

# Extension spatio-temporelle du modèle chèvre INRA 2018 : 2. L'évolution de la dynamique des réserves, du poids vif et de la NEC sur un cycle productif

Daniel SAUVANT<sup>1</sup>, Laurence PUILLET<sup>1</sup>, Bertrand BLUET<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UMR MoSAR INRA-AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France

<sup>2</sup>Institut de l'Élevage, CS 45002, 86550, Mignaloux-Beauvoir, France

Courriel : daniel.sauvant@agroparistech.fr

■ Comme pour les autres espèces de ruminants, le modèle INRA 2018 a permis de mettre à jour les principes de l'alimentation pour les chèvres. L'utilisation en pratique de ce nouveau modèle a nécessité aussi de préciser la dynamique des réserves énergétiques et des caractéristiques corporelles des chèvres au cours du cycle de production. Cet article vient compléter l'article de Sauvant *et al.* (2021) sur l'application du modèle INRA 2018 à l'alimentation en lots des chèvres.

## Introduction

Les chèvres, comme les autres femelles d'élevage, suivent des cycles biologiques reproductifs pendant lesquels de nombreuses caractéristiques et états physiologiques évoluent. Classiquement, le cycle biologique se déroule sur une année, entre deux mises bas, avec en moyenne : la lactation qui dure 300 jours, la fécondation qui s'effectue au 220<sup>e</sup> jour de lactation et la gestation qui dure 150 jours. Ces valeurs varient principalement en fonction de la parité (Contrôle laitier caprin, 2015) et de la réussite de la reproduction. Outre la dynamique de la production de lait et de la croissance des fœtus, un phénomène dynamique important chez les chèvres laitières est la mobilisation des réserves corporelles autour de la mise bas, en particulier en début de lactation, entraînant ainsi un bilan énergétique apparent négatif,

cette mobilisation des réserves devant être reconstituée par la suite. Cette dynamique, en particulier la mobilisation du début de lactation a été étudiée depuis plusieurs décennies (Morand-Fehr et Sauvant, 1978). Ce phénomène a pu être objectivé pour les lipides au niveau des teneurs en Acides Gras Non Estérifiées (AGNE) du plasma, de la composition en acides gras du lait et de certaines activités enzymatiques tissulaires (Chilliard *et al.*, 1977 ; Sauvant *et al.*, 1979). Cette mobilisation concerne non seulement les lipides mais également les protéines (Sauvant *et al.*, 1986), en outre elle présente des implications en matière de pathologie de la nutrition (Sauvant *et al.*, 1991). Il a aussi été montré que ce phénomène était influencé par les apports alimentaires d'énergie avant et après mise bas, ainsi que par l'ascendance paternelle (Sauvant *et al.*, 1979). Dans une phase ultérieure des recherches, pour mieux quantifier et associer les phénomènes

biologiques et les mesures du terrain, des études ont été entreprises sur les variations de la composition corporelle en relation avec la NEC (Schmidely *et al.*, 1995). Elles ont permis d'établir une relation entre ces deux critères (figure 10), confirmée récemment par Lerch *et al.* (2021). Le développement de la modélisation a ensuite permis l'intégration de ces différentes connaissances, avec par exemple le modèle de PUILLET *et al.* (2008). Ce modèle simplifié de la nutrition de la chèvre laitière simule l'évolution coordonnée des cinétiques de production, d'ingestion et de variations des réserves énergétiques sur plusieurs lactations grâce à un noyau régulateur d'homéorhèse, ce modèle a ensuite été adapté pour modéliser le phénomène de lactation longue (Douhard *et al.*, 2013).

Pour l'ouvrage INRA 2018 issu du projet « Systali », des nouvelles données sur le cycle productif ont été collectées et

ont permis d'élaborer des équations empiriques décrivant la dynamique des processus de croissance, de production et de composition du lait, de gestation ainsi que celle de la variation des réserves (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018). Elles intègrent les effets de la parité, des niveaux de performance laitière et de la prolificité. Ces différentes cinétiques ont été élaborées de façon indépendante les unes des autres ; en revanche, elles n'avaient pas été intégrées au sein d'un modèle global cohérent alors qu'elles concernent un même individu et les différentes facettes d'un même phénomène. De plus, certains critères liés à ces aspects et utilisés sur le terrain comme la NEC ou le PVF (PVF correspondant au PV minimal atteint pendant un cycle productif) n'avaient pas été assez considérés dans les modèles de Puillet *et al.* (2008) et celui de INRA 2018.

Le but de cet article est donc de mettre en cohérence ces différents aspects dynamiques au cours d'un cycle productif et en fonction des principaux facteurs de variation évoqués ci-dessus. L'objectif est de pouvoir tracer des cinétiques de PV et de NEC prenant en compte les effets liés à la lactation, à la gestation, à la croissance et à l'évolution des contenus digestifs entre deux mises bas. Chacun de ces effets sera considéré séparément avant d'être combinés. Cet article complète celui consacré à l'alimentation en lots (Sauvant *et al.*, 2021).

L'ensemble des démarches proposées est résumé à la **figure 1** à laquelle il convient de revenir régulièrement en cours de lecture. Les sigles de ce diagramme sont définis au fur et à mesure et l'ensemble des abréviations utilisées dans cet article sont explicitées dans un glossaire présenté à l'**encadré 1**.

