

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 quantités 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*



# Remerciements

---

# Sommaire

---

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>I</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>V</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>MATERIELS ET METHODES</b> .....	<b>4</b>
1) DISPOSITIF EXPERIMENTAL .....	4
2) MESURES ET ANALYSES.....	4
3) MODELISATION DU POIDS VIF .....	5
a) <i>Représentation des contenus digestifs dans le modèle de poids</i> .....	6
b) <i>Bilan énergétique cumulé positif et négatif pour estimer les réserves corporelles</i> .....	6
c) <i>Interactions entre le rang de lactation et les autres variables du modèle</i> .....	8
4) PREVISION DES QUANTITES INGEREES A PARTIR DU MODELE DU POIDS.....	8
5) MODELE DE CALCUL DE L'EFFICIENCE DES VACHES LAITIERES.....	9
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
<b>RESULTATS</b> .....	<b>13</b>
1) UN MODELE DU PV PERMETTANT DE BIEN ESTIMER SES COMPOSANTES .....	13
a) <i>Choix du modèle mixte pour mieux estimer les composantes du PV</i> .....	13
b) <i>Une utilisation énergétique différente selon le signe du BE</i> .....	14
c) <i>Les QI des 3 derniers jours influencent le PV avec des coefficients décroissants</i> .....	14
2) PREDICTION DES QI : UN MODELE ORIGINAL QUI TROUVE SES LIMITES EN DEBUT DE LACTATION .....	14
3) L'EFFICIENCE DES VACHES, UN PARAMETRE INDIVIDUEL QUI PEUT EXPLIQUER UNE PARTIE DES RESIDUS DES MODELES .....	15
a) <i>Le RFI : un modèle de l'efficacité cohérent</i> .....	15
b) <i>L'efficacité énergétique est significativement corrélée aux résidus du modèle <math>\Delta PVV \sim \Delta BEC</math></i> .....	15
c) <i>L'efficacité énergétique significativement reliée aux résidus du modèle <math>Q_{mesurées} \sim Q_{estimées}</math></i> ....	16
<b>DISCUSSION</b> .....	<b>17</b>
1) DES VALEURS POUR LA CONVERSION DES ENCOMBREMENTS EN POIDS DES CONTENUS DIGESTIFS ROBUSTES ET COHERENTES	17
2) UNE ESTIMATION DES RESERVES CORPORELLES PAR LE POIDS VIF ENCOURAGEANT MAIS ENCORE FRAGILE .....	18
3) LE DEBUT DE LACTATION : UNE PERIODE DIFFICILE POUR LA PREDICTION DU POIDS VIF ET DES QUANTITES INGEREES.....	19
4) VERS UNE GESTION DU TROUPEAU ET UNE ALIMENTATION DE PRECISION PILOTEES PAR LE POIDS VIF .....	19
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>20</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE ET SITOGRAPHIQUE</b> .....	<b>21</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>23</b>

## 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 :*

$$\mathbf{PVglm1} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif}$$

$$\mathbf{PVglm2} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif} + Parité$$

$$\mathbf{PVglm3} = PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV0} + BEC_{positif} + BEC_{negatif} + Parité + \text{Intéractions}$$

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

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

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

$$(5) = QI \sim PL + MG + MP + PVV + \Delta PVV_{final} - \min + \Delta PVV_{final} - \text{initial}$$

$$(4) = PV_t \sim \alpha BEC_{t-1} + \delta QI_{t-1} + \gamma PV_0$$

# Liste des Figures

---

**FIGURE 01 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU CONCEPT DE L'ELEVAGE DE PRECISION. (ALLAIN ET AL. 2014)**

**FIGURE 02 : POIDS VIF (BW EN KG), LA NOTE D'ETAT CORPOREL (BCS, NOTE DE 1 A 5) ET LA PRODUCTION LAITIERE (MILK YIELD EN KG) SELON LA PARITE DES VACHES LAITIERES (SPURLOCK ET AL. 2012)**

**FIGURE 03 : SCHEMA REPRESENTANT LES COMPOSANTES PRINCIPALES DU POIDS VIF D'UNE VACHE LAITIERE AU COURS DU TEMPS (EXEMPLE D'UNE LACTATION) (CHILLIARD ET AL. 1983). LE POIDS VIF VIDE (PVV) EST LE POIDS MOINS LES CONTENUS DIGESTIFS. LES VALEURS SONT A TITRE D'EXEMPLE. LES POIDS DE L'UTERUS GRAVIDE, DU FŒTUS ET DE LA MAMELLE NE SONT VOLONTAIREMENT PAS REPRESENTES (CF MATERIELS ET METHODES)**

**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 DPV<sub>MLG3</sub> :  $PV - PV \text{ A } T=0$ . LES INTERACTIONS SONT CELLES ENTRE LA PARITE ET LES AUTRES VARIABLES EXPLICATIVES : ENCOMBREMENT ET BEC. BEC = BILAN ENERGETIQUE CUMULE, PV = POIDS VIF, QI = QUANTITES INGEREES.**

**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). PCO = POURCENTAGE DE CONCENTRE DANS LA RATION, LA VALEUR DE 0,35 A ETE PRISE POUR ILLUSTRER AVEC NOTRE RATION. NI = NIVEAU D'INGESTION DE MATIERE SECHE EXPRIME EN POURCENTAGE DU POIDS VIF =  $MSI/PV * 100$ .**

**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. 2007)**

**FIGURE 08 : GRAPHIQUE DE LA CORRELATION ENTRE UFL ET UFLCORRIGEEES D'APRES LES VALEURS D'UFLCORRIGEE TROUVEE PAR SYSTALI A PARTIR D'UNE RATION DE 35% DE CONCENTRES.**

**FIGURE 09 : RESIDUS DES MODELES DE POIDS VIF PV<sub>GLM 1</sub> A GAUCHE ET PV<sub>MLM1</sub> 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 0,5.**

**FIGURE 10 : MATIERES SECHES INGEREES (MSI) MESUREES (NOIR) ET ESTIMEES (ROUGE) DE LA VACHE N° 2352 AU COURS DES 120 PREMIERS JOURS DE LACTATION.**

**FIGURE 11 : 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 0,5)**

**FIGURE 12 : PV (NOIR) ET PVV (ROUGE) DE LA VACHE N°2301 AU COURS DE LA LACTATION. LE PVV EST EGAL AU PV MOINS LES CONTENUS DIGESTIFS ESTIME A PARTIR DU MODELE MIXTE DU PV PV<sub>MLM1</sub>**

**FIGURE 13 : RFI EN FONCTION DES RESIDUS MOYEN DE  $\Delta PVV \sim \Delta BEC$  DES 65 VACHES. LES ZONES VERTES REPRESENTENT LES ZONES DE CONCORDANCES ENTRE LES INDICATEURS D'EFFICIENCE. EN ROUGE LES ZONES DE DISCORDANCES.**

**FIGURE 14 : POIDS VIF, POIDS VIF VIDE, BILAN ENERGETIQUE CUMULE ET BILAN ENERGETIQUE CUMULE CORRIGE DE L'EFFICIENCE, DE LA VACHE N° 1412 (MULTIPARE) AU COURS DES 120 PREMIERS JOURS DE SA LACTATION.**

**FIGURE 15 : RFI EN FONCTION DES RESIDUS MOYEN DE QI MESUREES ~ QI ESTIMEES DES 65 VACHES. LES ZONES VERTES REPRESENTENT LES ZONES DE CONCORDANCES ENTRE LES INDICATEURS D'EFFICIENCE. EN ROUGE LES ZONES DE DISCORDANCES.**

**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 : SCHEMA BILAN DES VALORISATIONS POSSIBLES DU MONITORING DU PV ASSOCIE AU MONITORING DE LA PRODUCTION LAITIERE, D'APRES LES 6 MOIS DE STAGE.**

## Liste des Tableaux

---

**TABLEAU 01 : COMPOSITION DE LA RATION UNIQUE ET LES VALEURS ALIMENTAIRES DES ALIMENTS.**

**TABLEAU 02 : FREQUENCE DE MESURE DES DIFFERENTES DONNEES**

**TABLEAU 03 : RECAPITULATIF DU NOMBRE DE VALEURS ABERRANTES (OUTLIERS) TROUVEES DANS LE JEU DE DONNEES AVEC LA TECHNIQUE DU LOESS.**

**TABLEAU 04 : MINIMAL, MAXIMAL, MEDIANE ET ECART TYPE DES VARIABLES PV, QI ET BILAN ENERGETIQUE CUMULE (BEC) DU JEU DE DONNEES APRES NETTOYAGE DE LA BASE.**

**TABLEAU 06: AIC ET RMSE DES MODELES DE PV ETUDIES**

**TABLEAU 07 : COEFFICIENTS DES VARIABLES EXPLICATIVES DES MODELES DU POIDS VIF ET DE VARIATIONS DE POIDS VIF PAR LE MODELE LINEAIRE GENERALISE (PVMLG 1 ET DPVML 1G) ET PAR LE MODELE MIXTE DE POIDS VIF (PVMLM 1)**

**TABLEAU 08 : COEFFICIENTS DES VARIABLES EXPLICATIVES DU MODELE DU RFI**

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

**TABLEAU 10 : METHODES DE PREDICTION DU POIDS DES CONTENUS DIGESTIFS DE BOVINS LAITIERS AINSI ISSUES DE NOTRE ETUDE.**

# Liste des Annexes

---

<b>ANNEXE I : VALEURS ALIMENTAIRES PLUS DETAILLEES DES ALIMENTS DE LA RATION</b>	<b>55</b>
<b>ANNEXE II : PROTOCOLE DE DETERMINATION DE LA MATIERE SECHE DES ALIMENTS DE LA RATION</b>	<b>57</b>
<b>ANNEXE III : DEMONSTRATION DES EQUATIONS DE PREDICTION DES QUANTITES INGEREES A PARTIR DU MODELE DU POIDS VIF</b>	<b>61</b>
<b>ANNEXE IV : COEFFICIENT DES MODELES PVGLM3 , DPVGLM3 ET PVMLM364</b>	
<b>ANNEXE V : REDULTATS PAR VACHES DES INDICATEURS D'EFFICIENCE ETUDIES : RFI, RESIDUS DU MODELE <math>\Delta PVV \sim \Delta BEC</math> ET RESIDUS DU MODELE <math>Q_{MESUREES} \sim Q_{ESTIMEES}</math></b>	<b>66</b>

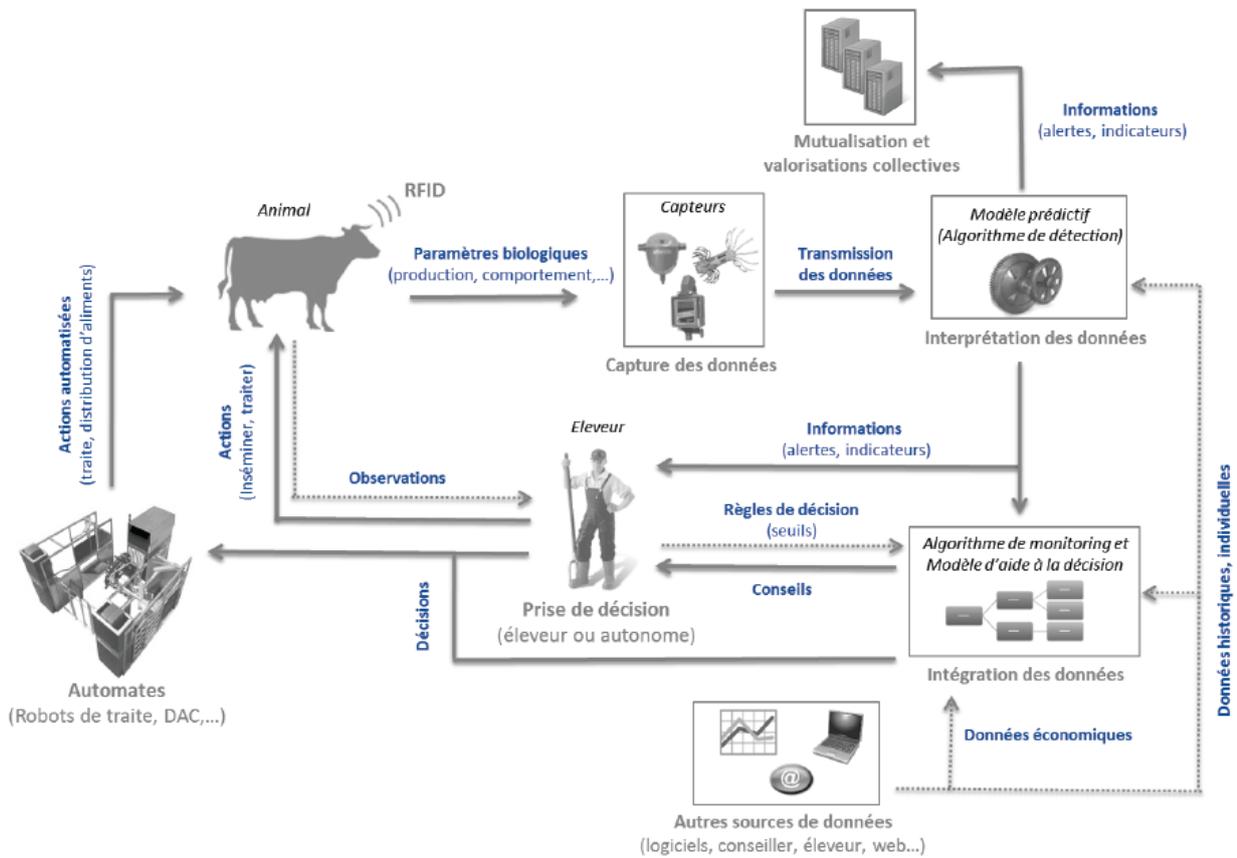


Figure 01 : Représentation schématique du concept de l'élevage de précision. (Allain *et al.* 2014)

