présente des résultats encourageants. L'originalité du modèle repose sur l'estimation des contenus digestifs qui a été réalisée à partir des QI des 3 jours qui précèdent la mesure du PV. L'estimation des QI à partir des variations à court termes du PV et de la production laitière journalière est une piste prometteuse pour accéder aux QI en élevage commercial. Bien qu'encore améliorable, ce modèle des QI non déterministe présente une bonne qualité de prédiction. Dans un contexte de monitoring, l'obtention des QI pourra se faire facilement dans des fermes commerciales équipées d'une stalle de pesée automatique et de compteur à lait, tel qu'un robot de traite.

Les modèles ont été développés pour une utilisation à l'échelle de la vache mais sont confrontés à 2 limites principales : une qualité prédictive moins bonne en début de lactation et d'une efficacité alimentaire propre à chaque vache qui est considérée comme identique pour toutes les vaches dans le calcul du BE. Les prochaines étapes d'amélioration du modèle se focaliseront d'une part sur l'amélioration de la qualité du modèle en début de lactation, notamment en intégrant un effet de baisse de digestibilité sur les premières semaines de lactation ; et d'autre part sur l'intégration des différences d'efficacité alimentaire.

Ce travail propose de nouvelles pistes pour mieux apprécier les variations des réserves corporelles en utilisant les données quotidiennes de PV (**Figure 18**). Les résultats encourageants obtenus dans le cadre de ce travail offrent des perspectives intéressantes pour optimiser la gestion des troupeaux à partir du monitoring du PV et de la production laitière.

Références bibliographique et sitographique

[1] : <http://www.lely.com/en/farming-tips/weight-attentions-in-t4c-a-helpful-tool-in-detecting-lameness>

[2] : <http://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR>

[3] : <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>

- Agabriel J., Aufrère J., Baumont R., Bocquier F., Bonnefoy J.C., Champciaux P., Delagarde R., *et al.* 2010. "Alimentation des bovins, ovins et caprins : les Tables Inra 2010." éditions Quæ, Versailles, 312 p.
- Allain C., Chanvallon A., Clément P., Guatteo R., Bareille N. 2014. "Élevage de Précision : Périmètre, Applications et Perspectives En Élevage Bovin." *21ème Journées 3R*.
- André G., Berentsen P.B.M., Van Duinkerken G., Engel B., Oude Lansink A.G.J.M. 2010. "Economic Potential of Individual Variation in Milk Yield Response to Concentrate Intake of Dairy Cows," no. 148: 263–76.
- Banos G., Coffey M. P., Brotherstone S. 2005. "Modeling Daily Energy Balance of Dairy Cows in the First Three Lactations." *Journal of Dairy Science* 88 (6): 2226–37.
- Beranger C., Robelin J. 1978. "Estimation Du Poids Du Contenu Digestif Des Bovins À Partir Du Poids Du Contenu Du Rumen." In *Annales de Zootechnie*, 27:639–45. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00887827/document>.
- Berry D. P., Crowley J. J. 2013. "CELL BIOLOGY SYMPOSIUM: Genetics of Feed Efficiency in Dairy and Beef Cattle." *Journal of Animal Science* 91 (4): 1594–1613. doi:10.2527/jas.2012-5862.
- Chilliard Y., Remond B., Agabriel J., Robelin J., Verité R. 1987. *Bulletin Technique Centre de Recherches Zootechniques et Veterinaires de Theix*. Vol. 70.
- Chilliard Y., Remond B., Sauvant D., Vermorel M. 1983. *Particularités Du Métabolisme Énergétique*. Vol. 53. Bulletin Technique CRVZ Theix INRA.
- Chilliard Y., Ollier A. 1994. "Alimentation Lipidique et Métabolisme Du Tissu Adipeux Chez Les Ruminants. Comparaison Avec Le Porc et Les Rongeurs." *INRA Productions Animales* 7 (4): 293–308.
- Coffey M. P., Emmans G. C., Brotherstone S. 2001. "Genetic Evaluation of Dairy Bulls for Energy Balance Traits Using Random Regression." *ANIMAL SCIENCE-GLASGOW*- 73 (1): 29–40.
- Collard B. L., Boettcher P. J., Dekkers J. C. M., Petitclerc D., Schaeffer L. R. 2000. "Relationships Between Energy Balance and Health Traits of Dairy Cattle in Early Lactation." *Journal of Dairy Science* 83 (11): 2683–90. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)75162-9.
- Doreau M., Adingra K., Rémond B., Chilliard Y. 1988. "Effets Respectifs Des Quantités Ingérées et Du Stade Physiologique Sur La Digestibilité D'une Même Ration Chez La Vache Laitière" 28 Suppl. N°1: 63–64.
- Doreau M., Rémond B. 1982. "Comportement Alimentaire et Utilisation Digestive D'une Ration de Composition Constante Chez La Vache Laitière En Fin de Gestation et Début de Lactation" 22 (2): 307–24.
- Faverdin P., Delagarde R., Delaby L. 2006. "Prévision de L'ingestion Des Vaches Laitières Au Cours de La Lactation." *Actes Des 13e Journées Autour Des Recherches Sur Les Ruminants, Rencontres Recherches Ruminants*, 6–7.
- Faverdin P. 1992. "Alimentation Des Vaches Laitières: Comparaison Des Différentes Méthodes de Prédiction Des Quantités Ingérées." *INRA Productions Animales* 5 (4): 271–82.
- Friggens N. C., Berg P., Theilgaard P., Korsgaard I. R., Ingvarsten K. L., Løvendahl P., Jensen J. 2007a. "Breed and Parity Effects on Energy Balance Profiles Through Lactation: Evidence of Genetically Driven Body Energy Change." *Journal of Dairy Science* 90 (11): 5291–5305. doi:10.3168/jds.2007-0173.
- Friggens N. C., Ridder C., Løvendahl P. 2007b. "On the Use of Milk Composition Measures to Predict the Energy Balance of Dairy Cows." *Journal of Dairy Science* 90 (12): 5453–67.