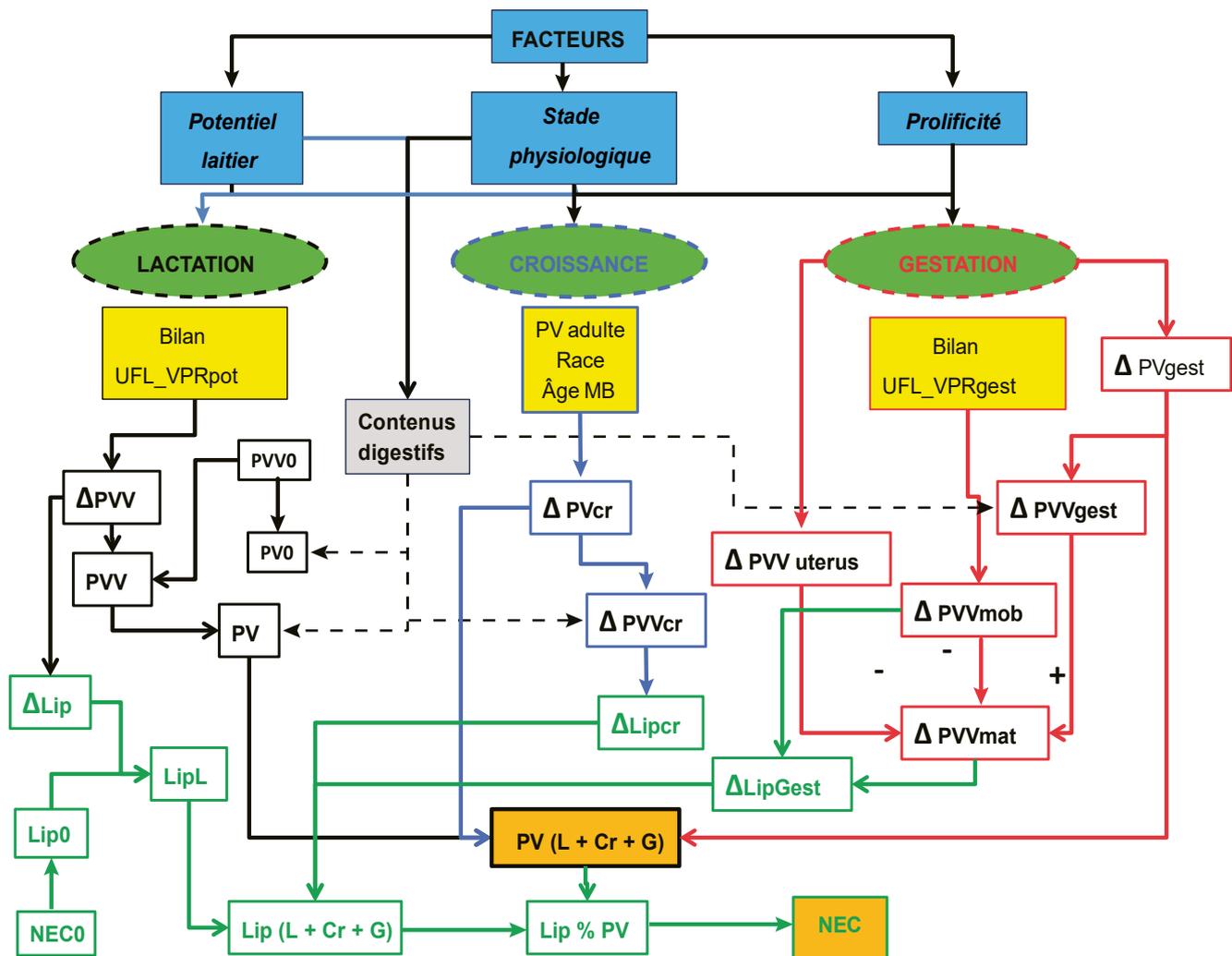
## 1. Modélisation de la dynamique des réserves pour simuler l'évolution pondérale pendant la lactation

L'objectif de cette partie est de mettre en cohérence les flux énergétiques associés à la dynamique des réserves et les évolutions pondérales liées à la lactation (hors croissance et gestation).

### ■ 1.1. Calcul des paramètres de base de la dynamique des réserves énergétiques

La démarche débute par la modélisation des flux de mobilisation/accrétion des réserves énergétiques qui expliquent l'essentiel des variations pondérales des chèvres pendant la lactation. Dans le chapitre 21 d'INRA 2018

**Figure 1.** Résumé de l'ensemble des articulations entre les différents états physiologiques et les principaux calculs et équations présentés dans le texte.