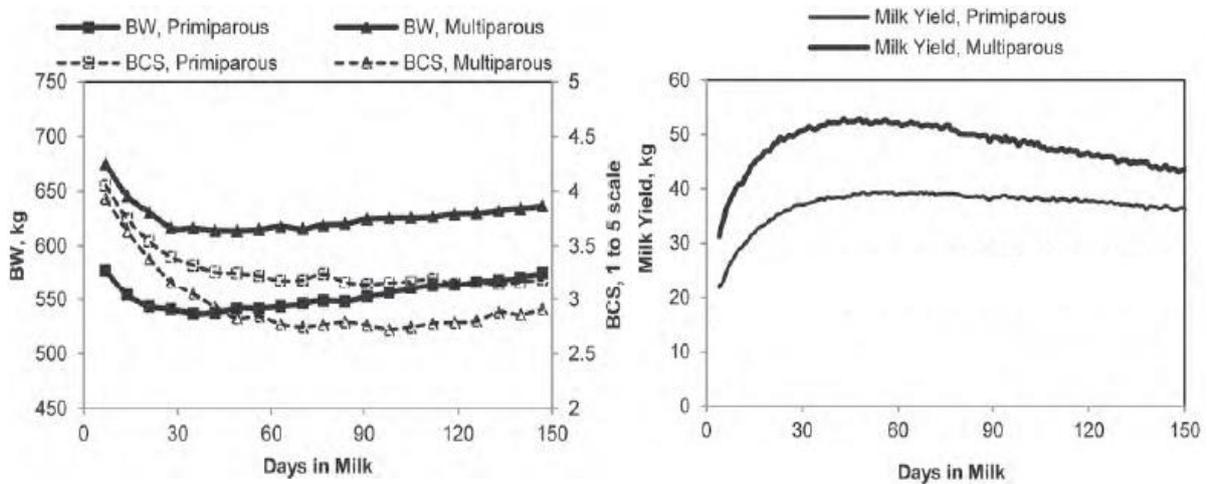


Figure 02 : Cinétiques du poids vif (BW en kg), de la note d'état corporel (BCS, notée de 1 à 5) et de la production laitière (Milk Yield en kg) selon la parité des vaches laitières au cours de la lactation. (Spurlock *et al.* 2012)

# 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 01**). 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 des 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 pour le suivi de l'animal en élevage même si plusieurs systèmes entièrement automatisés sont commercialisés (Taxatron 5000<sup>®</sup> de GEA Farm Technologies, Afiweight<sup>®</sup> de Afimilk, Gravitor<sup>®</sup> du robot de traite Lely ...). 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 de 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 corporelles en début de lactation semble programmée génétiquement (Friggens *et al.* 2007). 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 de santé et reproduction qui sont 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 corporelles 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...) affectaient l'état des réserves corporelles. D'autre part, un état ou des variations d'état des 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<sup>ère</sup> 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 ce 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 comblée par la mobilisation des réserves corporelles, le BE est négatif. Le bilan énergétique cumulé, qui est la somme des bilans énergétiques 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 car il nécessite les mesures de quantités ingérées qui ne sont pas disponibles en ferme commerciale : les infrastructures nécessaires sont trop chères et leur utilisation trop contraignante.

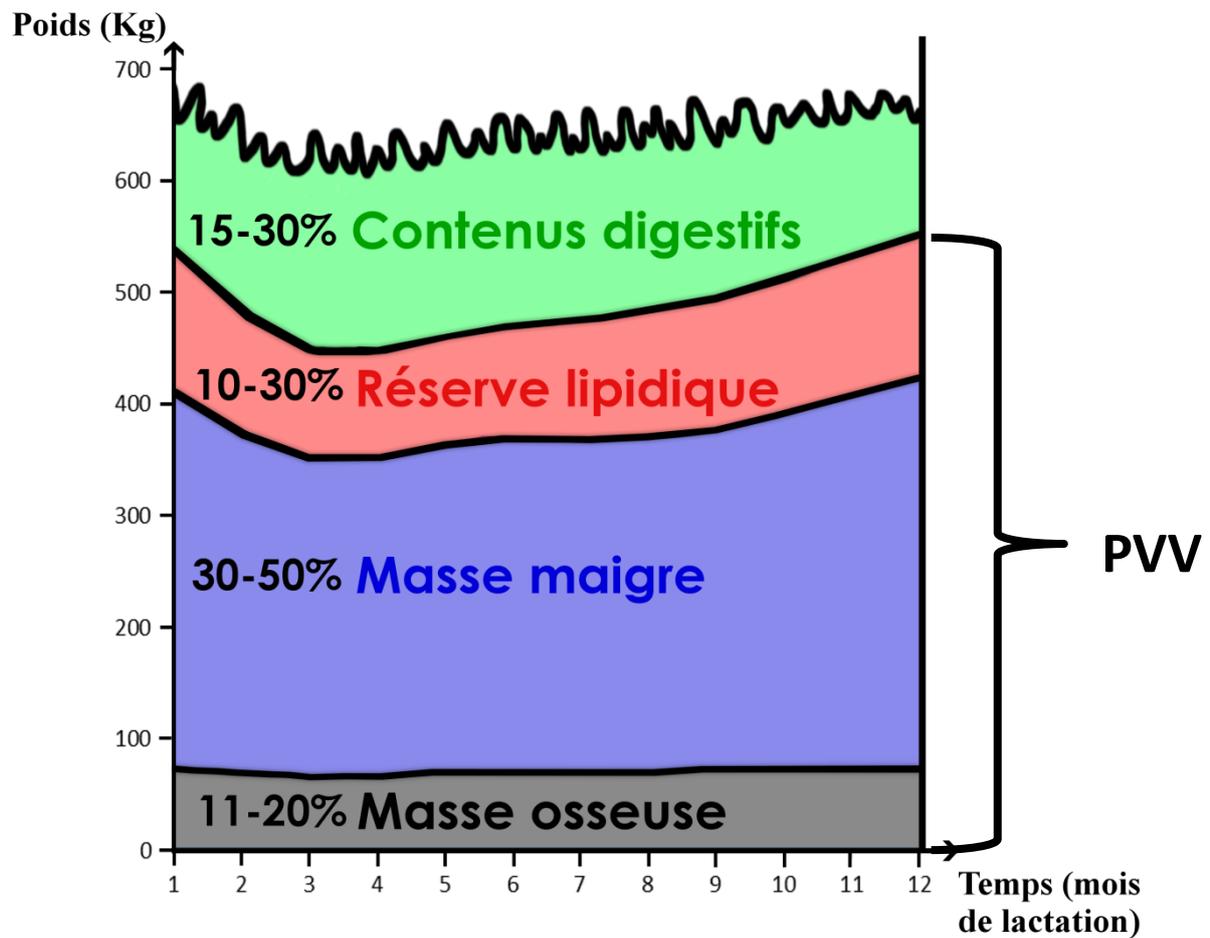


Figure 03 : Schéma représentant les composantes principales du poids vif d'une vache laitière au cours d'une lactation (Chilliard *et al.* 1983). Le poids vif vide (PVV) est le poids vif moins les contenus digestifs. Les valeurs sont données à titre d'exemple. Les poids de l'utérus gravide, du fœtus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

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 de faire des mesures à haut débit qui soient plus objectives et plus répétables que la NEC. Cette automatisation fournira dans quelque temps des cinétiques très intéressantes à étudier pour approcher les variations des réserves corporelles.

De récents travaux ont montré que la combinaison des variations de PV et de la NEC estimaient 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 poids vif 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 de 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 quantités ingérées et masquent en partie la perte de poids vif lié à la mobilisation des réserves corporelles. Pour pallier au besoin d'avoir des quantités ingérées, certains ont considéré que le poids des contenus digestifs était fonction du poids vif 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 poids vif. Pour cela, nous allons orienter le travail autour de 3 questions :

- Peut-on construire un modèle du poids vif 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 quantités ingérées à partir des variations de poids vif 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 BE cumulé et la variation des réserves corporelles estimées par la variation de PVV, pourraient-ils provenir de différences d'efficacité alimentaire entre vaches ?

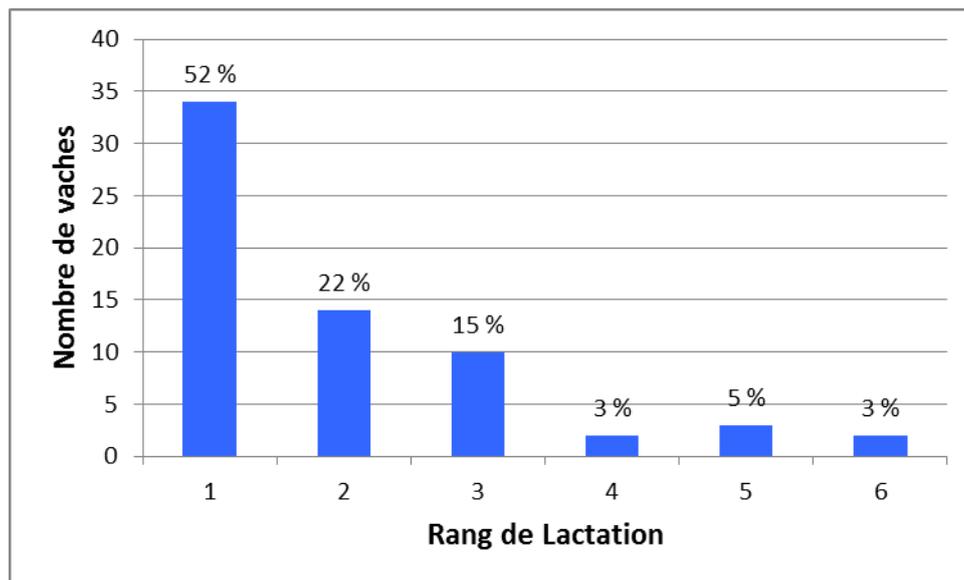


Figure 04 : Distribution des vaches étudiées selon leur parité (n=65 vaches).

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

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

*MS<sub>totale</sub> : matière sèche de la ration totale distribuée ; UFL : unité fourragère lait = énergie nette pour la production laitière, 1 UFL = 1 700 kcal. 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	1 / jour
- 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)	2 / semaine
- Le taux butyreux, le taux protéique	2 / semaine
- Teneur en matière sèche pour les concentrés	1 / semaine
- Note d'état corporel par palpation	1 / mois

# 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 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. 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 sur l'interprétation du PV.

## 2) Mesures et analyses

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

Le poids vif est mesuré tous les jours à la sortie de la traite par une stalle de pesée automatique statique : W-2000<sup>®</sup>, 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 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 pondérée du jour.

La ration est distribuée deux fois par jour, à 9h puis à 17h, dans des auge individuelles : chaque vache a son auge et n'a pas accès à l'auge des autres. 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 MS des aliments qui constituent la ration, on en déduit la quantité d'aliments offerts en MS. 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

<sup>1</sup> 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

comme la différence entre la quantité offerte en MS et 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 en énergie nette des aliments, exprimées en UFL pour les bovins lait.

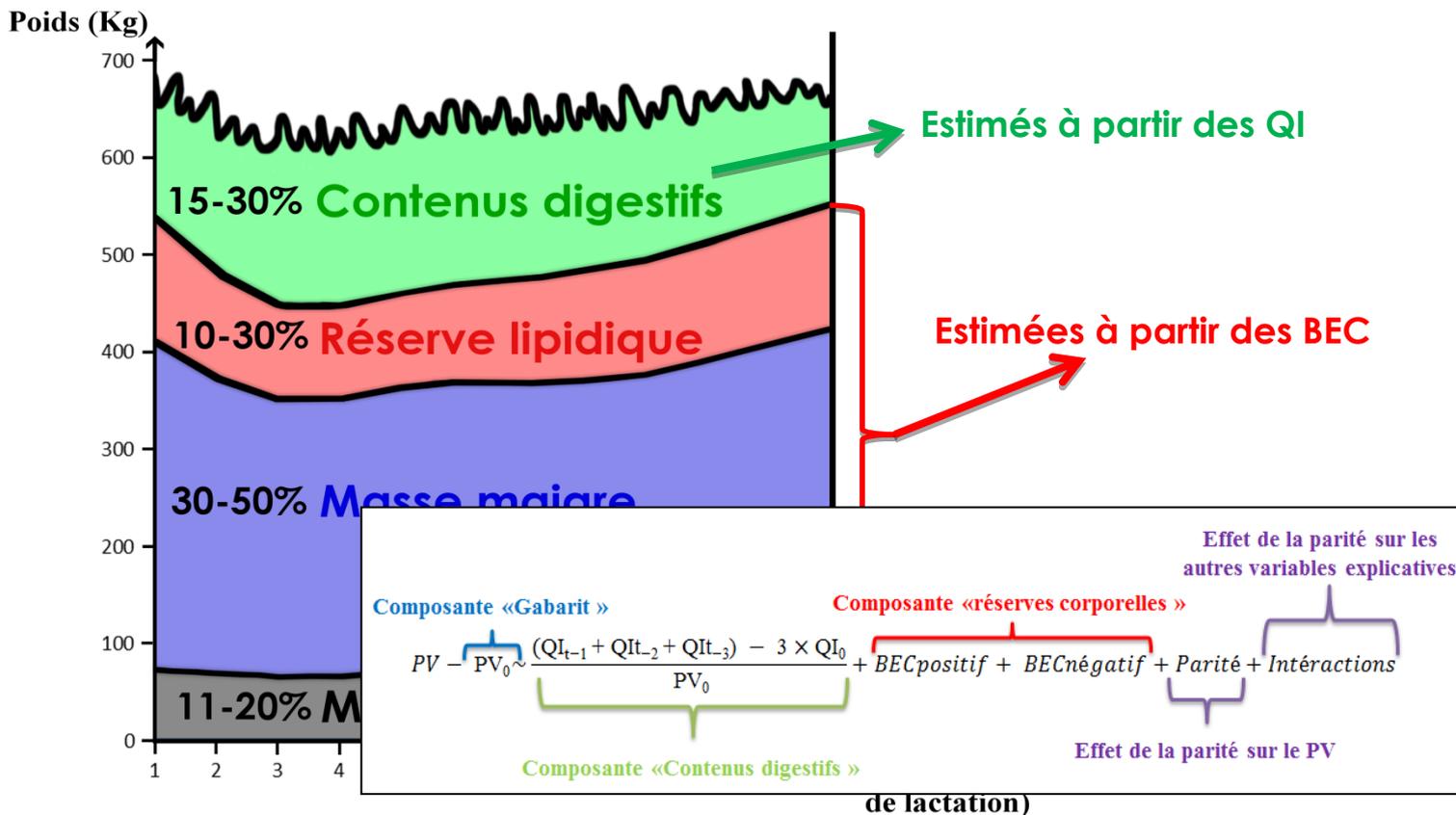


Figure 05 : Schéma récapitulatif des variables utilisées pour estimer les composantes du PV et l'équation utilisée pour le modèle **DPVmlg3** qui prédit PV-PV<sub>0</sub>. Les interactions sont celles entre la parité et les autres variables explicatives, à savoir relatives aux contenus digestifs et aux réserves corporelles.