- Friggens N.C., Thorup V.M., Edwards D. 2011. "Estimation À La Ferme Du Bilan Énergétique Des Vaches Laitières À L'aide Des Mesures Fréquentes de Poids Vif et de Note D'état Corporel." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*, 39–42.
- Maltz E. 1997. "The Body Weight of the Dairy Cow : III. Use for on-Line Management of Individual Cows," no. 48: 187–200.
- Maltz E., Barbosa L.F., Bueno P., Scagion L., Kaniyamattam K., Greco L.F., De Vries A., Santos J.E.P. 2013. "Effect of Feeding according to Energy Balance on Performance, Nutrient Axcretion, and Feeding Behavior of Early Lactation Dairy Cows," no. 96: 5249–66.
- Mambrini M. 1990. "Etude Du Temps de Sejour Des Residus Alimentaires Dans Le Tube Digestif Des Vaches Laitieres : Aspects Methodologiques et Facteurs de Variation". *Thèse de doctorat, spécialité biologie. Rennes 1*.
- Martin O., Sauvant D. 2003. "Modélisation Des Contenus Du Tractus Digestif Bovin."
- Martin O., Sauvant D. 2010. "A Teleonomic Model Describing Performance (body, Milk and Intake) during Growth and over Repeated Reproductive Cycles throughout the Lifespan of Dairy Cattle. 1. Trajectories of Life Function Priorities and Genetic Scaling." *Animal* 4 (12): 2030–47.
- Moe P. W., Tyrrell H. F., Flatt W. P. 1971. "Energetics of Body Tissue Mobilization." *Journal of Dairy Science* 54 (4): 548–53. doi:10.3168/jds.S0022-0302(71)85886-1.
- Piton J. 1975. "Interêt et importance de la mobilisation des réserves corporelles des vaches laitières au début de la lactation. analyse de quèques facteurs de variation." *Thèse. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier*.
- Pryce J. E., Coffey M. P., Simm G. 2001. "The Relationship Between Body Condition Score and Reproductive Performance." *Journal of Dairy Science* 84 (6): 1508–15. doi:10.3168/jds.S0022-0302(01)70184-1.
- Rémond B. 1988. "Evolution Du Poids Du Contenu Du Réticulo-Rumen Chez Les Vaches Laitières Au Cours Des Deux Premiers Mois de La Lactation.," *Reprod. Nutr. Dévelop. édition, sec. 28* (1).
- Roche J.R., Friggens N.C., Kay J.K., Fisher M.W., Stafford K.J., Berry D.P. 2009. "Invited Review: Body Condition Score and Its Association with Dairy Cow Productivity, Health, and Welfare." *Journal of Dairy Science* 92 (12): 5769–5801.
- Sauvant D., Nozière P. 2013. "Rénovation Des Unités Alimentaires Des Ruminants: Les Principales Relations Utilisées Pour Le Calcul Des Apports Alimentaires." *Rencontres Autour Des Recherches Sur Les Ruminants*, 33–40.
- Spurlock D. M., Dekkers J. C. M., Fernando R., Koltès D. A., Wolc A. 2012. "Genetic Parameters for Energy Balance, Feed Efficiency, and Related Traits in Holstein Cattle." *Journal of Dairy Science* 95 (9): 5393–5402.
- Thorup V. M., Edwards D., Friggens N. C. 2012. "On-Farm Estimation of Energy Balance in Dairy Cows Using Only Frequent Body Weight Measurements and Body Condition Score." *Journal of Dairy Science* 95 (4): 1784–93. doi:10.3168/jds.2011-4631.
- Veerkamp R. F., Oldenbroek J. K., Van Der Gaast H. J., Van Der Werf J. H. J. 2000. "Genetic Correlation Between Days Until Start of Luteal Activity and Milk Yield, Energy Balance, and Live Weights." *Journal of Dairy Science* 83 (3): 577–83. doi:10.3168/jds.S0022-0302(00)74917-4.