**Encadré 1. Glossaire.**

<b>AGNE</b> : Acides gras non estérifiés du plasma	<b>NEC_lomb</b> : Note d'état corporel au niveau lombaire
<b>BilUFLth</b> : Bilan énergétique théorique en UFL/j	<b>NEC_lomb(L + Cr + G)</b> : Évolution de la NEC lombaire le long du cycle de production
<b>CD%PV</b> : Contenus digestifs en % du PV	<b>PAR</b> : Parité
<b>CD/PV<sub>POT</sub></b> : Variations des proportions des contenus digestifs/PV	<b>PLIPtcr</b> : Poids de la masse lipidique en croissance (kg)
<b>ΔLIPtcr</b> : Gains du poids de lipides liées à la croissance seule (kg)	<b>PLPOT</b> : Production laitière potentielle pour une lactation (kg)
<b>ΔLIPgest</b> : Variations du poids de lipides liées à la gestation (kg)	<b>PLPotMax</b> : Production laitière potentielle au pic de production (kg)
<b>ΔPVF</b> : Variation du PV entre PVo et PVF (kg)	<b>PV</b> : Poids Vif en kg
<b>ΔPV<sub>mat</sub></b> : Variation du PV de l'organisme maternel seul en gestation (kg)	<b>PV(L + Cr + G)</b> : Poids Vif aux différents états en kg
<b>ΔPVtcr</b> : Variation du PV lié à la croissance (kg)	<b>PVF</b> : Poids Vif format en kg
<b>ΔPVV<sub>VPR</sub></b> : Variation du PVV (kg) en valeur absolue	<b>PVo</b> : Poids Vif initial à la mise bas en kg
<b>ΔPVV<sub>mob</sub></b> : Variation du PVV de la mobilisation en gestation (kg)	<b>PVgest</b> : Poids vif en gestation en kg
<b>ΔPVV<sub>mat</sub></b> : Variation du PVV de l'organisme maternel seul en gestation (kg)	<b>PVtcr</b> : Poids vif en croissance en kg
<b>LIP%PV</b> : Lipides en % du PV	<b>PVVtcr</b> : Poids vif vide en croissance en kg
<b>LIP%PV<sub>(L + Cr + G)</sub></b> : Lipides en % du PV le long du cycle de production	<b>PVV</b> : Poids vif vide en kg
<b>LIP%PVVtcr</b> : Lipides en % du PVV lié à la croissance	<b>PVV<sub>0</sub></b> : Poids vif vide initial à la mise bas en kg
<b>LIP(L + Cr + G)</b> : Poids de lipides le long du cycle en kg	<b>PVV<sub>F</sub></b> : Poids vif vide format en kg
<b>LIP%PV(L + Cr + G)</b> : Proportions de lipides le long du cycle en %PV	<b>PVVgest</b> : Poids vif vide en gestation en kg
<b>NBchev</b> : Nombre de chevreaux mis bas	<b>UFL</b> : Unité Fourragère Lait
<b>NEC</b> : Note d'état corporel	<b>UFL_VPRpot</b> : Variations Potentielles des Réserves corporelles en UFL/j
<b>NEC_st</b> : Note d'état corporel au niveau du sternum	<b>UFL_VPRgest</b> : Mobilisation Potentielle des Réserves corporelles en gestation en UFL/j
<b>NEC_st(L + Cr + G)</b> : Évolution de la NEC sternale le long du cycle de production	

(Sauvant et Giger-Reverdin, 2018) nous avons proposé des équations paramétrables (Eq. 21.19) de l'évolution de ces flux avec le critère UFL\_VPRpot = Mobilisation – Accrétion (une valeur positive de ce critère traduit donc une mobilisation d'énergie plus importante que l'accrétion) exprimé en unités d'énergie nette, c'est-à-dire en UFL/j. L'acronyme VPRpot signifie « variation potentielle des réserves ». Les paramètres influençant sont, outre le stade, le potentiel de production laitière brute au pic (PLPotMax) et la valeur de la NEC sternale à la mise bas (NEC\_st<sub>mb</sub>) :

$$\text{UFL\_VPRpot} = - [A + B \times (1 - \exp(-C \times t))] \quad [1]$$

avec :

$$A = -0,630 - 0,1794 \times (\text{PLPotMax} - 4,0) - 0,208 \times (\text{NEC\_st}_{\text{mb}} - 3,0) \quad [1a]$$

$$B = [0,699 + 0,196 \times (\text{PLPotMax} - 4,0) + 0,0050 \times (\text{PLPotMax} - 4,0)^2 + 0,234 \times (\text{NEC\_st}_{\text{mb}} - 3,0)] \quad [1b]$$

$$C = 0,0378 - 0,0050 \times (\text{PLMaxPot} - 4,0) - 0,00385 \times (\text{NEC\_st}_{\text{mb}} - 3,0) \quad [1c]$$

Les valeurs des paramètres de ces trois équations, actualisées depuis 2018, ont été déterminées à partir de nombreuses cinétiques de productions et de bilans UFL observées en expérimentation avec des lots d'animaux correctement nourris et en supposant *i*) que les niveaux de mobilisation et d'accrétion cumulées s'équilibrent à un stade du cycle biologique qui dépend du potentiel (plus le potentiel est élevé, plus l'équilibre est atteint tardivement) et *ii*) que l'essentiel de ce cycle des réserves s'effectue au cours du cycle lactation-gestation considéré, au plus tard un mois avant la mise bas suivante. La figure 2 illustre cette cinétique et montre bien l'allure décroissante de la mobilisation des premières semaines telle qu'elle a souvent été évoquée plus haut à travers les évolutions pondérales et la teneur en AGNE du plasma ou en AG long de la matière grasse du lait. Dans la première partie de ce texte, le rôle de la NEC n'est

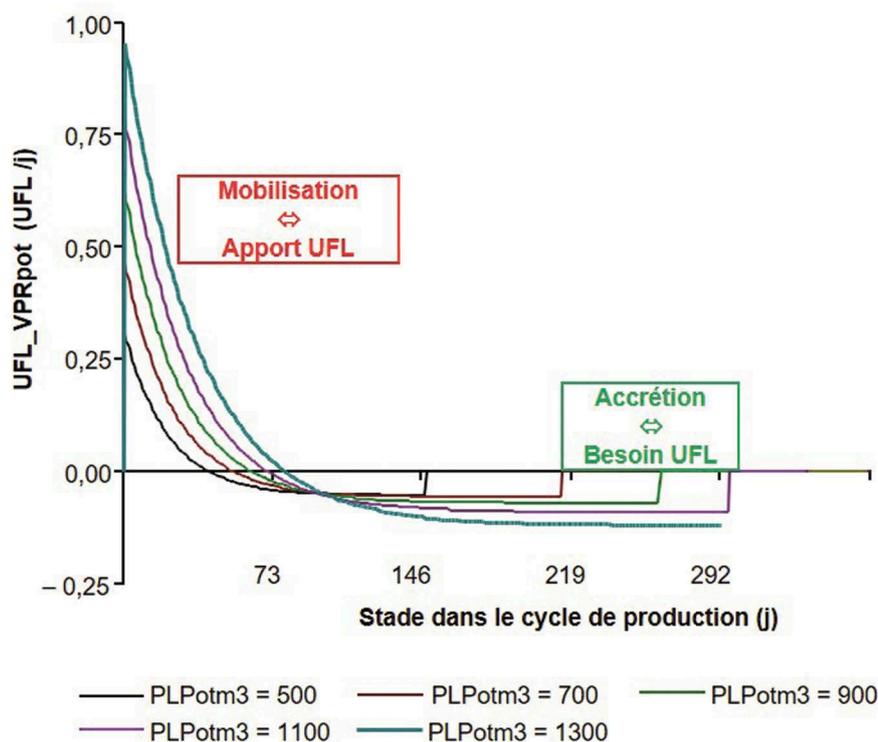
pas intégré dans les calculs, on a donc considéré NEC\_st<sub>mb</sub> = 3.