*BEC<sub>positif</sub>* = bilan énergétique positif cumulé ; *BEC<sub>négatif</sub>* = bilan énergétique négatif cumulé ; *PV* = poids vif ; *QI* = quantité ingérée ; *PV<sub>0</sub>* = poids vif moyen des 3 premiers jours après vêlage.



### 3) Modélisation du poids vif

L'objectif est de développer un modèle des variations quotidiennes de poids vif des vaches laitières au cours de la lactation. Le poids vif est constitué de 6 composantes : la masse osseuse, la masse maigre, la masse lipidique et les contenus digestifs, poids du lait de la mamelle, poids de l'utérus gravide et du fœtus. Les données de PV utilisées sont toutes prises en sortie de traite, elles sont donc corrigées du poids du lait dans la mamelle. De plus, la période d'étude est antérieure à 150 jours de gestation, le poids de l'utérus gravide et du fœtus sont négligeables (Thorup *et al.* 2012). La décomposition du PV relative à notre étude ne concerne que les 4 premières composantes : masse maigre, masse lipidique, osseuse, contenus digestifs. La part des composantes « maigre, lipidique et contenus digestifs » varie au cours de la lactation et sont donc des facteurs de variation du PV (**Figure 05**). L'idée est de construire le modèle en y intégrant les variables reflétant ces composantes du poids vif (**Figure 05**).

Nous sommes partie d'un modèle expliquant les variations de PV en construisant des variables explicatives reflétant les composantes du PV « masse osseuse », « masse maigre », « masse lipidique » et « contenus digestifs ».

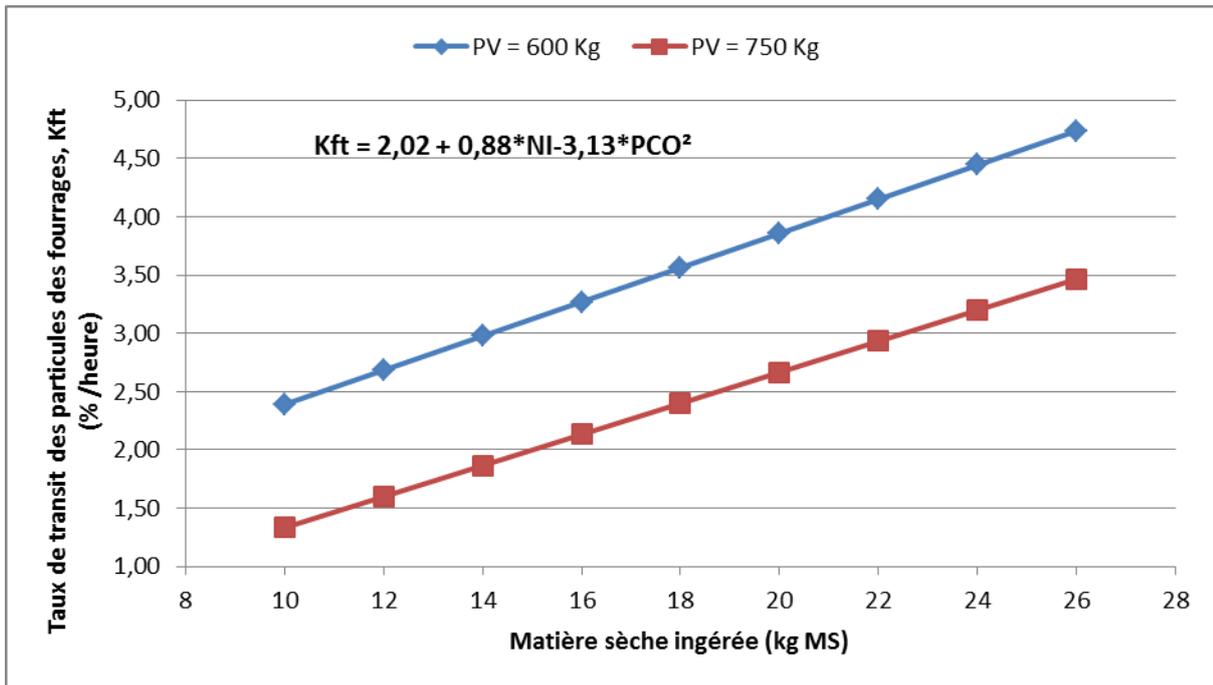


Figure 06 : Évolution de la vitesse de transit des particules de fourrages en fonction des quantités de matière sèche ingérées. Exemple pour deux vaches de poids vif 600 kg et 750 kg. L'équation est issue des travaux de (Sauvant et Nozière 2013).

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

### *a) Représentation des contenus digestifs dans le modèle du poids*

Sauvant et Nozière (2013) ont montré que le transit de la ration dans le tractus digestif augmentait avec les quantités ingérées et que cet encombrement était proportionnel format de l'animal pour une ration donnée (**Figure 06**). De plus, Mambrini (1990) montre que pour une vache laitière le temps de séjour des aliments dans l'ensemble du tractus digestif variait d'une 40<sup>aine</sup> d'heures à une 60<sup>aine</sup> 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 l'analyse du PV. Dans cette optique, nous avons créé 3 variables d'encombrement : encombrement la veille (à t-1), l'avant-veille (t-2) et 3 jours avant (t-3). En somme la composante des contenus digestifs à l'instant t est estimée à partir des encombrements à t-1, t-2 et t-3 :

$$\text{Contenu digestif à } t \sim \frac{QI \text{ à } t - 1}{PV0} + \frac{QI \text{ à } t - 2}{PV0} + \frac{QI \text{ à } t - 3}{PV0}$$

### *b) Bilan énergétique cumulé positif et négatif pour estimer la composante 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 bilan énergétique cumulé (BEC).

Le bilan énergétique (BE) est calculé d'après les modèles INRA 2010 (Agabriel et al. 2010) comme la différence entre l'apport énergétique 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 de 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.

Calcul du BE, d'après Agabriel et al. (2010) :

BE (en UFL)=

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

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

$$\text{Apports d'un aliment (en UFL)} = \text{valeur énergétique aliment (UFL/ kg MS)} \\ \times (\text{QI}_{\text{ingérée}} \text{ (en kg MS)} \times \% \text{ aliment dans ration} \times \text{teneur MS aliment})$$

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

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

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

Les besoins de gestation ont été considérés comme négligeables puisque l'on étudie seulement les 120 premiers jours de lactation (Agabriel *et al.* 2010). Pour les besoins, seuls les besoins de production et d'entretien ont été pris en compte :

$$\text{Besoin}_{\text{entretien}} = 0,041 \times \text{PV}^{0,75} \times 1,1$$

Avec le PV en kg

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

Avec 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 poids vif était associé à un apport excédentaire de 4,5 UFL par la ration alors que la perte d'1 kg de poids vif 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 dans le modèle retenu : une cumulant les BE positifs (BECpos), l'autre les BE négatifs (BECneg).

En somme, les réserves corporelles sont estimées par :

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

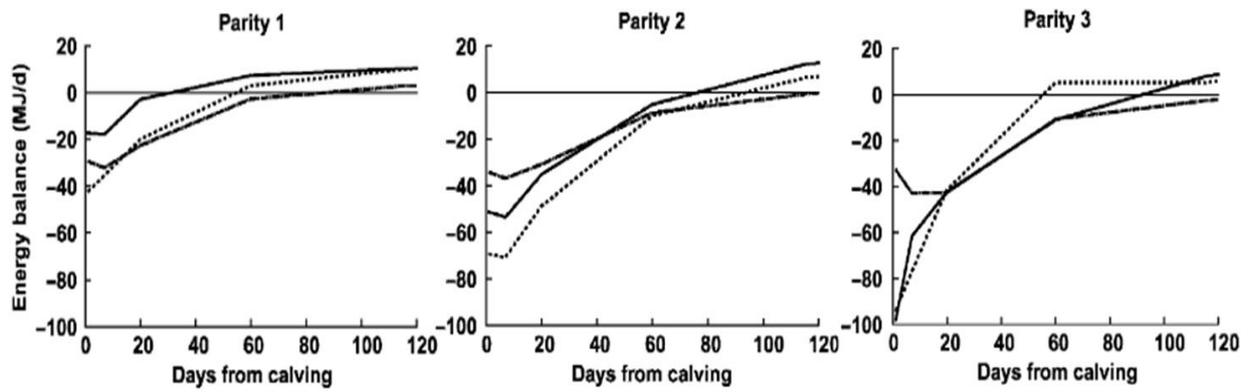


Figure 07 : Évolution du bilan énergétique (MJ/jour) selon la parité de 3 races de vaches (Danish Holstein, points ; Danish Red, trait plein ; Jersey, tirets) alimenter par la même ration (Friggens *et al.* 2007)

### c) Effet de la parité de la vache

Le troupeau contient des primipares et des multipares. Les primipares sont encore en phase de croissance et par conséquent déposent plus de masse maigre que les multipares. Un facteur parité à 2 modalités a donc été ajouté dans le modèle pour tenir compte de cette différence entre primipares et multipares.

Les observations faites par Friggens *et al.* (2007) témoignent que les primipares ont une cinétique du BEC différente des multipares, avec une amplitude plus faible (**Figure 07**). Pour tenir compte de ces observations, nous avons intégré une interaction entre l'effet « parité » et les variables  $BEC_{positif}$  et  $BEC_{négatif}$ .

Par ailleurs, Faverdin (1992) observe que les primipares avaient 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 été ajoutées au modèle.

### d) Comparaison de 2 modèles statistiques du poids vif

Le modèle statistique utilisé est un modèle d'analyse de la covariance, adapté pour traiter un modèle contenant des variables quantitatives et qualitatives (modèle **PVglm3**). Si les coefficients sont robustes au cours du temps, l'effet 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 du temps, un deuxième type de modèle a été adopté pour tester la stabilité des coefficients du modèle : le modèle linéaire mixte. Ce type de modèle permet notamment d'intégrer un effet temporel dans le modèle comme 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 (modèle **PVmlm3**).

Pour chaque modèle, on utilise une variable relative au poids vif de début de lactation pour corriger de la différence de gabarit des vaches choisies. Compte tenu de la variabilité importante de la mesure du poids vif, la moyenne sur les 3 premiers jours de lactation a été choisie pour représenter ce poids de référence (PV0).

Les 2 modèles construits sont :

$$\mathbf{PVglm3} : PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV_0} + BEC_{positif} + BEC_{négatif} + Parité + Intéactions$$

$$\mathbf{PVmlm3} : PV \sim PV0 + \frac{QI_{t-1} + QI_{t-2} + QI_{t-3}}{PV_0} + BEC_{positif} + BEC_{négatif} + Parité + Intéactions + Vache^\# + JAV^\#$$

Avec comme interactions celles entre le  $PV_0$ ,  $BEC_{positif}$ ,  $BEC_{negatif}$  et les encombrements avec la parité.  $Vache^{\#}$  et  $JAV^{\#}$  sont des variables à effets aléatoires.

#### 4) Prédiction des quantités ingérées à partir du modèle du poids

Dans les modèles construits,  $PV_{glm3}$  et  $PV_{mlm3}$ , 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. Ces 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 (*modèle 1*) pour isoler les QI et de cette manière prédire les QI avec les variations de PV et de besoins énergétiques.

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

$$\Delta PV = \delta \times \frac{\Delta QI}{PV_0} + \alpha \times BEC \quad (1)$$

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 **PVglm3** et **PVmlm3** et  $\Delta \text{réserves corporelles}$  : variation des réserves corporelles, estimée comme précédemment par le BEC.

On part donc d'un modèle simple de régression linéaire (2) du PV en fonction du BEC, de l'encombrement et du poids vif de référence ( $PV_0$ ) pour chaque vache pour corriger de la différence de gabarit.

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

La régression linéaire multiple a été choisie ici parce qu'elle permet d'utiliser les résultats du modèle linéaire comme une équation mathématique (3).

$$PV_t = \alpha BEC_{t-1} + \delta \frac{QI_{t-1}}{PV_0} + \gamma PV_0 \quad (3)$$

En exprimant BEC en fonction de QI, on a :

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

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

$$PV_t - PV_{t-1} = \alpha \left( (QI \times \text{teneur UFL})_{t-1} - \text{besoins}_{t-1} \right) + \delta \frac{QI_{t-1} - QI_{t-2}}{PV_0} \quad (4)$$

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 le jour  $t$  ;  $BEC_{t-1}$  : le BEC le jour  $t-1$  et  $QI_{t-1}$  et  $QI_{t-2}$  : les QI le jour  $t-1$  et le jour  $t-2$ .

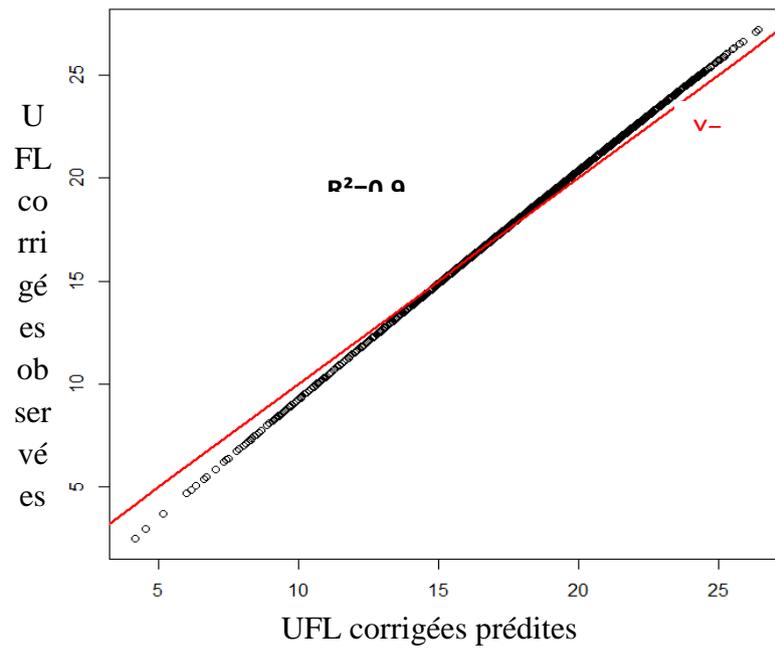


Figure 08 : Corrélation entre la quantité d'énergie nette ingérée corrigées des interactions digestives mesurée et prédite par le modèle pour une ration de 35% de concentrés.