Annexes

ANNEXE I : Valeurs alimentaires plus détaillées des aliments de la ration

| | Ensilage de maïs | Concentré énergétique | Tourteau de soja | Luzerne déshydratée | Urée | CMV |
|---------------|---------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|---------------|--------------|
| MS | 35,0 % | 89,4 % | 88,9 % | 92,4 % | 100 % | 100 % |
| UFL | 0,91 (UFL/kgMS) | 1,07 (UFL/kgMS) | 1,17 (UFL/kgMS) | 0,62 (UFL/kgMS) | 0 (UFL/kgMS) | 0 (UFL/kgMS) |
| PDIE | 66 (g/kgMS) | 106 (g/kgMS) | 265 (g/kgMS) | 100 (g/kgMS) | 0 (g/kgMS) | 0 (g/kgMS) |
| PDIN | 37 (g/kgMS) | 81 (g/kgMS) | 372 (g/kgMS) | 125 (g/kgMS) | 1472 (g/kgMS) | 0 (g/kgMS) |
| Ca | 1,7 (g/kgMS) | 3,4 (g/kgMS) | 3,9 (g/kgMS) | 29,2 (g/kgMS) | 0 (g/kgMS) | 240 (g/kgMS) |
| P | 1,4 (g/kgMS) | 3,9 (g/kgMS) | 6,7 (g/kgMS) | 2,6 (g/kgMS) | 0 (g/kgMS) | 60 (g/kgMS) |
| PDIE/UFL | 72,5 (g/UFL) | 99,1 (g/UFL) | 226,5 (g/UFL) | 161,3 (g/UFL) | / | / |
| PDIN/UFL | 40,7 (g/UFL) | 75,7 (g/UFL) | 317,9 (g/UFL) | 201,6 (g/UFL) | / | / |
| MO | 966 (g/kgMS) | 945 (g/kgMS) | 932 (g/kgMS) | 858 (g/kgMS) | / | / |
| dMO | 71,5 % | 82,9 % | 89,9 % | 57,0 % | / | / |
| Énergie brute | 4638,7 (kcal/Kg MO) | 4646 (kcal/kg MO) | 5027 (kcal/kg MO) | 5063 (kcal/kg MO) | / | / |