Pour mémoire, ces trajectoires permettent d'introduire une nouvelle notion de bilan énergétique, le « Bilan UFL théorique » qui tient compte de ce phénomène avec la variable

$$\text{UFL\_VPRpot} : \text{BilUFLth} = \text{ApportsUFL} - \text{BesoinsUFL} + \text{UFL\_VPRpot} \quad [2]$$

La valeur de l'équilibre de ce bilan, BilUFLth = 0, est utilisée comme valeur pivot pour *i*) le calcul des besoins nutritionnels au potentiel de production tel qu'il a été défini dans le projet Systali et *ii*) prédire les réponses productives aux variations des apports de concentré, ou bien d'UFL et PDI (Sauvant *et al.*, 2021). Ainsi, dans les calculs des rations, on considère que la mobilisation des réserves complète l'apport nutritionnel de la ration en UFL et en PDI (à raison de 33 g PDI/UFL de bilan UFL) alors que l'accrétion correspond à des besoins obligatoires à satisfaire (figure 2).

**Figure 2.** Évolution du critère UFL\_VPRpot (en UFL/j) de la différence entre mobilisation et accréation, en fonction du stade du cycle et du potentiel de production (cf. Eq. [1]).



Par rapport à cela, la présente publication ne concerne que des animaux alimentés à leur potentiel de production, c'est-à-dire des animaux qui ne subissent pas de contraintes de leur environnement nutritionnel et expriment uniquement des régulations d'homéorhèse, les réponses des productions et des réserves aux variations d'apports ont été abordées dans le texte précédent (Sauvant *et al.*, 2021).

### ■ 1.2. Calcul des cinétiques des bilans énergétiques cumulés

Dans cette étape, les cinétiques de flux d'UFL\_VPRpot (Équations [1a, b, c] ci-dessus) ont été cumulées dans le temps. Elles sont illustrées à la figure 3, sur quatre lactations successives (cette évolution est calculée indépendamment de la croissance et de la gestation). Ces cinétiques illustrent la forte influence des potentiels laitiers sur les valeurs des bilans cumulés et sur le stade du retour à l'équilibre énergétique cumulé. Elles n'intègrent pas d'effet spécifique de la parité, en dehors de celui bien connu sur la production potentielle qui peut être suivi sur la figure 3

(exemple trajectoire pour un potentiel de 700 kg en première lactation et de 900 kg de lait en deuxième lactation...).

### ■ 1.3. Calcul des cinétiques de poids vif vide (PVV) liées à la lactation

Dans cette troisième partie de l'approche, les cinétiques des bilans UFL cumulés d'animaux nourris au potentiel sont transformées en cinétiques de PVV en appliquant les 2 hypothèses suivantes :

i) Les valeurs d'efficacité moyenne de l'énergie métabolisable en énergie nette sont considérées comme fixe pour le lait ( $k_l = 0,65$ , Eq. 6.11, INRA, 2018) et les réserves ( $k_r = 0,80$ ) (cf. chapitre 6, d'INRA, 2018).

Avec ces hypothèses, il est possible de calculer l'énergie corporelle mobilisée-accumulée ( $\Sigma EN\_VPRpot$ ) au cours du cycle, en kcal de réserves, en transformant les valeurs d'une énergie lait en une énergie de réserves :

$$\Sigma EN\_VPRpot \text{ (kcal/j)} = \Sigma (\text{UFL\_VPRpot} \times 1760/k_l) \times k_r \quad [3]$$

ii) La chèvre présente, à stade égal, une teneur en lipides du Poids Vif Vide (PVV) d'environ 6 points en % du PVV plus faible que les vaches laitières (Sauvant *et al.*, 2018). L'équivalent énergétique des variations du PVV correspond à la valeur proposée par Sauvant *et al.* (2018) de 2,2 UFL, sur la base de 5 expériences publiées :

1 kg de variation de PVV équivaut à 433 g lipides et 137 g protéines qui équivaut à 4,82 Mcal EN soit 2,2 UFL.

En effet on a  $(4,82/0,8) \times 0,65/1760 \times 1000 = 2,2$ . Ces hypothèses moyennes permettent de convertir les variations d'énergie liées aux réserves corporelles en évolution des bilans pondéraux des réserves ( $|\Delta PVV_{VPR}|$ , en kg de PVV/j) pendant les phases de mobilisation/accréation.