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

A partir de l'équation (4), on peut isoler  $QI_{t-1}$ . La teneur en UFL de la ration du jour  $t-1$  est la teneur en UFL corrigée des interactions digestives, E (cf. partie 3. b). Afin d'éviter une équation quadratique des QI qui compliquerait l'équation (4), on utilise une simplification du calcul de l'énergie nette corrigée. Un modèle de régression linéaire entre l'énergie nette ingérée (UFL= QI x UFLration) et l'énergie nette ingérée corrigée des interactions digestives (UFLcorrigées = 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% concentrés. Les valeurs d'UFLcorrigées ont été calculées à partir du logiciel SYSTALI. La régression obtenue (5) 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 UFLcorrigées prédites par la régression sont très corrélées avec un coefficient de détermination très proche de 1 (**Figure 10**).

$$UFL_{corrigée} = 0,863 \times (QI \times UFL_{ration}) + 1,35 \quad (5)$$

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 (4) et (5), on arrive à isoler  $QI_{t-1}$  d'après l'équation (6) (Démonstration en ANNEXE III).

$$QI_{t-1} = \frac{(PV_{t-1} - PV_{t-2} + 1,35 \times \alpha + \delta \times QI_{t-2} + \alpha \times Besoins_{t-1})}{\delta + 0,86 \times \alpha \times UFL_{ration_{t-1}}} \quad (6)$$

Avec  $\alpha, \gamma$  et  $\delta$  les constantes, issues de la régression multiple :  $PV \sim K + \alpha BEC + \gamma PV_0 + \delta QI_{t-1}$ , respectivement du bilan énergétique, du PV0 et du  $QI_{t-1}$ ; K une constante. On a  $\alpha=0,21, \gamma=0,82, \delta=4,63$  et  $K=35,42$ .

Avec  $UFL_{ration}$  : la teneur en UFL de la ration

Le modèle ainsi formalisé est une suite qui part de  $QI_{t=0}$  puis estime  $QI_1$  à partir de ( $PV_1 - PV_0$ ),  $QI_0$ , des besoins énergétiques de production et d'entretien du jour 1 et de la teneur en UFL de la ration du jour 1. 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 efficience 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 difficile de capter par ces

<sup>2</sup> : Une série est stationnaire si sa moyenne et sa variance sont stable au cours du temps

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 : l'indicateur de l'efficacité alimentaire couramment utilisé en recherche*

Cette notion d'efficacité 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 ceux 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 (7) comme différence entre les QI observées et les QI 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 sur la période d'étude (PL), le cumul des quantités de matière grasse produites (MG) et le cumul des quantités de matière protéique produite (MP). Le besoin d'entretien est représenté par le poids vif vide moyen (PVV) calculé d'après l'équation (8) de Piton (date). La dynamique des réserves corporelles est calculée par 2 variables :  $\Delta PVV_{\text{final-initial}}$  et  $\Delta PVV_{\text{max-min}}$ .  $\Delta PVV_{\text{final-initial}}$  est calculée comme la différence entre PVV final et initial.  $\Delta PVV_{\text{max-min}}$  est calculée comme la différence entre PVV maximal 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 engendre un coût énergétique supplémentaire.

Le modèle utilisé pour prédire les QI est alors :

$$QI \sim PL + MG + MP + PVV + \Delta PVV_{\text{max-min}} + \Delta PVV_{\text{final-initial}} + \varepsilon \quad (7)$$

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) et  $\varepsilon$  les résidus du modèle.

$$PVV \text{ (kg)} = PV \text{ (kg)} - 4,5 \times QI \text{ (kg MS)} \quad (8)$$

Le RFI d'une vache correspond au résidu,  $\varepsilon$ , issu du modèle (7).

#### *b) L'efficacité alimentaire calculée à partir des erreurs des modèles de PV et QI*

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 dans le par le BEC. Le PVV est estimé à partir du modèle obtenu, PVmlm1 en retirant les composantes associées à l'encombrement aux PV observé (9) car ces encombrements, multipliés par les coefficients associés 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 du PV PVmlm1 on a :

$$PVV_t = PV_t - \frac{(\delta_1 QI_{t-1} + \delta_2 QI_{t-2} + \delta_3 QI_{t-3})}{PV_0} \quad (9)$$

Avec  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  et  $\delta_3$  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 de 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 (10).

$$(PVV_t - PVV) = \mu + \beta \times (BEC_t - BEC_{t-1}) + \varepsilon \quad (10)$$

Quand les résidus du modèle (10),  $\varepsilon$ , sont positifs, ça veut dire 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, alors on devrait avoir un RFI corrélé négativement aux résidus du modèle (10) une vache efficace a un RFI négatif et des résidus de modèle positifs.

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 mangé plus que prévu, donc qu'elle est plus 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 pesée en sortie de traite présentait des problèmes d'identification ou de tare à certains moments, à l'origine de valeurs aberrantes. De même l'automate de distribution de la ration a eu quelques dysfonctionnements pendant la période étudiée, 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 stationnaires<sup>2</sup>, ce qui est notre cas.

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	168 (2,2%)	7 605
Production laitière	42 (0,6%)	7 605
Quantité ingérée	254 (3,3%)	7 605
Taux butyreux	64 (3,4%)	1887
Taux protéique	16 (0,8%)	1887

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



Pour le poids vif, la production laitière, les taux butyreux et protéiques et la quantité de matière sèche ingérée, le Loess a été ajusté aux données avec un degré de lissage de 50% : si notre série contient 120 PV, pour chacun des PV, le Loess estime une valeur de PV à partir des 60 plus proches voisins de ce point. 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 du jeu de données. Ces valeurs ont été choisies de manière empirique pour maximiser la détection de valeurs aberrantes tout en conservant les bonnes valeurs. Les valeurs supprimées ont été remplacées 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, les taux et la production laitière ont été approximées par régression linéaire entre le plus proche voisin qui précède et le plus proche voisin postérieur à la valeur manquante. Afin de conserver un maximum les variations du PV et des QI, leur données manquantes ont été estimés à partir du Loess de degré de lissage de 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 **xxx** du logiciel statistique R® (<http://www.R-project.org>). Les analyses de variance/covariance utilisées pour les modèles **PVglm<sub>x</sub>** 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, **PVmlm<sub>x</sub>** ont été réalisés à l'aide du package *lme4* [3].

**Tableau 06: AIC et RMSE des modèles de PV étudiés**

Modèles étudiés	AIC	RMSE
PVmlg1	68 179	23,3
PVmlg2	68 181	23,3
PVmlg3	68 101	23,1
DPVmlg1	67 894	22,8
DPVmlg2	67 886	22,8
DPVmlg3	67 725	22,6
PVmlm1	59 048	11,73
PVmlm2	59 049	11,73
PVmlm3	58 934	11,64

$PVmlg1 = PV \sim BEC_{positif} + BEC_{négatif} + PV0 + (QIt-3 + QIt-2 + QIt-1) / PV0$  ;  $PVmlg2 = PV \text{ glm } 1 + \text{Parité}$  et  $PVmlg3 = PVmlg2 + \text{interactions}^*$   
 $DPVmlg1 = PV - PV0 \sim BEC_{positif} + BEC_{négatif} + (QIt-3 + QIt-2 + QIt-1 - 3QI0) / PV0$  ;  $DPVmlg2 = DPVmlg1 + \text{Parité}$  et  $DPVmlg3 = DPVmlg2 + \text{interactions}^{**}$

$PVmlm1 = PV \text{ glm } 1 + JAV$  et VL en variable aléatoire ;  $PVmlm2 = PVmlm1 + \text{Parité}$  et  $PVmlm3 = PVmlm2 + \text{interactions}^{**}$

$\text{Interactions}^* = \text{Parité} \times BE \text{ cumulé positif} + \text{Parité} \times \text{encombrement à t-1}$

$\text{Interactions}^{**} = \text{Interactions}^* + \text{Parité} \times \text{variation d'encombrement à t-2}$

**Tableau 07 : Coefficients des variables explicatives des modèles du poids vif et de variations de poids vif par le modèle linéaire généralisé (PVmlg 1 et DPVmlg 1) et par le modèle mixte de poids vif (PVmlm 1)**

Variables	Modèle PV glm 1	Modèle DPVmlg1	Modèle PVmlm1
Intercept (constante)	-27,3 (***)	-10,9 (***)	-20,9 ( )
PV0 (kg)	0,943 (***)	/	0,974 (***)
BECneg (UFL)	0,093 (***)	0,144 (***)	0,214 (***)
BECpos (UFL)	0,434 (***)	0,451 (***)	0,116 (***)
Encombrement t-1 (variation de l'encombrement pour DPVmlg1) (kgMS)	902 (***)	728 (***)	731 (***)
Encombrement t-2 (variation de l'encombrement pour DPVmlg1) (kgMS)	693 (***)	614 (***)	614 (***)
Encombrement t-3 (variation de l'encombrement pour DPVmlg1) (kgMS)	386 (***)	444 (***)	462 (***)

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

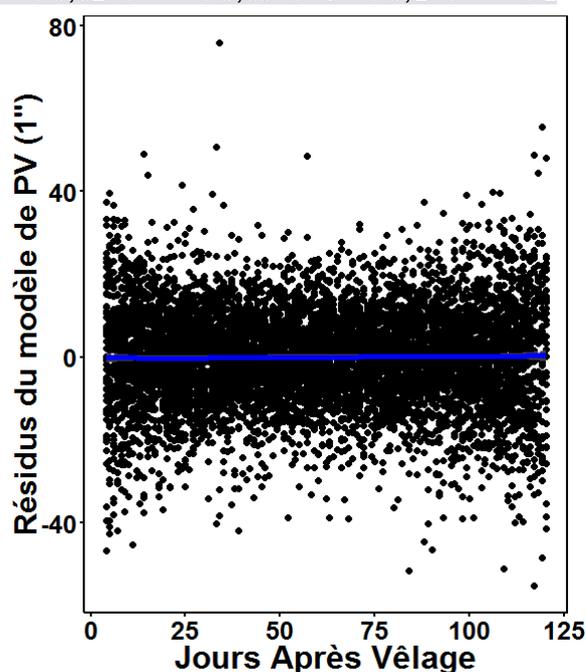
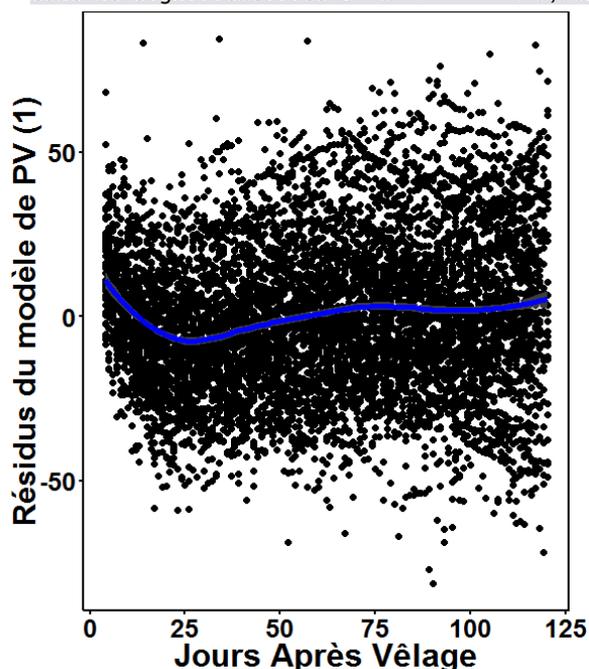


Figure 09 : Résidus des modèles de poids vif PVglm 1 à gauche et PVmlm1 à droite, en fonction des jours après le vêlage pour les 65 vaches. Le trait bleu représente le Loess avec un degré de lissage de 0,5.

La variable temps, ici « jours après le vêlage » (JAV) est une variable aléatoire. Ensuite ces analyses permettent aussi de mettre la variable de l'individu (ici « VL » pour l'effet vache) en variable aléatoire. Ceci permet de généraliser nos modèles et de le valider à plus grande échelle sur des vaches en dehors de l'expérimentation. Pour déterminer le meilleur modèle mixte, l'AIC (Akaike Information Criterion) est utilisé. Le modèle avec le plus petit AIC est conservé, c'est celui qui minimise la perte d'informations par rapport aux données réelles. Il est à noter que l'AIC augmente naturellement 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) Un modèle du poids vif permettant de bien estimer ses composantes

#### *a) Choix du modèle mixte pour mieux estimer les composantes du poids vif*

Les modèles étudiés ont une qualité de prédiction plutôt bonne puisque les RMSE sont autour de 23 kg pour les modèles fixes et autour de 12 kg pour les modèles mixtes sachant que l'écart type du PV lui-même est de 71 kg (**Tableau 06**). Le modèle mixte améliore la qualité de prédiction du PV, puisque le RMSE est presque divisé par 2. Mais lorsque l'on passe au modèle mixte, les coefficients des variables, sauf pour le PV0, changent. De manière générale, dans le modèle mixte, les coefficients de la composante « contenus digestifs » tendent à diminuer et le coefficient du BEC positif diminue alors que celui du BEC négatif augmente et devient supérieur à celui du BEC positif (**Tableau 07**). L'introduction des variables aléatoires améliore la prédiction et ceci ne se fait pas au détriment des autres variables à effet fixe puisqu'elles restent significatives (**Tableau 07**). De plus, lorsque l'on étudie les résidus des modèles sans les variables aléatoires, on obtient des résidus dont les moyennes varient au cours du temps. Lorsque l'on passe à un modèle mixte, ces variations, comme prévu, n'existent plus en moyenne (**Figure 09**).