ANNEXE II : Protocole de détermination de la matière sèche des aliments de la ration

| | | |
|--|-----------------|---|
| INRA - Saint-Gilles Unité Mixte de Recherches Production du Lait | MODE OPERATOIRE | Code MO-PL-IE-ALI-01 Version : 1 Date : 24 février 2004 |
| | | Page : 1 <i>le 15/02/2011</i> |

Détermination de la matière sèche : FOURRAGES et ALIMENTS CONCENTRES

I. Objet et domaine d'application

La méthode permet de déterminer la teneur en produit secs de composés tels que les aliments grossiers ou les concentrés.

II. Principe

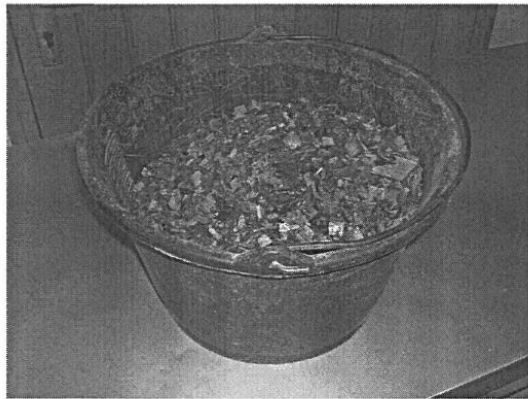
L'échantillon est soumis à dessiccation à une température de 80° pendant 48 heures.

III. Prévention

Port de gants pour se protéger de la chaleur
Problèmes possibles: Contacter un technicien du secteur Physio

IV. Appareillages

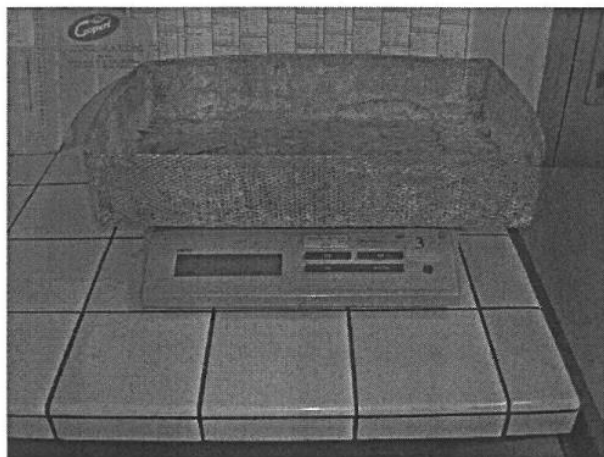
Seau pour collecter un échantillon représentatif du silo



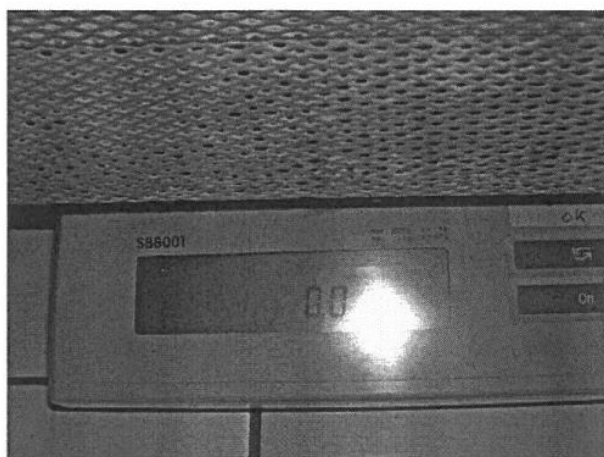
Panier à mailles perforées (60\30) ou barquette aluminium PF 1000
Une étuve réglée à 80 °C

| | | |
|---|------------------------|--|
| INRA - Saint-Gilles Unité Mixte de Recherches Production du Lait | MODE OPERATOIRE | Code MO-PL-IE-ALI-01 Version : 1 Date : 24 février 2004 |
| | | Page : 3 |