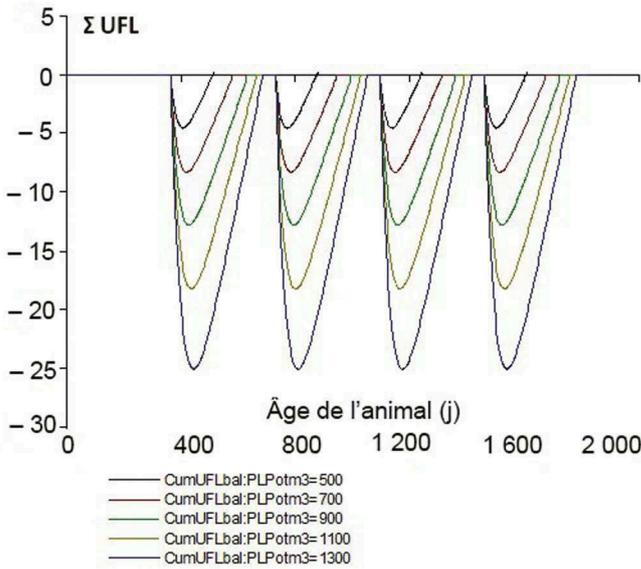
$$|\Delta PVV_{VPR}| = \Sigma EN\_VPRpot \text{ (kcal/j)} / 4,82 \quad [4]$$

Il est ainsi possible, à partir des cinétiques de bilan énergétiques cumulés, de quantifier l'évolution dans le temps du PVV correspondant aux variations des réserves, aux différents potentiels. Pour réaliser un ajustement statistique non linéaire et déduire les paramètres de l'équation du PVV en fonction du temps, chaque cinétique de PVV générée selon les relations ci-dessus (considérée en valeur absolue) a été bruitée avec un écart type de 0,2. L'ajustement a été réalisé avec un modèle exponentiel simple à 3 paramètres (a, b et c) et passant par l'origine au stade initial de la mise bas :

$$|\Delta PVV_{VPR}| = a \times [\exp(-b \times t) - \exp(-c \times t)] \quad [5]$$

La figure 4 donne, en exemple, l'allure des ajustements des cinétiques de PVV ( $|\Delta PVV_{VPR}|$ ) pour PLpot 700 et 1100 kg de lait (en 300 j). Les mêmes allures d'évolution s'observent pour les autres potentiels de production. La figure 4 montre que les ajustements permettent notamment de « lisser » les cinétiques de PVV<sub>VPR</sub> pour les phases de retour à la cinétique de base et permettent ainsi d'obtenir des cinétiques d'évolutions pondérales plus réalistes (cf. comparaison des allures des figures 3 et 4).

**Figure 3.** Étude de la sensibilité du Bilan UFL cumulé au potentiel de production sur 300 j pour des potentiels variant de 500 à 1 300 kg de la première à la quatrième lactation.



Ensuite, les valeurs obtenues pour les paramètres a, b et c de l'équation [5] ont été ajustées en fonction du potentiel de production de la lactation sur 300 j (PLPOT/1 000) :

$$a = 100 + 100 \times \text{PLPOT}/1\,000 \quad [5a]$$

$$b = 0,0115 + 0,0037 \times \exp(-3,465 \times (\text{PLPOT}/1\,000 - 0,9)) \quad [5b]$$

$$c = 0,0135 + 0,00308 \times \exp(-3,764 \times (\text{PLPOT}/1\,000 - 0,9)) \quad [5c]$$

Ces équations [5a], [5b] et [5c], permettent de calculer à partir de l'Eq. [5] les valeurs de  $\Delta\text{PVV}_{\text{VPR}}$  en fonction de PLPOT. Avec ces valeurs il devient

également possible de calculer simplement le stade ( $t_{\text{pr}}$  en jour de lactation) auquel le poids vif minimum (PVF = poids vif format, voir plus loin) est atteint pendant la lactation, et qui correspond à la valeur maximum de  $|\Delta\text{PVV}_{\text{VPR}}|$ , en tenant compte du potentiel de production :

$$t_{\text{pr}} = (\text{Ln } b - \text{Ln } c) / (b - c) \quad [6a]$$

On peut aussi en déduire simplement la chute maximale de poids depuis la mise bas, observée à  $t = t_{\text{pr}}$  (jour de lactation du poids format) en remplaçant t (équation [5]) par  $t_{\text{pr}}$  (Eq. [6a]) dans l'équation [6b].

$$\Delta\text{PVV}_{\text{VPR}} = a \times [\exp(-b \times t_{\text{pr}}) - \exp(-c \times t_{\text{pr}})] \quad [6b]$$

Le **tableau 1** indique, à titre d'exemple, les valeurs de  $t_{\text{pr}}$  et de la chute de PVV maximale qui s'accroissent à mesure des 5 potentiels de production. On constate au passage que l'accroissement des potentiels décale effectivement dans le temps le stade du minimum de PVV et amplifie largement la chute pondérale.

Au passage la connaissance du PVVF et de la chute ( $\Delta\text{PVV}_{\text{VPR}}$  à  $t_{\text{pr}}$ ) permettent de calculer le PVV initial ( $\text{PVV}_0$ ) mesuré juste après la mise bas (cf. § 3.6.) :

$$\text{PVV}_0 = \text{PVVF} - |\Delta\text{PVV}_{\text{VPR}}| \quad [6c]$$

On peut alors en déduire l'évolution du PVV dans le temps par les Eq. [5] et [6c] :

$$\text{PVV} = \text{PVV}_0 - |\Delta\text{PVV}_{\text{VPR}}| = \text{PVV}_0 - [a \times \exp(-b \times t) - \exp(-c \times t)] \quad [6d]$$

Par exemple, la **figure 5** ci-dessous montre les cinétiques d'évolution ainsi obtenues pour le PVV de chèvres en troisième lactation ayant un  $\text{PVV}_0 = 65$  kg et en fonction de son potentiel (sans tenir compte de la croissance et de la gestation, voir plus loin). Les lignes verticales repèrent les valeurs de  $t_{\text{pr}}$  citées au **tableau 1**. Ces cinétiques ont une allure assez comparable à celles que Puillet *et al.* (2008) ont publiées, en particulier pour les amplitudes, cependant le décalage dans le temps de  $t_{\text{pr}}$  et le retour aux valeurs initiales en fonction des potentiels y sont plus marqués dans notre approche qui s'appuie sur de nombreuses données observées.