Parmi les modèles mixtes, l'ajout du facteur de la parité et des interactions de ce-dernier avec les autres variables n'améliore pratiquement pas le modèle compte tenu du nombre de variables ajoutées. Les coefficients de la variable de la parité et les interactions sont en **ANNEXE IV**. En effet, les AIC des modèles ne diminuent que très peu entre les modèles PVmlm1, PVmlm2 et PVmlm3. Il en va de même pour les modèles sans variables aléatoires (**Tableau 06**). De ce fait, dans une optique de simplification, le modèle PVmlm1 a été utilisé pour la prédiction du PV et de ses composantes.

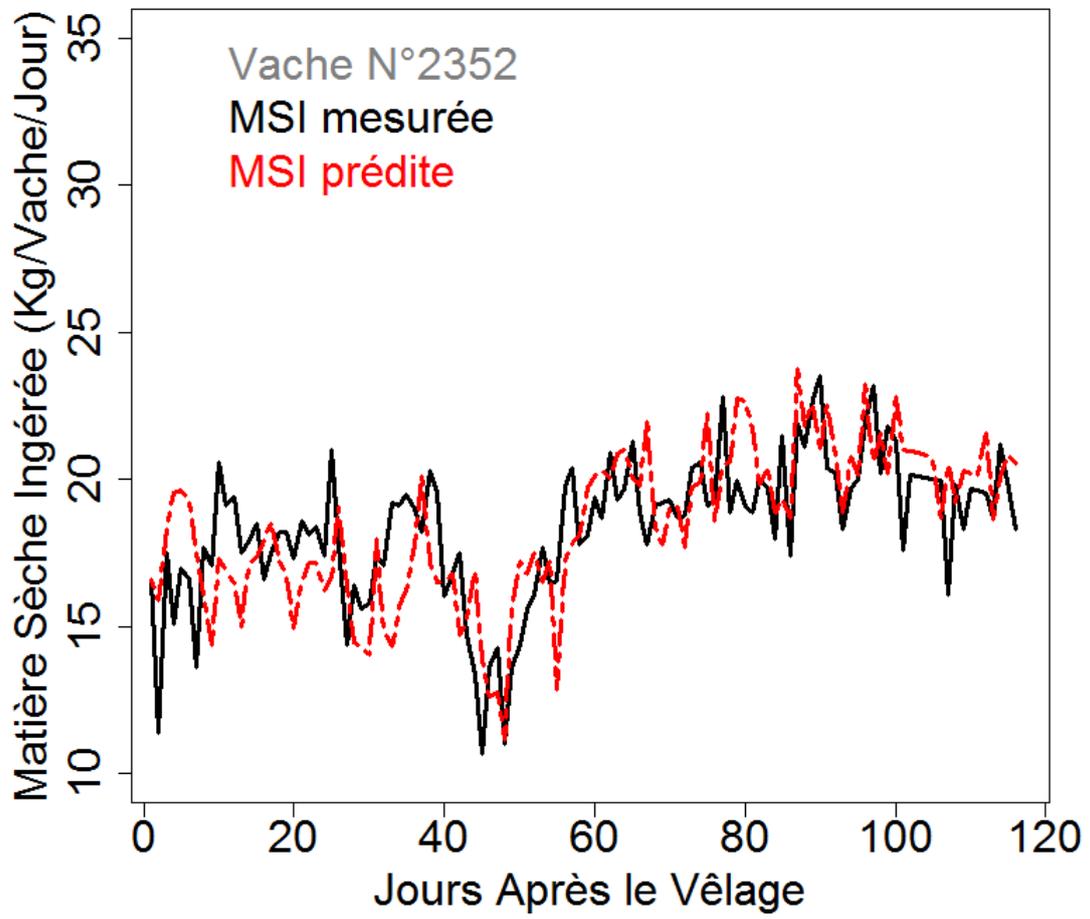


Figure 10 : Matières sèches ingérées (MSI) mesurées (noir) et estimées (rouge) de la vache N° 2352 au cours des 120 premiers jours de lactation.

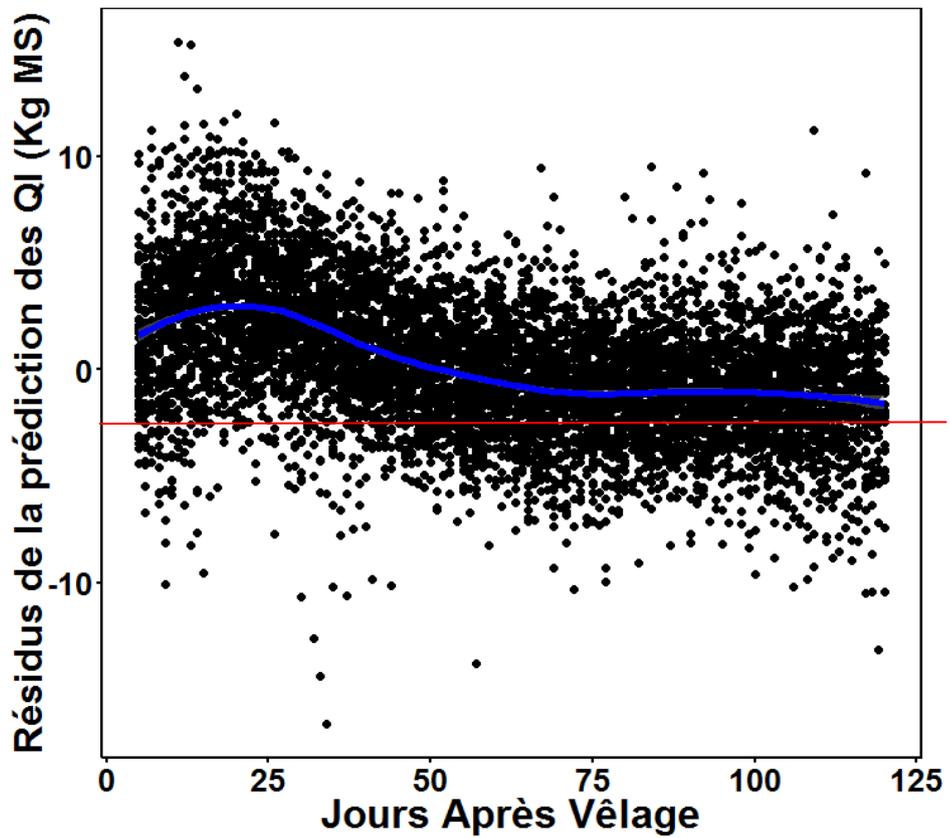


Figure 11 : Résidus de la prédiction des QI en fonction du temps pour les 65 vaches. Le trait bleu correspond à la moyenne lissée avec un Loess( degré de lissage de 0,5)

### *b) 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 07**). Le coefficient du BEC négatif est plus grand en valeur absolue que celui du BEC positif. Ceci signifie que pour une même variation de bilan énergétique, la variation de PV sera plus importante avec le BEC négatif qu'avec le BEC positif. En d'autres termes, 1 kg de PV mobilisé correspondrait à moins d'UFL dans le bilan énergétique que ne nécessiterait la reconstitution d'1 kg de PV.

### *c) Les quantités ingérées des 3 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 07**). L'impact des QI sur le PV diminue d'autant qu'on s'éloigne du jour t où le PV a été mesuré. Le coefficient pour l'encombrement à t-1 est le plus élevé, suivi du coefficient de l'encombrement à t-2 et pour finir, le plus faible coefficient est celui de l'encombrement à t-3. Une augmentation d'1 kg MS/kg de PV0 de l'encombrement à t-1 entraîne une augmentation de 731 kg du PV, pour une augmentation d'1 kg MS/kg de PV0 de l'encombrement à t-2 le PV augmente de 614 kg et pour l'encombrement à t-3, le PV augmente de seulement 462 kg (**Tableau 07**).

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

Le modèle des QI montre une bonne qualité de prédiction en tendance avec une erreur plus importante sur les données journalières. La comparaison entre les valeurs prédites grâce au modèle du PV (4) et les valeurs de QI mesurées présente un RMSE plutôt faible de 3,31 kgMS sachant que l'écart type des QI est de 3,85 kgMS. Cette bonne estimation des QI peut se voir à travers de l'exemple de la vache N°2352 (**Figure 10**).

L'étude des résidus nous informe toutefois d'une sous-estimation des QI en début de lactation, entre le 4<sup>ème</sup> et le 40<sup>ème</sup> jour de lactation (**Figure 11**). Cet effet présent en début de lactation pour la majorité des vaches reste présent lorsque l'on utilise un modèle mixte avec le temps et l'effet vache en variable aléatoire.

Avec une régression simple entre les QI mesurées et estimées, on obtient une relation entre ces deux variables qui est :

$$QI \text{ mesurées} = 8,81 + 0,57 \times QI \text{ estimées}$$

Cette relation obtient un RMSE de 2,43 kgMS et montre une erreur liée à la pente qui est inférieure à 1.

**Tableau 08 : Coefficients des variables explicatives du modèle du RFI**

Variables explicatives	Coefficients	Pvalue
Intercept (constante)	127,5	<10 <sup>-16</sup> (***)
Matière grasse (g)	2,579*10 <sup>-3</sup>	<10 <sup>-16</sup> (***)
Matière protéique (g)	1,068*10 <sup>-2</sup>	<10 <sup>-16</sup> (***)
Quantité de lait (kg)	-1,292*10 <sup>-2</sup>	0,0896 (.)
PVV (kg)	-1,003	<10 <sup>-16</sup> (***)
PVVfinal-PVVmin (kg)	1,918	<10 <sup>-16</sup> (***)
PVVfinal-PVVinitial (kg)	-1,024	<10 <sup>-16</sup> (***)

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

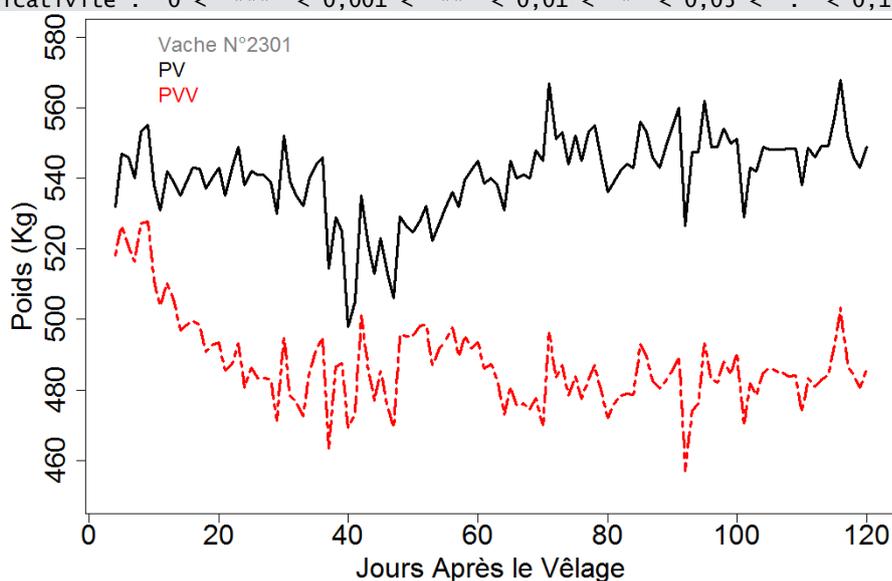


Figure 12 : PV (noir) et PVV (rouge) de la vache N°2301 au cours de la lactation. Le PVV est égal au PV moins les contenus digestifs estimé à partir du modèle mixte du PV PVmlm1

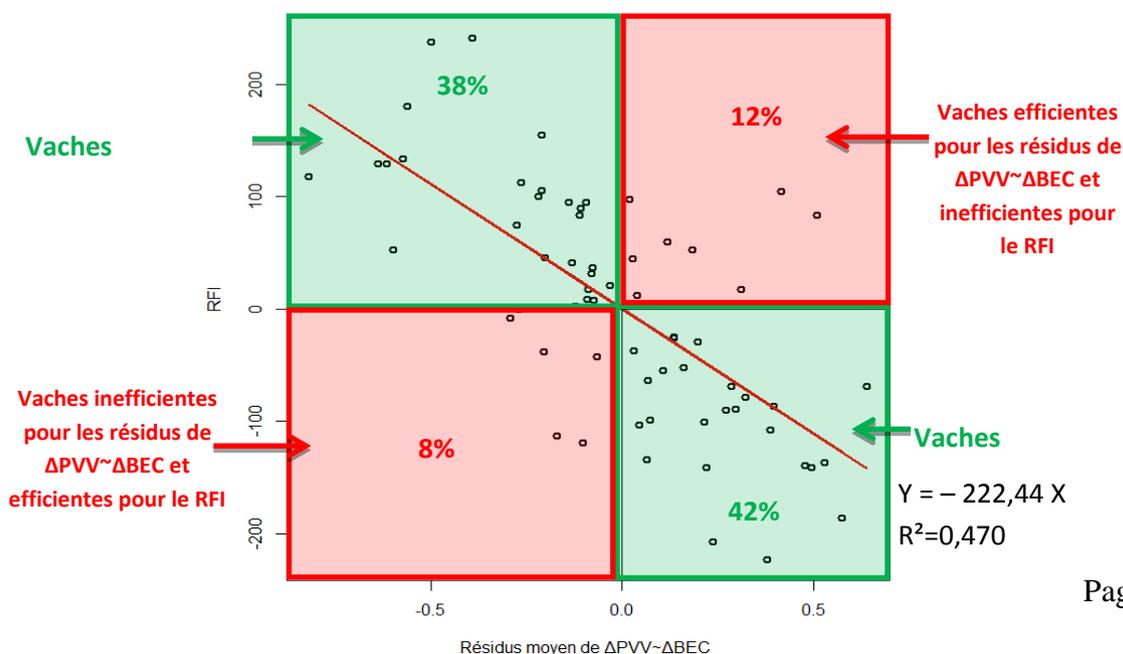


Figure 13 : RFI en fonction des résidus moyen de  $\Delta PVV \sim \Delta BEC$  des 65 vaches. Les zones vertes représentent les zones de concordances entre les indicateurs d'efficacité. En rouge les zones de discordances.