Peser le panier ou la barquette vide (Tare)



Noter le poids sur le bordereau
 Faire la tare (0) avec le panier sur la balance



Ajouter la quantité d'aliment Frais (ex : Ensilage de Mais 1kg ,Herbe Fraîche 700g ,Foin 500g
 Concentré 200 g)



| | | |
|--|-----------------|---|
| INRA - Saint-Gilles Unité Mixte de Recherches Production du Lait | MODE OPERATOIRE | Code MO-PL-IE-ALI-01 Version : 1 Date : 24 février 2004 |
| | | Page : 5 |

Les échantillons secs sont jetés ou conservés en fonction des protocoles dans un sac de plastique fermé et au sec. *en attendant d'être analysés*

VII. CALCULS ET EXPRESSION des RESULTATS :

Les données sont enregistrées dans un fichier EXCEL contenant toutes les matières sèches des aliments de l'année. *ce fichier est accessible sur le réseau informatique de Méjusseauve sous le répertoire MS.*

| | | |
|----------------------|-----------------------------------|----------|
| <i>Aliment</i> | <i>Ensilage de maïs n° 11604</i> | |
| <i>date</i> | <i>04/11/2004</i> | |
| <i>tare</i> | <i>2120g</i> | <i>a</i> |
| <i>frais</i> | <i>750g</i> | <i>c</i> |
| <i>sec + tare</i> | <i>2400g</i> | <i>b</i> |
| <i>matière sèche</i> | <i>$((b-a)/c)*100$</i> | |
| <i>% ms</i> | <i>37,33</i> | |

ANNEXE III : Démonstration des équations de prédiction des quantités ingérées à partir du modèle du poids vif

$$PV_t = K + \alpha BEC_{t-1} + \delta QI_{t-1} + \gamma PV_0$$

$$\text{Avec } BEC_{t-1} = \sum_{j=1}^{t-1} (UFL_{\text{corrigé}_j} - Besoins_j) = \sum_{j=1}^{t-1} (0,86 \times UFL_j + 1,35 - Besoins_j) = \sum_{j=1}^{t-1} (0,86 \times QI_j \times UFL_{\text{ration}_j} + 1,35 - Besoins_j)$$

$$\text{Soit : } PV_t = K + \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-1} (0,86 \times QI_j \times UFL_{\text{ration}_j} + 1,35) \right] - \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-1} (Besoins_j) \right] + \delta QI_{t-1} + \gamma PV_0$$

$$\text{Soit : } PV_t = K + \alpha (0,86 \times QI_{t-1} \times UFL_{\text{ration}_{t-1}} + 1,35) + \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-2} (0,86 \times QI_j \times UFL_{\text{ration}_j} + 1,35) \right] - \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-1} (Besoins_j) \right] + \delta QI_{t-1} + \gamma PV_0$$

$$PV_t = K + QI_{t-1} \times (0,86 \times UFL_{\text{ration}_{t-1}} + \delta) + 1,35 \alpha + \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-2} (0,86 \times QI_j \times UFL_{\text{ration}_j} + 1,35) \right] - \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-1} (Besoins_j) \right] + \gamma PV_0$$

$$QI_{t-1} \times (0,86 \times UFL_{\text{ration}_{t-1}} + \delta) = PV_t - K - 1,35 \alpha - \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-2} (0,86 \times QI_j \times UFL_{\text{ration}_j} + 1,35) \right] + \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-1} (Besoins_j) \right] - \gamma PV_0$$

$$QI_{t-1} = \frac{PV_t - K - 1,35 \alpha - \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-2} (0,86 \times QI_j \times UFL_{\text{ration}_j} + 1,35) \right] + \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-1} (Besoins_j) \right] - \gamma PV_0}{(0,86 \times UFL_{\text{ration}_{t-1}} + \delta)}$$