**Tableau 1.** Variations de différents paramètres, en fonction du potentiel de production du poids et de la croissance.

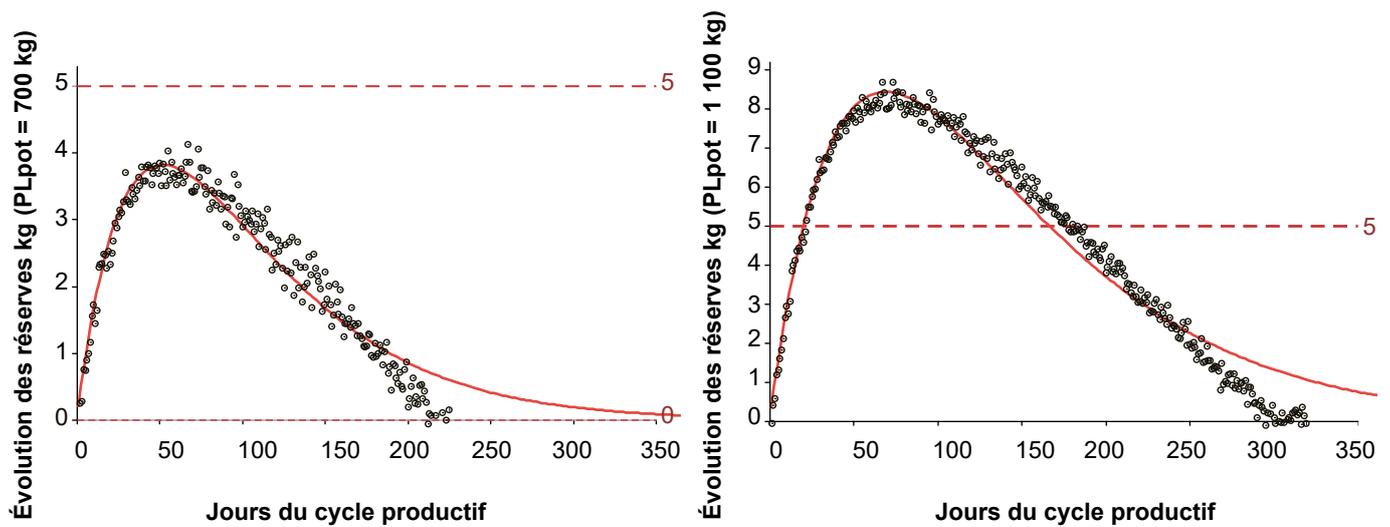
Potentiel (kg/300 j)	$t_{\text{pr}}$ (j)	$ \Delta\text{PVV}_{\text{VPR}} $ à $t_{\text{pr}}$ (kg)	CD/PV <sup>(1)</sup>	PVVF <sup>(2)</sup> (kg)	PVF (kg)	Croissance <sup>(3)</sup> (kg)
500	37	2,1	0,206	62,7	79,9	0,50
700	52	3,9	0,215	61,3	78,1	0,68
900	63	5,7	0,222	58,8	75,6	0,81
1 100	70	8,6	0,228	56,1	72,7	0,90
1 300	77	11,7	0,233	53,6	69,9	0,98

(1) : Contenus digestifs/PV, voir la partie 3.1.

(2) : PVV format pour une chèvre en 3<sup>e</sup> lactation pesant environ 65 kg de PVV à la mise bas (voir partie 3.6.).

(3) : Prise en compte de la croissance (cf. § 3.3).

**Figure 4.** Exemples d'ajustement des cinétiques des réserves corporelles, exprimées en valeurs absolues ( $\Delta PVVVPR$ ), pour deux potentiels de production (700 et 1 100 kg).



La ligne Y = 5 kg a été tracée pour comparer les 2 figures.

Ainsi, pour la pratique il est possible en enchaînant les équations [6] et [5] d'estimer le PVV lié à la lactation à n'importe quel stade de lactation et à partir des deux informations que sont le potentiel de production et le poids format.

## 2. Modélisation de la dynamique des constituants corporels pendant la gestation

Étant donné l'importance de la gestation pendant un cycle productif, la dynamique des constituants corporels pendant cette étape doit être modélisée le mieux possible pour pouvoir connaître les évolutions de l'ensemble des réserves sur un cycle productif. La démarche appliquée à la gestation est résumée dans le diagramme présenté en figure 1. Pour la mettre en œuvre il a été nécessaire de compléter le modèle INRA 2018 sur les évolutions tissulaires des différents composants pendant la gestation : le fœtus, l'utérus gravide et l'organisme maternel. Dans cette approche deux principaux facteurs de variation sont pris en compte : le stade de gestation (tgest, jours) et la prolificité. Celle-ci correspond au paramètre NbChev = 1, 2 ou  $\geq 3$  chevreaux, ce qui équivaut à des poids moyens de portée de 4,6, 8,1 et 11,1 kg (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018). Une équation de