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

#### a) Le RFI : un modèle de l'efficacité cohérent

Le modèle du RFI présente une bonne prédiction de la somme des QI sur la lactation puisque le RMSE est de 104,2 kg MS (l'écart type de la somme des QI est de 315 kg MS). Le  $R^2$  de la régression multiple est de 0,89. Les coefficients du modèle du RFI sont résumés dans le **Tableau 08**. 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 suffit à représenter la production laitière, le volume de lait n'apportant 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 minimal et le PVV final a un coefficient positif et un effet très positif sur l'ingestion, ce qui signifie que plus la vache perd et reconstitue ses réserves corporelles au cours de la lactation, plus les QI seront élevées. Ceci est compatible avec le fait que le coût énergétique est plus important pour une vache qui utilise puis reconstitue ses réserves corporelles que pour une vache qui a des réserves corporelles constantes. Par contre le coefficient de variation des réserves entre la fin et le début de la période est négatif alors qu'on attendrait un effet plutôt positif. Un gain de PV plus grand sur une lactation supposerait une augmentation des QI. Une possible colinéarité entre cette variable et les autres pourrait expliquer ce phénomène.

#### b) L'efficacité énergétique est significativement corrélée aux résidus du modèle $\Delta PVV \sim \Delta BEC$

Dans cette partie, le RFI et les résidus du modèle  $\Delta PVV \sim \Delta BEC$  sont comparés.

L'obtention du PVV se fait à l'aide du modèle PVmlm1. L'observation des PVV obtenus montre bien que les variations de PVV ne sont pas que des variations de PV et que les variations des contenus digestifs prennent une place importante dans le calcul du PVV. En prenant un exemple de PVV obtenu on observe que les variations de PVV ne sont pas identiques à celles du PV (**Figure13**). Les cinétiques diffèrent principalement entre le jour 10 et le jour 40 de lactation lorsque les QI augmentent beaucoup. De ce fait l'écart entre le PVV et le PV n'est pas constant au cours de la lactation et varie selon la valeur des QI.

Le RFI et la moyenne des résidus du modèle  $\Delta PVV \sim \Delta BEC$  donne à 80% (52 vaches sur 65) les mêmes conclusions à propos de l'efficience des vaches (ANNEXE V). Pour les vaches extrêmes, efficaces ou inefficaces, les deux techniques sont en accord (Figure 13). On obtient bien une relation inversement proportionnelle (pente négative) entre les résidus du

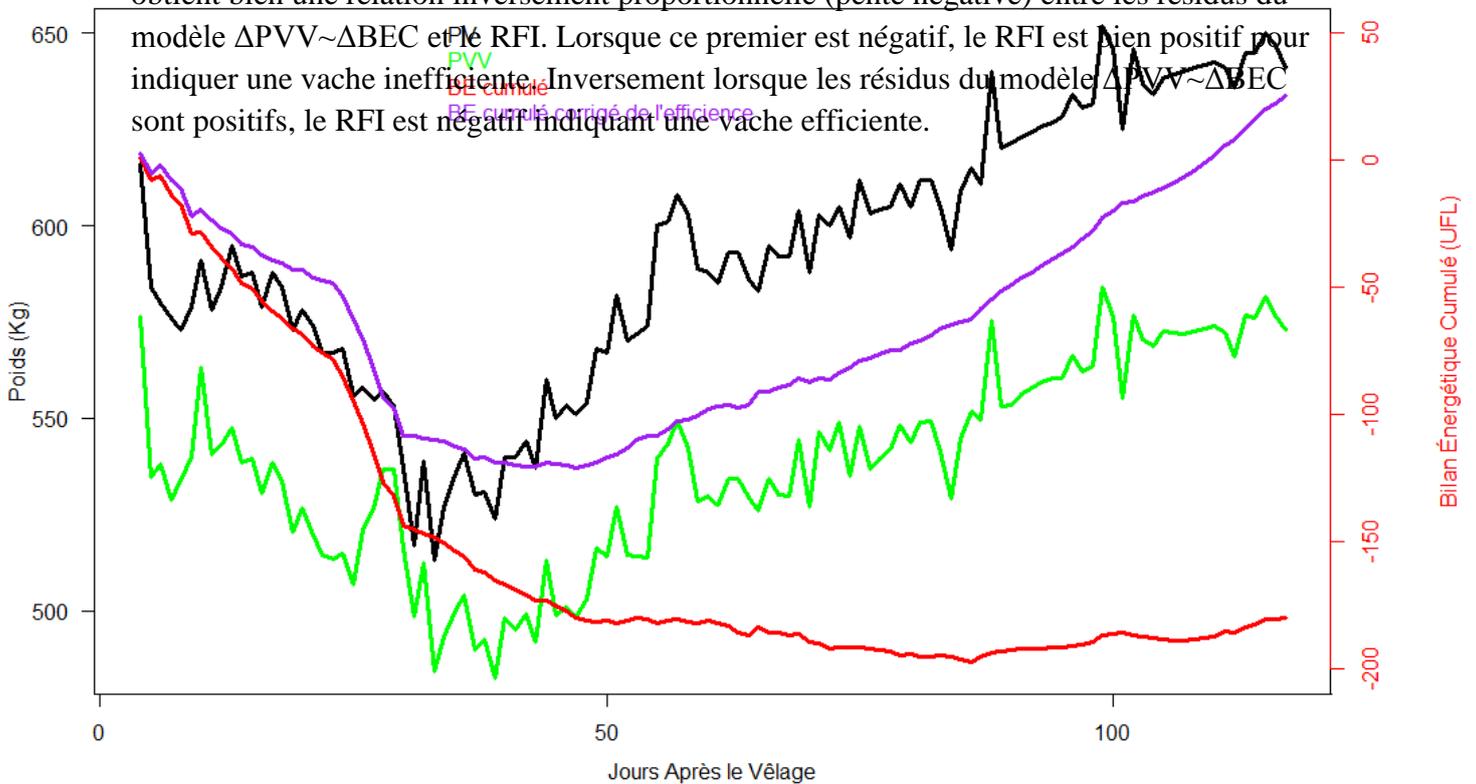


Figure 14 : Poids vif, poids vif vide, bilan énergétique cumulé et bilan énergétique cumulé corrigé de l'efficience, de la vache N° 1412 (Multipare) au cours des 120 premiers jours de sa lactation.

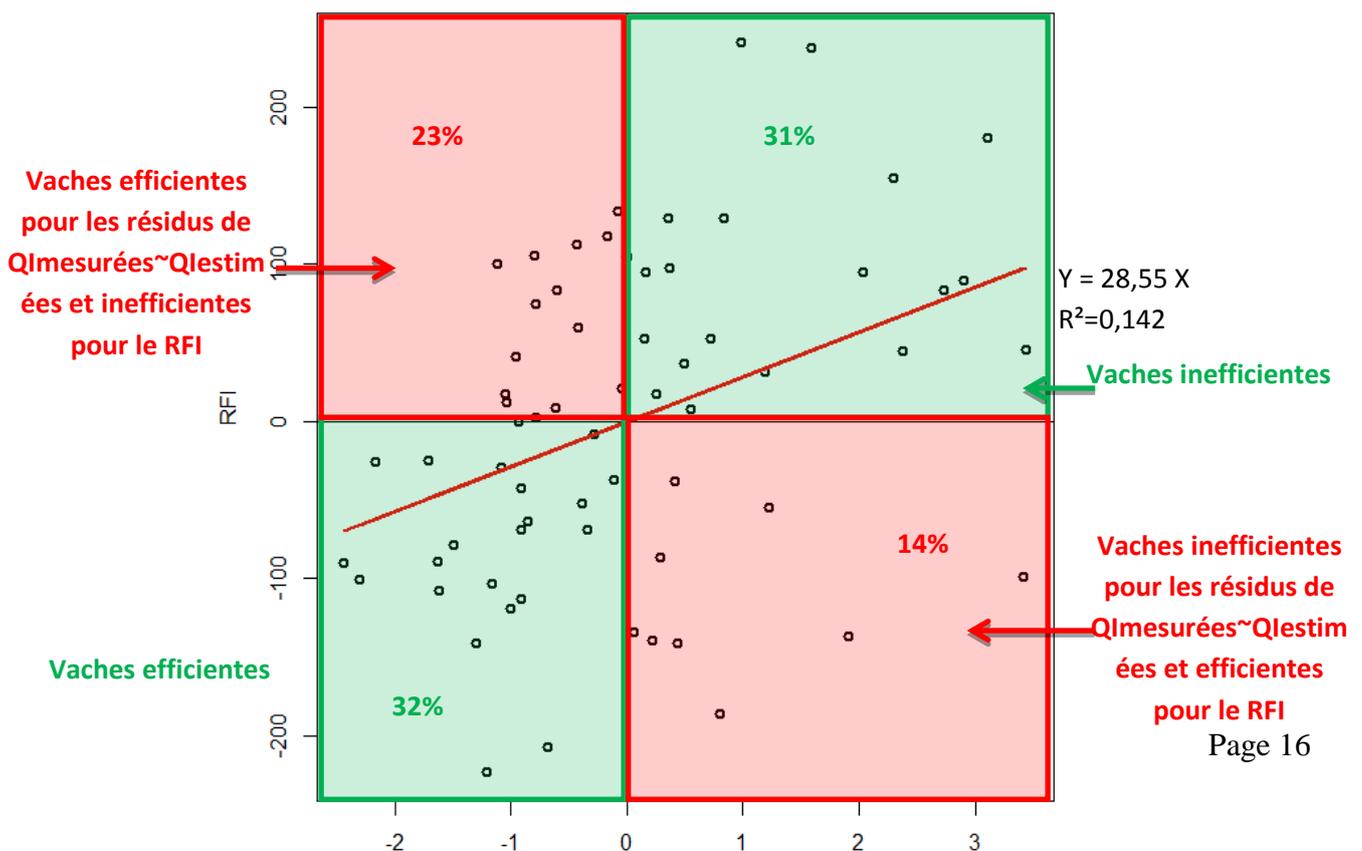




Figure 15 : RFI en fonction des résidus moyen de  $Q_{\text{mesurées}} \sim Q_{\text{estimées}}$  des 65 vaches. Les zones vertes représentent les zones de concordances entre les indicateurs d'efficacité. En rouge les zones de discordances.

Les résidus du modèle  $\Delta PVV \sim \Delta BEC$  permettent bien d'approcher l'efficacité énergétique d'une vache à l'image du RFI. Les résidus ainsi trouvés semblent venir du fait que les vaches seraient plus ou moins efficaces que prévu du point de vue énergétique. Ceci peut expliquer les discordances observables entre la cinétique du PVV et celle du BEC qui tous deux représentent l'état des réserves corporelles mais ne concluent pas de la même manière quant à ses variations. La **Figure 14** montre l'exemple d'une vache efficace : le PV et PVV de la vache augmente alors que le BEC n'augmente pas ou du moins pas autant.

### *c) L'efficacité énergétique significativement reliée aux résidus du modèle $Q_{\text{mesurées}} \sim Q_{\text{estimées}}$*

De la même manière, le RFI est comparé aux résidus moyen du modèle  $Q_{\text{mesurées}} \sim Q_{\text{estimées}}$  par vaches. Ces deux indicateurs offrent une concordance de 63% (41 vaches sur 65) sur les conclusions de l'efficacité des vaches (**ANNEXE V**). Excepté quelques rares cas, les vaches extrêmes en termes d'inefficacité et d'efficacité sont bien repérées par les deux techniques (**Figure 14**). Il existe une corrélation significative entre les résidus du modèle des QI et l'efficacité énergétique. La relation est bien avec une pente positive cette fois-ci puisque le RFI et les résidus du modèle  $Q_{\text{mesurées}} \sim Q_{\text{estimées}}$  signifient la même chose. Toutefois cette corrélation reste faible ( $R^2=0,14$ ).

## Discussion

---

- 1) Des valeurs pour la conversion des encombrements en poids des contenus digestifs robustes et cohérentes

Le poids des contenus digestifs à un temps  $t$  doit prendre en compte les QI des trois derniers jours. Le temps de séjour des aliments dans les différentes parties de l'appareil digestif étant supérieur à 1 jour (Mambrini 1990), les QI présentent un effet de rémanence sur le poids puisque même quelques jours après leurs ingestions, les aliments continuent de peser dans le poids des contenus digestifs. Au-delà des estimations de contenus digestif à partir d'un pourcentage du PV (Beranger et Robelin 1978 ; Friggens *et al.* 2011 ; **Tableau 09**), des estimations à partir des QI ont déjà été utilisées (Piton 1975 ; Rémond 1988 ; Martin et Sauvant 2003 ; **Tableau 09**).

Toutefois, ces estimations n'ont été faites que sur les QI d'un seul jour.

**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
$(1 - \frac{0,20}{1,25 - 0,12 \times NEC}) \times PV$	(Friggens <i>et al.</i> 2011)
$0,145 \times PV$	(Beranger et Robelin 1978)
$\frac{34,6 + 8,13 \times NDFI - 0,65 \times t}{0,696}$	(Martin et Sauvant 2003)
$(3 + \frac{3}{4}) \times MSI = 3,75 \times MSI$	(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 multiplié par les quantités de matière sèche ingérées.  $t$  est le temps écoulé depuis le dernier repas. MSI est la quantité de matière sèche ingérée par la vache.