Avec la différence journalière :

$$PV_t = K + \alpha BEC_{t-1} + \delta QI_{t-1} + \gamma PV_0 \quad \text{et} \quad PV_{t-1} = K + \alpha BEC_{t-2} + \delta QI_{t-2} + \gamma PV_0$$

$$\text{Soit : } PV_t - PV_{t-1} = \alpha BEC_{t-1} - \alpha BEC_{t-2} + \delta QI_{t-1} - \delta QI_{t-2}$$

$$PV_t - PV_{t-1} = \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-1} (0,86 \times QI_j \times UFLratio_j + 1,35) - Besoins_j \right] - \alpha \left[\sum_{j=1}^{t-2} (0,86 \times QI_j \times UFLratio_j + 1,35) - Besoins_j \right] + \delta QI_{t-1} - \delta QI_{t-2}$$

$$PV_t - PV_{t-1} = \alpha(0,86 \times QI_{t-1} \times UFLratio_{t-1} + 1,35) - \alpha Besoins_{t-1} + \delta QI_{t-1} - \delta QI_{t-2}$$

$$PV_t - PV_{t-1} = QI_{t-1} \times (0,86\alpha \times UFLratio_{t-1} + \delta) + 1,35\alpha - \alpha Besoins_{t-1} - \delta QI_{t-2}$$

$$QI_{t-1} = \frac{PV_t - PV_{t-1} - 1,35\alpha + \alpha Besoins_{t-1} + \delta QI_{t-2}}{(0,86\alpha \times UFLratio_{t-1} + \delta)}$$

ANNEXE IV : Coefficient des modèles PVlm3 et PVmlm3

| Variables explicative | Coefficient PVlm3(significativité) | Coefficient PVmlm3(significativité) |
|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Intercept (constante en kg) | -23,35 (***) | -9,132 () |
| PV0 (kg) | 0,9376 (***) | 0,9523 (***) |
| BEneg (UFL) | 0,08907 (***) | 0,2169(***) |
| BEpos (UFL) | 0,4496 (***) | 0,1384 (***) |
| Encombrement t-1 (kg MS) | 892,7 (***) | 748,7 (***) |
| Encombrement t-21 (kg MS) | 664,0 (***) | 603,0 (***) |
| Encombrement t-3 (kg MS) | 367,2 (***) | 460,72 (***) |
| Parité -primipare | 12,46 (***) | 4,826 () |
| Parité - multipare | -12,46 (***) | -4,826 () |
| BECneg :Parité -primipare | -0,0002480 () | 0,02215 (***) |
| BECneg :Parité -multipare | 0,0002480 () | -0,02215 (***) |
| BECpos :Parité -primipare | 0,07388 (***) | 0,0560 (***) |
| BECpos :Parité -multipare | -0,07388 (***) | -0,0560 (***) |
| Encombrement t-1 : Parité - primipare | -226,4 (*) | 191,0 (***) |
| Encombrement t-1 : Parité - multipare | 226,4 (*) | -191,0 (***) |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

ANNEXE V : Résultats par vaches des indicateurs d'efficacité étudiés : RFI, résidus du modèle $\Delta PVV \sim \Delta BEC$ et résidus du modèle $Q_{\text{mesurées}} \sim Q_{\text{estimées}}$