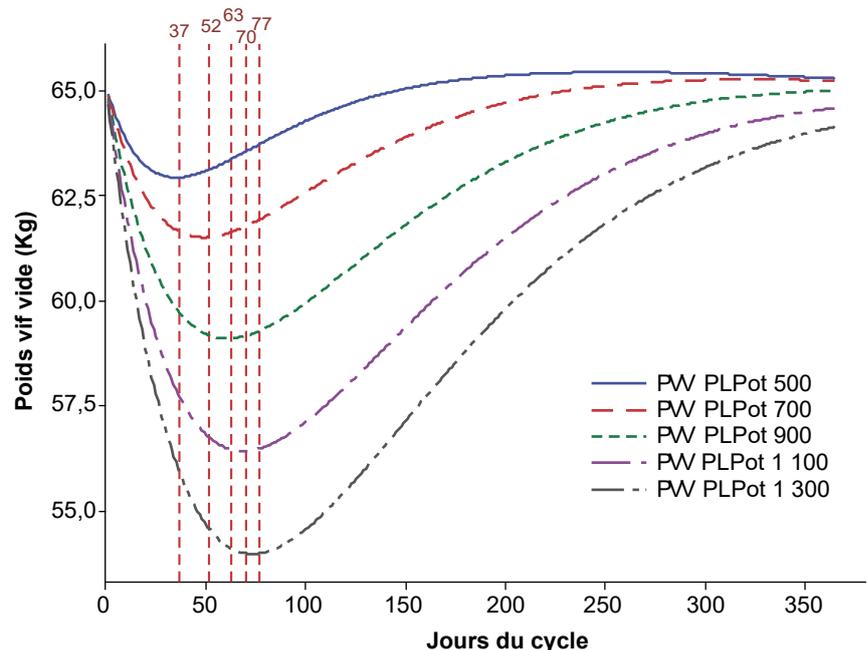
prévision précise du poids de la portée en fonction de la race, de la parité et de la prolificité est disponible et peut être appliquée (cf. Eq. 21.23, Sauvant et Giger-Reverdin, 2018).

### ■ 2.1. Cinétiques d'évolution du poids vif et du poids vif vide pendant la gestation

Les cinétiques moyennes d'évolution du poids vif (PVgest) pendant la

gestation (organisme maternel + utérus gravide) sont calculées en utilisant l'Eq. 21.24 (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018). Dans la mesure où il s'agit toujours de variations pondérales repérées par rapport au stade initial 0 de la fécondation, tout ce qui concerne la gestation est exprimé dans ce texte en variation par rapport à ce stade, donc en valeurs de « delta » ( $\Delta PV_{gest}$  en kg). Par ailleurs, les temps sont aussi exprimés par rapport à la fécondation (tgest)

**Figure 5.** Évolution simulée du poids vif vide d'une chèvre de gabarit moyen en troisième lactation en fonction de son potentiel (lié à la dynamique des réserves corporelles pendant la lactation ; la croissance et la gestation ne sont pas prises en compte).



qui a lieu pour le modèle en moyenne à 220 jours du cycle biologique :

$$\Delta PV_{\text{gest}} = a \times 3,6 \times [\exp(0,0139 \times t_{\text{gest}}) - 1] \quad [6e]$$

Le paramètre « a » est lié à la prolifération : a = 0,75, 1,0 et 1,2 pour NbChev = 1, 2, 3 et plus. Cette équation correspond à un modèle d'accumulation simple à un compartiment, avec une valeur initiale nulle lorsque  $t_{\text{gest}} = 0$ . À partir de cette équation [6], et de la contribution des contenus digestifs aux variations de PV en fonction du potentiel ( $CD/PV_{\text{pot}}$ , cf. Eq. [13 a, b, c, d] présentées plus loin), on déduit l'évolution du poids vif vide liée à la gestation ( $\Delta PVV_{\text{gest}}$ ) :

$$\Delta PVV_{\text{gest}} = \Delta PV_{\text{gest}} \times (1 - CD / PV_{\text{pot}}) \quad [7]$$

Pour faciliter la suite de l'approche, grâce à des études par simulation, on propose de calculer directement les valeurs du  $\Delta PVV_{\text{gest}}$  en combinant les Eq. [6] et [7] ci-dessus au sein de l'équation simplifiée suivante :

$$\Delta PVV_{\text{gest,cal}} = a \times [\exp(0,0142 \times t_{\text{gest}}) - 1] \quad [8]$$

avec les valeurs de a = 2,118, 2,824 et 3,389 pour 1, 2 et 3 chevreaux ou plus.

## ■ 2.2. Cinétique pondérale de l'utérus gravide

Dans le modèle INRA 2018, les dépenses de gestation qui sont utilisées pour calculer les besoins ne concernent que l'utérus gravide (Foetus + Utérus = F + U). En effet l'évolution de la mamelle est supposée être incluse à celle l'organisme maternel, comme chez toutes les femelles des ruminants d'élevage. En réalité, *i)* compte tenu du fait que les différents ensembles tissulaires de la femelle gestante n'ont pas la même composition et *ii)* vu que la note de NEC ne concerne que l'organisme maternel, il est nécessaire de chercher à distinguer l'ensemble foetal F + U du reste de l'organisme. En utilisant les données de Castagnino de Souza *et al.* (2015) et de Härter *et al.* (2017), il est possible de calculer la cinétique de la dépense énergétique nette quotidienne liée

spécifiquement à l'ensemble F + U, exprimée en kcal/j (cf. Eq. 21.26 corrigée, Sauvart et Giger-Reverdin, 2018).

$$\Delta ENf + u = a \times [\exp(0,034 \times t_{\text{gest}}) - 1] \quad [9]$$

avec a = 1,8, 3,0 et 4,1 pour NbChev = 1, 2, et 3 ou plus. Les cinétiques obtenues sont présentées dans la figure 21.6 (Sauvart et Giger-Reverdin, 2018). Cette équation correspond encore à un modèle d'accumulation simple à un compartiment, avec une valeur initiale nulle lorsque  $t_{\text{gest}} = 0$ . La fonction correspondant à l'Eq. [9] a ensuite été intégrée dans le temps ( $\Sigma(\Delta ENf + u)$ ) pour calculer l'énergie accumulée dans l'ensemble F + U, exprimée en Mcal/j :

$$\Sigma(\Delta ENf + u) = 0,001 \times (a / 0,034) \times [\exp(0,034 \times t_{\text{gest}}) - 1] \quad [9']$$