**Tableau 10 : Méthodes de prédiction du poids des contenus digestifs de bovins laitiers ainsi issues de notre étude.**

Estimation du poids des contenus digestifs	Avec une vache moyenne de PV=600 kg et QI0=13 kgMS	Modèles
$(902 + 693 + 386) \times \frac{MSI \text{ des 3 derniers jours}}{PV0}$	$3,30 \times MSI \text{ des 3 derniers jours}$	PVglm
$(728 + 614 + 444) \times \frac{\Delta MSI \text{ des 3 derniers jours}}{PV0}$	$2,98 \times \Delta MSI \text{ des 3 derniers jours}$	DPVglm
$(731 + 614 + 462) \times \frac{MSI \text{ des 3 derniers jours}}{PV0}$	$3,01 \times MSI \text{ des 3 derniers jours}$	PVmlm

Avec  $\Delta MSI \text{ des 3 derniers jours} = MSI \text{ des 3 derniers jours} - 3 \times QI0$

Les coefficients obtenus dans le cadre de notre étude restent du même ordre de grandeur quel que soit le modèle utilisé (**Tableau 10**). Ils restent aussi proches de ceux utilisés et obtenus dans la littérature. Les **Tableau 09 et 10** recensent les coefficients de la littérature et ceux obtenus à travers cette étude. Les coefficients de notre étude sont plus faibles que ceux utilisés dans la littérature lorsque l'on somme nos trois coefficients. Notre méthode ne permet peut être que d'estimer les contenus digestif du réticulo-rumen et non les contenus digestifs en entier, dans ce cas-là on retrouve la même valeur que Rémond (1988), à savoir 3 kg de poids du contenus réticulo-rumen par kg de MSI.

Les différences entre les valeurs des coefficients entre les différents auteurs peuvent aussi provenir de l'effet de la ration. La digestibilité et le temps de séjour des aliments jouent un rôle important dans le poids des contenus digestifs. C'est pourquoi Martin et Sauvant (2003) ont introduit la notion de NDFI (NDF ingéré par kg MS) de la ration dans le calcul du poids des contenus digestif. On peut naturellement se demander si nos modèles resteraient fiables avec des rations différentes ou s'il serait nécessaire de réévaluer les coefficients.

Enfin, une autre approche de l'encombrement pourrait améliorer l'estimation du poids des contenus digestifs : celle d'une relation quadratique des QI. C'est une question qui a été abordé par Martin et Sauvant (2003) mais pas vraiment résolue. Dans le cas de notre étude, l'utilisation des QI<sup>2</sup> en plus des QI ne donnaient pas de résultats suffisamment probants pour retenir l'utilisation d'une équation quadratique.

## 2) Une estimation des réserves corporelles par le poids vif encourageant mais encore fragile

Au niveau individuel, l'estimation des réserves corporelles à partir du PVV semble plus fiable que l'utilisation des bilans énergétiques alimentaires. En effet, on a pu observer une différence entre les cinétiques du PVV et du BEC (**Figure 14**) qui pouvait s'expliquer par des efficacités différentes selon les vaches. Lorsque l'on applique un coefficient d'efficience pour corriger cela, on obtient un BEC corrigé qui est plus en phase avec la cinétique du PVV et donc des réserves corporelles (**Figure 14**). Ce coefficient a été calculé comme étant :

$$\text{Coefficient d'efficience} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{MSI}_i - \text{RFI}}{\sum_{i=1}^N \text{MSI}_i}$$

*Avec N qui est le nombre total de jours de lactation.*

On multiplie les apports énergétiques du BE par ce coefficient et on obtient un BE corrigé de l'efficience.

Cette notion, d'efficience qui biaise l'utilisation du BE au niveau individuel est une limite de son utilisation dans notre modèle. Toutefois, la prise en compte de l'efficience n'est pas aussi simple. L'utilisation du coefficient d'efficience n'améliore pas beaucoup le modèle du PV.



En effet certaines vaches obtiennent un BE corrigé correctement comme la vache de la **Figure 14**, mais d'autres voient leurs BE se dégrader avec ce coefficient. Bien que difficile, la piste de la prise en compte de l'efficience dans les modèles reste intéressante.

Malgré cette limite de l'efficience, les coefficients obtenus par le modèle PVmlm sont cohérents avec la littérature. On obtient un gain de poids de 0,15 kg/UFL quand le bilan énergétique est positif et une perte de 0,20 kg/UFL quand le bilan énergétique est négatif. Selon Chilliard *et al.* (1987), quand le bilan énergétique est positif on a un gain de 0,22 kg/UFL et quand il est négatif, une perte de 0,28 kg/UFL. 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. Même si les valeurs diffèrent, l'écart entre le gain et la perte reste du même ordre de grandeur. Il est à noter toutefois que ces coefficients varient beaucoup selon les auteurs et les conditions d'estimations (Chilliard *et al.* 1987). On l'observe aussi dans notre étude, le passage d'un modèle de régression multiple ou d'analyse de covariance à un modèle mixte change complètement les coefficients (**Tableau 07**). Les imprécisions des coefficients peuvent aussi venir de l'impossibilité de quantifier la proportion de masse maigre ou masse grasse déposée et utilisée par la vache. Le rendement énergétique d'une protéine et d'un lipide est différent : 9,37Kcal/g de lipides et 5,48Kcal/g de protéines. S'ajoute à cela les possibles substitutions des lipides en protéines et eau (et inversement)(Moe *et al.* 1971). Cette volatilité des coefficients du BE insiste une nouvelle fois sur la fragilité de son utilisation. L'utilisation de la NEC pourrait alors se révéler plus intéressante, si sa précision devient suffisante.

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. Mais les primipares et quelques multipares n'ont pas fini leur croissance et déposent plus de masse maigre que les vaches adultes (Agabriel *et al.* 2010). Le rendement énergétique d'une protéine et d'un lipide n'est pas le même comme vu précédemment. Avec un dépôt plus important de protéines pour les vaches en croissance, on peut avoir une vache qui gagne du poids tout en ayant un BE négatif. On retrouve cela dans les coefficients des modèles, les interactions entre la parité et les BEC positif et négatif se révèlent positives pour les primipares (**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 moins importante de 0,02 kg/UFL (**ANNEXE IV**). La prise en compte de ce paramètre est compliquée. Le gain de poids associé à la croissance est lié au temps (l'âge de la vache). Une variable temps ne peut être introduit dans notre modèle pour conserver la significativité des autres variables explicatives. A défaut d'avoir une variable qui permettrait d'estimer la part du PV lié à la croissance, on retire les besoins de croissance dans le calcul du BE. Le BE représente alors la mobilisation/reconstitution des réserves corporelles ainsi que l'énergie utilisée pour la croissance. Cette approximation au niveau du BE permet d'éviter que la part du PV lié à la croissance ne soit pas expliquée et se retrouve dans les résidus du modèle. Dans l'attente de trouver une variable pouvant expliquer la part du PV lié à la croissance de l'animal, cette méthode permet d'avoir un modèle plus performant.

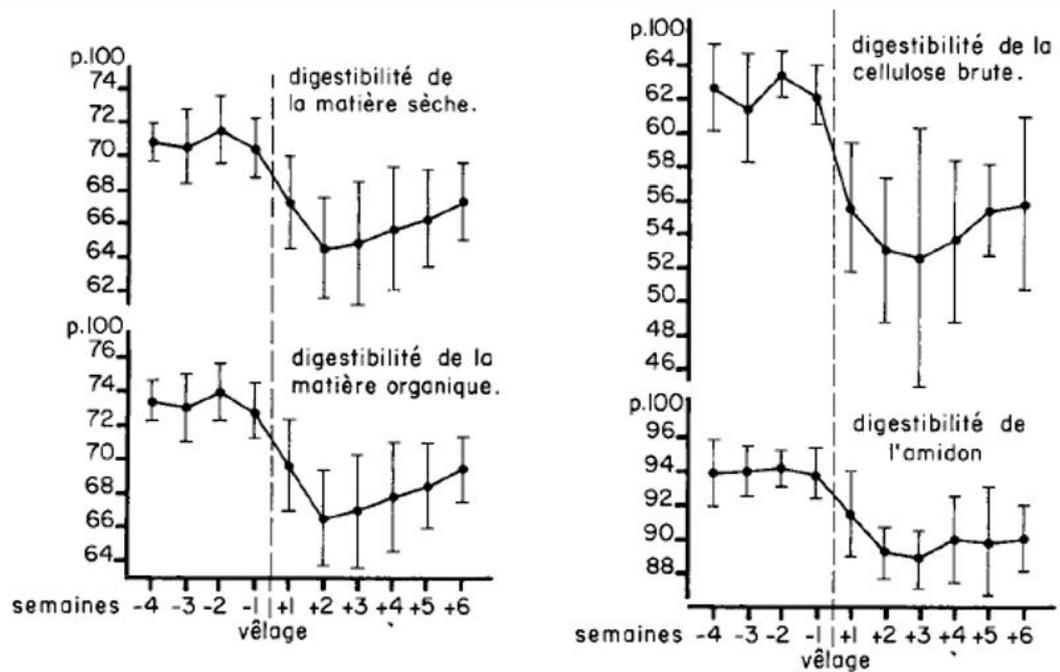
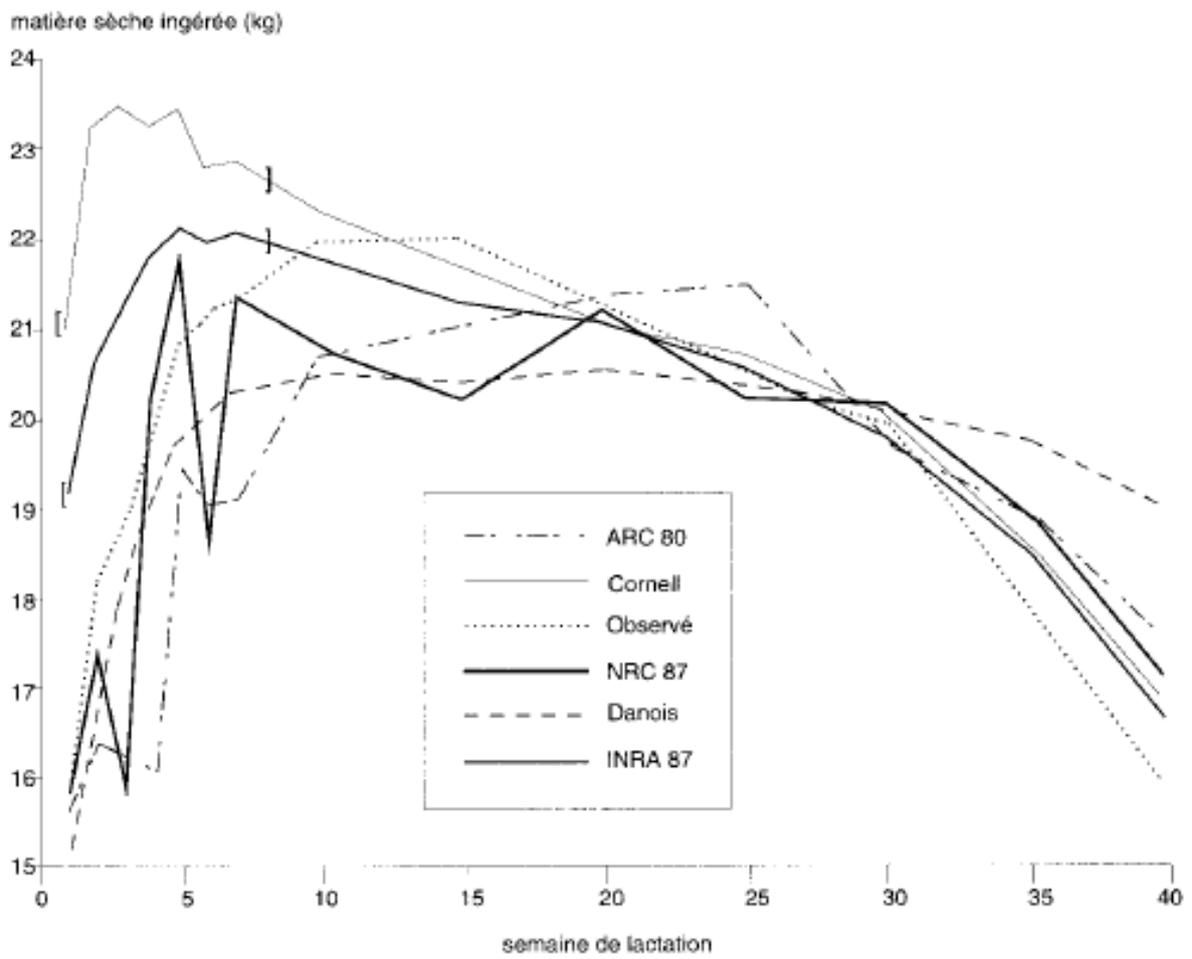


Figure 16 : Prédiction des quantités ingérées selon différents modèles et des quantités ingérées mesurées en fonction du stade de lactation pour une ration à 70% ensilage de maïs et 30% de concentrés (Faverdin *et al.* 2006)

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

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

Les modèles PVglm et DPVglm présentent des résidus fonction du temps (**Figure 09**). Le passage au modèle mixte PVmlm permet seulement de limiter se biais en moyenne. Il ne permet pas d'en expliquer l'origine ni d'en corriger le problème de début de lactation : On observe sur les résidus du modèle PVmlm1 des résidus en forme de cônes en début et fin de lactation (**Figure 09**). On retrouve ce souci du début de lactation dans le modèle des QI de manière plus marquée. En effet on observe sur les résidus, qu'en début de lactation les QI sont sous-estimés dans la majorité des cas (**Figure 11**). Ce passage délicat de la lactation dans la prédiction des QI a déjà été soulevé par Faverdin *et al.* (2006) où la plupart des modèles de prédictions peinent à estimer correctement les QI comparé au reste de la lactation (**Figure 16**).

Plusieurs hypothèses à vérifier peuvent aider à comprendre ce phénomène. L'utilisation d'un modèle quadratique au lieu d'un modèle linéaire pour les encombrements est une possibilité puisque l'on sait qu'en début de lactation, les quantités ingérées augmentent rapidement (Moe *et al.* 1971; Doreau et Rémond 1982 ; Faverdin *et al.* 2006). Ceci élevé au carré donne une valeur plus grande que les QI. Les coefficients des encombrements seraient moins grands et la sous-estimation des QI en début de lactation pourrait être corrigée. En effet dans le modèle des QI, on divise par le coefficient des QI, donc si celui-ci diminue (en restant supérieur à 1), la valeur des QI prédite sera plus élevée.