| VL | RFI | Résidus $\Delta PVV \sim \Delta BEC$ | Résidus $Q_{\text{mesurées}} \sim Q_{\text{estimées}}$ |
|------|--------------|---|---|
| 1412 | -223.5858862 | 0.37886646 | -1.255253388 |
| 1361 | -206.9657071 | 0.23651984 | -0.745449553 |
| 7028 | -186.2411027 | 0.57359742 | 3.113499689 |
| 1327 | -141.5214039 | 0.22165936 | 0.406546447 |
| 8533 | -141.4899390 | 0.49508650 | -1.321603728 |
| 8540 | -139.6590479 | 0.47712738 | 0.200471482 |
| 282 | -136.5851303 | 0.53012995 | 1.915832736 |
| 1360 | -134.6361415 | 0.06396725 | 0.020355571 |
| 2301 | -119.3874062 | -0.10377791 | -1.085493549 |
| 2306 | -113.1318979 | -0.17173368 | -0.980544394 |
| 2302 | -108.1364260 | 0.38830244 | -1.675242147 |
| 2417 | -102.9597581 | 0.04398353 | -1.222399353 |
| 2338 | -100.3616367 | 0.21502124 | -2.364955194 |
| 8521 | -99.3648064 | 0.07337235 | 3.412669937 |
| 2359 | -89.6855369 | 0.26990355 | -2.505275697 |
| 2324 | -89.0933259 | 0.29580548 | -1.668232703 |
| 1339 | -86.9719392 | 0.39660409 | 0.279990720 |
| 2332 | -78.8696002 | 0.32203645 | -1.542743516 |
| 2315 | -69.0103146 | 0.28637660 | -0.977649152 |
| 1436 | -68.9969162 | 0.64071434 | -0.349337648 |
| 2303 | -63.3197939 | 0.06612730 | -0.909746621 |
| 220 | -54.5124877 | 0.10595110 | 1.212998503 |
| 2414 | -52.4957870 | 0.15960234 | -0.450544017 |
| 2374 | -42.5809939 | -0.06519734 | -0.985230941 |
| 1484 | -37.7542487 | -0.20295192 | 0.360800496 |
| 235 | -37.2739782 | 0.03205345 | -0.121767626 |
| 2415 | -29.4956065 | 0.19733080 | -1.126958619 |
| 2408 | -26.0640344 | 0.13472569 | -2.221249813 |
| 1483 | -24.6627281 | 0.13574417 | -1.719015964 |
| 2419 | -8.0218082 | -0.29249006 | -0.360825341 |
| 2304 | 0.1347262 | -0.26944601 | -0.993719867 |
| 2305 | 2.6017688 | -0.12174288 | -0.837356072 |
| 8508 | 7.8528745 | -0.07542634 | 0.521188192 |
| 2393 | 8.2021618 | -0.09099581 | -0.670636331 |
| 2402 | 12.4606257 | 0.03786766 | -1.093765687 |
| 1309 | 17.0046656 | -0.08810405 | 0.231446679 |
| 2307 | 17.8178079 | 0.31018376 | -1.084123695 |

| | | | |
|------|-------------|-------------|--------------|
| 2433 | 20.6245212 | -0.03154324 | -0.089643182 |
| 277 | 31.9818862 | -0.08086013 | 1.174377007 |
| 2330 | 36.5433886 | -0.07619567 | 0.445998990 |
| 2352 | 41.3611486 | -0.13023667 | -1.005669726 |
| 278 | 44.6934535 | 0.02866264 | 2.359199430 |
| 248 | 45.8416591 | -0.20207004 | 3.415520715 |
| 1326 | 52.6760744 | -0.59646697 | 0.115500995 |
| 265 | 52.9826593 | 0.18356926 | 0.705918457 |
| 1451 | 59.4251737 | 0.11978205 | -0.419726889 |
| 2389 | 74.9526661 | -0.27421334 | -0.831128453 |
| 232 | 83.1928777 | 0.50891805 | -0.605001287 |
| 217 | 83.2826661 | -0.11171662 | 2.720303520 |
| 7067 | 90.0607606 | -0.10820746 | 2.893091936 |
| 2309 | 95.1023076 | -0.09356079 | 0.118323095 |
| 1357 | 95.2690110 | -0.13847010 | 1.992450676 |
| 1370 | 97.5837009 | 0.02014551 | 0.351628890 |
| 2320 | 100.4695767 | -0.21864267 | -1.156390372 |
| 1311 | 104.4021566 | 0.41699777 | 0.003116527 |
| 2371 | 105.7129568 | -0.20942249 | -0.857166489 |
| 1452 | 112.6475327 | -0.26347648 | -0.464298687 |
| 2308 | 117.7842170 | -0.81833723 | -0.224229899 |
| 2328 | 129.1929043 | -0.63754058 | 0.301072865 |
| 219 | 129.5146048 | -0.61412668 | 0.816275223 |
| 2336 | 133.7136279 | -0.57132436 | -0.137701449 |
| 272 | 155.2855430 | -0.21106577 | 2.291724421 |
| 9054 | 180.2603435 | -0.55981786 | 3.104125261 |
| 279 | 237.8786117 | -0.49838623 | 1.583722887 |
| 1340 | 241.5367375 | -0.39124024 | 0.962550538 |



Diplôme : Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage
Spécialité : Sciences Animales pour l'Élevage de Demain (SAED)
Spécialisation / option : parcours professionnel
Enseignant référent : Jocelyne FLAMENT

| | |
|---------------------------------|---|
| Auteur(s) : Aymeric CHARRIER | Organisme d'accueil : INRA – UMR PEGASE |
| Date de naissance* : 02/07/1992 | Adresse : Domaine de la Prise |
| Nb pages : 20 pages Annexe(s) : | 35590 Saint-Gilles |
| Année de soutenance : 2015 | Maître de stage : Philippe FAVERDIN |

Titre français :
Utilisation du poids vif pour le monitoring des réserves corporelles et des matières sèches ingérées
Titre anglais :
Body weight use for the monitoring of body reserves and dry matter intake

L'élevage de précision se développe rapidement, apportant beaucoup d'informations à l'éleveur. Les données récoltées restent encore sous-exploitées. Les réserves corporelles et l'ingestion sont deux phénotypes étroitement liées à la santé et aux performances de reproduction des vaches laitières. Cette étude vise à mieux estimer ces phénotypes à partir des données du poids vif quotidiennes des vaches. Le poids vif a été modélisé à partir de différents modèles de régression. L'ingestion des 3 jours précédents et le bilan énergétique cumulé ont été utilisés comme variables explicatives pour représenter respectivement les contenus digestifs et les réserves corporelles. Le modèle a une bonne prédiction du poids vif avec une erreur résiduelle faible (RMSE=11,7 kg). Le poids des contenus digestifs semble varier d'environ 3kg par kg de matière sèche ingérée. Le choix du bilan énergétique pour traduire les variations de réserves corporelles semble induire des erreurs dans le modèle du poids vif liées aux variations d'efficacité alimentaire interindividuelles. La prédiction des quantités ingérées individuelles journalières à partir des variations quotidiennes de poids vif et de la production laitière est relativement précise (RMSE=3,3 kg MS). Ces estimations restent fragiles en début de lactation et souffrent de l'efficacité individuelle des vaches. Le poids vif mesuré quotidiennement, peut permettre d'évaluer rapidement les variations des quantités ingérées et des réserves corporelles, ce qui peut s'avérer pertinent dans la gestion du troupeau et de l'économie de l'exploitation.

Precision livestock farming is growing rapidly, bringing to farmer a lot of information. Data collected are still being underused. Body reserves and feed intake are two phenotypes link to health and reproduction performance of dairy cows. The aim of this study is to improve the estimation of these phenotypes using daily body weight of cows. Body weight was modeled from different regressions. Feed intake of 3 previous days and the cumulative energy balance were used as explicative variable to represent respectively digestive contents and body reserves. The model gives a good prediction of the body weight with a low residual error (RMSE=11.7 kg). The weight of the digestive content seams to vary approximately from 3 kg by kg of dry matter intake. Use of the energy balance to represent variations of body reserves seams to lead to error in the body weight model due to variations of inter-individuals feed efficiency. Prediction of individually daily feed intake from variation of daily body weight and milk yield is quiet accurate (RMSE=3.3 kg MS). These estimations are still being fragile in early lactation and suffer of the cows' individually efficiency. Body weight recorded every day, allows a quick evaluation of variation of food intake and body reserves, which can be useful in the heard and economy management of the farm.

Mots-clés : poids vif, ingestion, réserves corporelles, vache laitière, élevage de précision,
Key Words: body weight, feed intake, body reserve, dairy cow, precision livestock farming