Toujours en lien avec les QI, la notion de digestibilité peut entrer en jeu. En effet, Doreau et Rémond (1982) ainsi que Doreau *et al.* (1988) montrent que la digestibilité des aliments diminue pour les vaches en début de lactation (**Figure 17**). La digestibilité diminue jusqu'à la semaine 4 après le vêlage, soit une vingtaine de jours, là où la moyenne de nos résidus du modèle des QI sont au maximum. La digestibilité redevient la même qu'avant le vêlage seulement après la semaine 6 après le vêlage, soit une quarantaine de jours, moment où la moyenne de nos résidus du modèle des QI redescendent autour de 0 (**Figure 11**). Une surestimation de la valorisation énergétique des QI serait alors faite en début de lactation. Celle-ci deviendrait une sous-estimation des QI lorsqu'on souhaite les estimer à partir de l'énergie absorbée par la vache. Un coefficient de digestibilité peut être introduit dans le calcul du BE à l'image du coefficient d'efficacité développé précédemment.

### 4) Vers une gestion du troupeau et une alimentation de précision pilotées par le poids vif

Le PV permet d'avoir accès aux réserves corporelles grâce au PVV. Cette information offre de nombreuses possibilités de gestion des troupeaux pour les éleveurs. En effet cela offre des indicateurs sur la santé et le bien-être animal avec la détection de problèmes et troubles de santé (Maltz 1997).

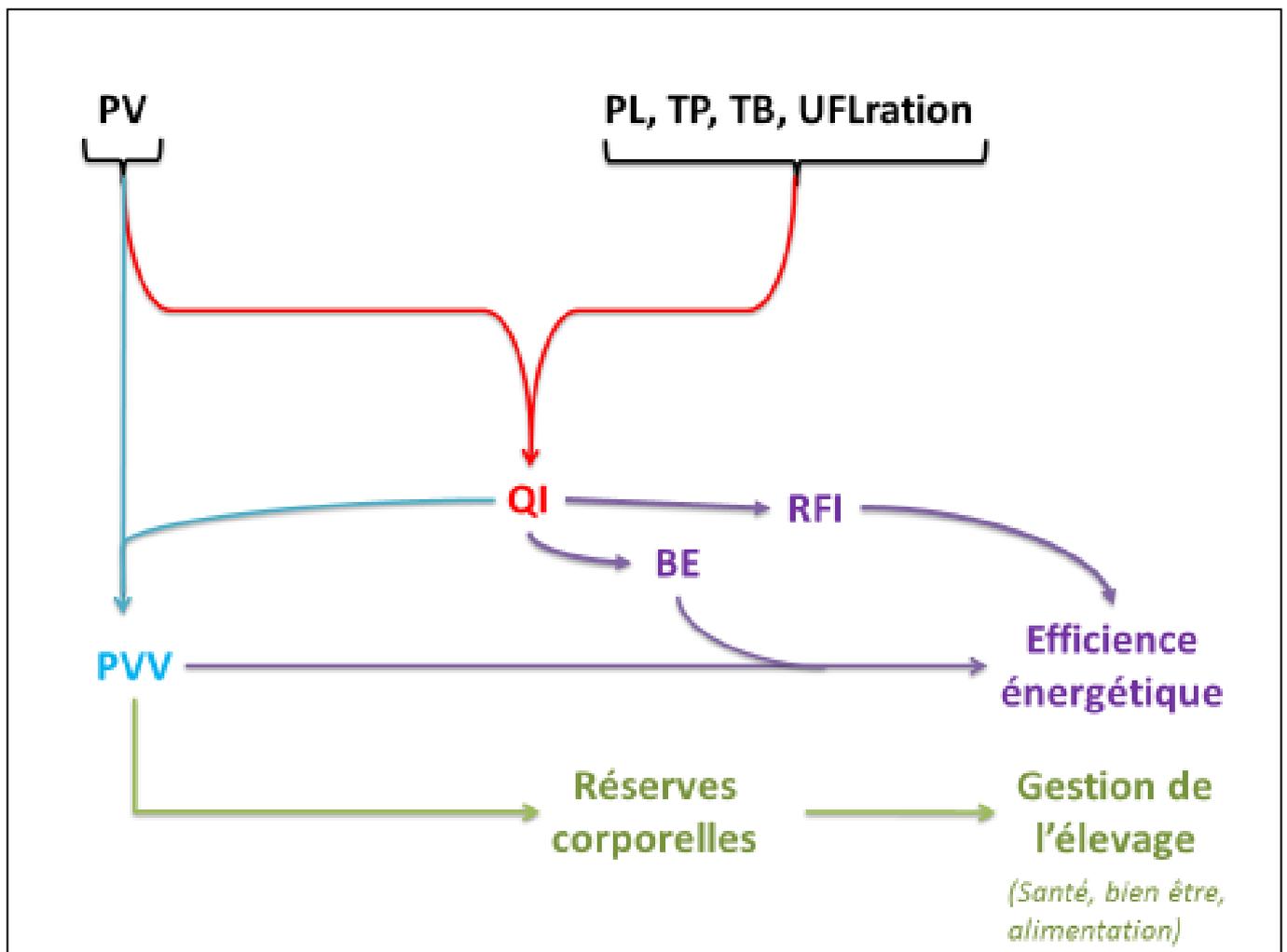


Figure 18 : schéma bilan des valorisations possibles du monitoring du PV associé au monitoring de la production laitière, d'après les 6 mois de stage.

PV=poids vif, PL=production laitière, TP=taux protéique, TB=taux butyreux, QI=quantités ingérées, PVV=poids vif vide, BE=bilan énergétique, RFI=residual feed intake.

Des modèles existent déjà (exemple des robots Lely® ; [1]) mais ne se basent que sur les variations de PV et non de PVV, ce qui ne leur permet pas de détecter des problèmes sur le court terme et rapidement. Le PVV peut aussi servir pour l'alimentation de précision, et baser ainsi le pilotage selon la variation des réserves énergétiques au lieu de le baser sur les besoins (Maltz *et al.* 2013). On peut ainsi optimiser l'allocation des ressources des vaches laitières en prenant en compte les variations individuelles ainsi que leur capacité d'ingestion et pourquoi pas l'efficacité énergétique par la même occasion. La connexion entre des modèles de prédiction des variations de PVV, le monitoring de la production laitière et les systèmes de distribution d'aliments automatique permettrait une gestion automatisée et optimisée du troupeau et de l'économie de l'exploitation. Comme on peut le voir avec seulement la production laitière (André *et al.* 2010). Il reste toutefois à définir les règles de pilotage, à savoir quelles sont les conseils à prodiguer en fonction des valeurs obtenues par le monitoring associé du PV et de la production laitière. Au-delà de l'amélioration et de la vérification des modèles, il reste une limite à l'utilisation d'un tel processus dans une ferme commerciale : les données des QI utilisées dans les modèles. C'est pourquoi on trouve dans la littérature des PVV 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 déployables 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.

## Conclusion

---

L'objectif de cette étude était de trouver une meilleure estimation des réserves réelles à partir du PV. L'élaboration d'un modèle de PV pour estimer les différentes composantes qui le constituent pour ensuite calculer le PVV présente des résultats encourageants. Le calcul du poids des contenus digestifs à partir des QI des 3 jours qui précèdent la mesure du PV permet d'obtenir un PVV plus fin qu'à partir d'un pourcentage de PV.

L'estimation des QI à partir du PV et de la production laitière journalière se révèle être une piste très intéressante. 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 et permettre par la même occasion le calcul du PVV de manière plus fine que seulement avec le PV.

Toutefois, les modèles souffrent de limites encore non déterminées pour le début de la lactation et du problème de l'efficacité alimentaire qui est propre à chaque vache. L'efficacité alimentaire explique notamment pourquoi l'utilisation du PVV comme indicateur des réserves corporelles est plus fiable que l'utilisation du BE au niveau individuel. Ainsi des études plus approfondies de ces points pourraient améliorer grandement la qualité des modèles.

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 permettent d'entrevoir un bon avenir pour le monitoring du PV dans la

gestion des troupeaux et l'alimentation de précision pour les élevages bovins.



# 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., and 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., and 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., and 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., and 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., and 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., and Verité R. 1987. *Bulletin Technique Centre de Recherches Zootechniques et Veterinaires de Theix*. Vol. 70.
- Chilliard Y., Remond B., Sauvant D., and Vermorel M. 1983. *Particularités Du Métabolisme Énergétique*. Vol. 53. Bulletin Technique CRVZ Theix INRA.
- Chilliard Y., and 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., and 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., and 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., and 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., and 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., and 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., and Jensen J. 2007. "Breed and Parity Effects on Energy Balance Profiles Through Lactation: Evidence of Genetically Driven Body Energy Change." *Journal of Dairy Science* 90 (11): 5291–5305. doi:10.3168/jds.2007-0173.

- Friggens N. C., Ridder C., and Løvendahl P. 2007. "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., and 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.
- Hostiou N., Allain C., Chauvat S., Turlot A., Pineau C., and Fagon J. 2014a. "L'élevage de Précision : Quelles Conséquences Pour Le Travail Des Éleveurs ?," INRA Prod. Anim., 27(2) edition.
- 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., and Santos J.E.P. 2013. "Effect of Feeding according to Energy Balance on Performance, Nutrient Excretion, 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., and Sauvant D. 2003. "Modélisation Des Contenus Du Tractus Digestif Bovin."
- Moe P.W., Tyrrell H.F., and 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 Quelques Facteurs de Variation." Montpellier: Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Pryce J. E., Coffey M. P., and 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.* edition, sec. 28 (1).
- Roche J.R., Friggens N.C., Kay J.K., Fisher M.W., Stafford K.J., and 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., and 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., Koltz D. A., and 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., and 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., and 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.

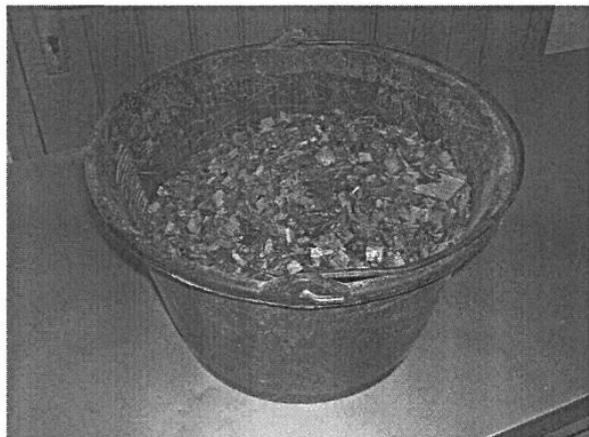
#### III. Prévention

Port de gants pour se protéger de la chaleur

Problèmes possibles: Contacter un technicien du secteur Physio

#### IV. Appareillages

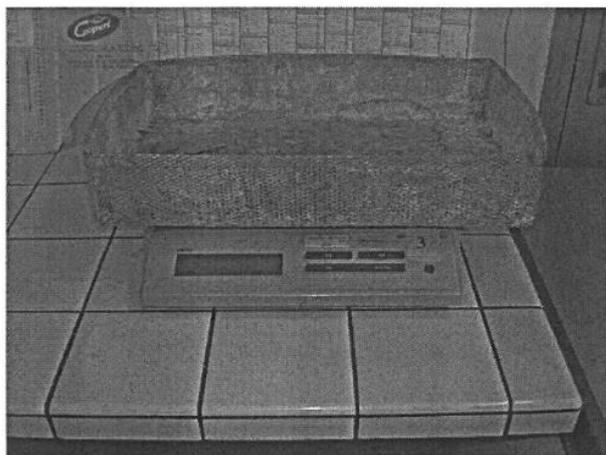
Seau pour collecter un échantillon représentatif du silo



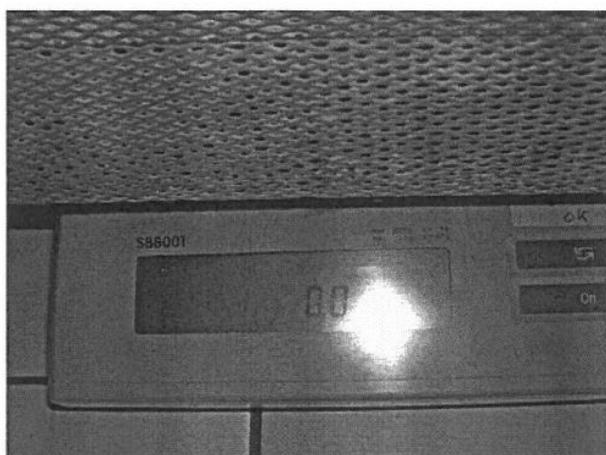
Panier à mailles perforées (60\30) ou barquette aluminium PF 1000  
Une étuve réglée à 80 °C

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

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><math>((b-a)/c)*100</math></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

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

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

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

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

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

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

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

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 PVglm3 , DPVglm3 et PVmlm3

Variables explicative	Coefficient PVglm3(significativité)	Coefficient DPVglm3(significativité)	Coefficient PVmlm3(significativité)
Intercept (constante)	-23,35 (***)	-10,65 (***)	-9,132 ( )
PV0	0,9376 (***)	/	0,9523 (***)
BEneg	0,08907 (***)	0,1450 (***)	0,2169 (***)
BEpos	0,4496 (***)	0,4601 (***)	0,1384 (***)
Encombrement t-1 (variation de l'encombrement pour DPVglm3)	892,7 (***)	726,3 (***)	748,7 (***)
Encombrement t-21 (variation de l'encombrement pour DPVglm3)	664,0 (***)	601,1 (***)	603,0 (***)
Encombrement t-31 (variation de l'encombrement pour DPVglm3)	367,2 (***)	439,1 (***)	460,72 (***)
Parité -primipare	12,46 (***)	1,836 (**)	4,826 ( )
Parité - multipare	-12,46 (***)	-1,836 (**)	-4,826 ( )
BECneg :Parité -primipare	-0,0002480 ( )	-0,0004389 ( )	0,02215 (***)
BECneg :Parité -multipare	0,0002480 ( )	0,0004389 ( )	-0,02215 (***)
BECpos :Parité -primipare	0,07388 (***)	0,08219 (***)	0,0560 (***)
BECpos :Parité -multipare	-0,07388 (***)	-0,08219 (***)	-0,0560 (***)
Encombrement t-1 : Parité - primipare	-226,4 ( * )	-182,9 ( * )	191,0 (***)
Encombrement t-1 : Parité - multipare	226,4 ( * )	182,9 ( * )	-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