Les valeurs du paramètre « a » sont les mêmes que pour l'Eq. [9]. Dans la phase suivante, pour estimer la masse pondérale accumulée dans ces compartiments F + U, nous avons utilisé les données publiées par Härter *et al.* (2017) montrant l'existence d'une relation allométrique étroite chez les chèvres gestantes entre l'énergie accumulée dans les F + U et leur masse tissulaire correspondante (figure 6). Donc l'évolution du PVV de l'ensemble F + U (kg) peut être calculée selon l'équation suivante à partir de l'Eq. [9'] :

$$\Delta PVV_{f+u} = 2,78 \times [\Sigma ENf + U]^{0,706} \quad [10]$$

## ■ 2.3. Cinétique pondérale de l'organisme maternel hors utérus gravide pendant la gestation

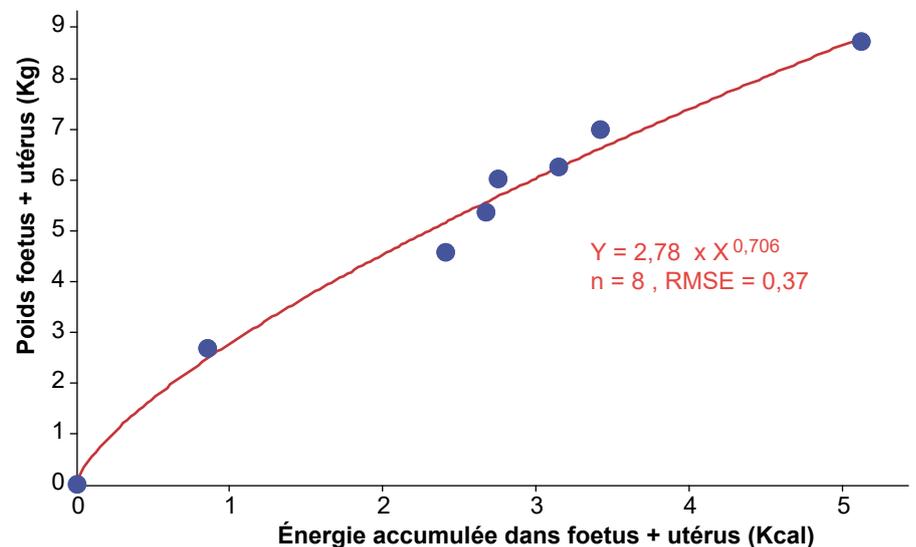
Dans le modèle INRA 2018 seule la mobilisation énergétique (et protéique) de l'organisme maternel en fin de gestation a été prise en compte. Pour gagner en précision dans la quantification de la gestation il est nécessaire de compléter cette donnée en intégrant la phase d'anabolisme qui intervient en début de gestation chez toutes les femelles de mammifère. Cet aspect n'avait pas été pris en compte de façon explicite dans le modèle INRA 2018 pour les différentes espèces. Pour appréhender ce phénomène on précisera d'abord la perte pondérale liée à cette mobilisation ( $\Delta PVV_{\text{mob}}$ ) pour en déduire l'évolution du PVV de l'organisme maternel seul ( $\Delta PVV_{\text{mat}}$ ) en la soustrayant à l'évolution du  $\Delta PVV_{\text{gest}}$  (Eq. [8]) lui-même corrigé du poids des foetus (Eq. [10]).

### a. Calcul de la perte de $\Delta PVV$ lié à la mobilisation des réserves en fin de gestation

La mobilisation corporelle quotidienne d'énergie en fin de gestation (Eq. 21.28 corrigée, INRA 2018), exprimée en UFL, est représentée par l'équation suivante :

$$UFL_{VPR_{\text{gest}}} = b \times [\exp(0,034 \times t_{\text{gest}}) - 1] \quad [11]$$

**Figure 6.** Relation entre le poids et l'accumulation d'énergie dans l'utérus gravide (foetus + annexes).



avec  $b = 0,0015, 0,0025$  et  $0,0040$  pour  $NbChev = 1, 2, 3$  et plus, ces coefficients ayant été actualisés. Cette équation correspond ici encore à un modèle d'accumulation simple à un compartiment, avec une valeur initiale nulle lorsque  $t_{gest} = 0$ . Cette mobilisation énergétique est d'abord cumulée dans le temps :

$$\Sigma UFL\_VPR_{gest} = (b / 0,034) \times [\exp(0,034 \times t_{gest}) - 1] \quad [11']$$

puis cette accumulation d'énergie est transformé en poids vif vide mobilisé ( $\Delta PVV_{mob}$ , kg) avec les hypothèses de composition de l'organisme maternel présentées dans la partie 1.3., soit 2,2 UFL/kg PVV, on obtient ainsi la cinétique du poids vif vide mobilisé, considéré avec un signe positif :

$$\Delta PVV_{mob} = (\Sigma UFL\_VPR_{gest}) / 2,2 \quad [11'']$$

**b. Calcul de l'évolution du PVV maternel en gestation**

Pour calculer de la façon la plus simple possible l'évolution pondérale de l'organisme maternel hors utérus gravide ( $\Delta PVV_{mat}$ ) nous l'estimons par différence à partir du gain de PVV lié à la gestation (Eq. [8]) dont on soustrait l'ensemble F + U (Eq. [10]) et la partie mobilisée calculée ci-dessus (Eq. [11''] :

$$\Delta PVV_{mat} = \Delta PVV_{gestcal} - \Delta PVV_{F+U} - \Delta PVV_{mob} \quad [12a]$$

À partir de cette équation il est possible de calculer l'évolution du PV maternel en tenant compte des contenus digestifs (cf. Eq. [13c] ci-dessous).

$$\Delta PV_{mat} = \Delta PVV_{mat} / (1 - CD / PV_{pot}) \quad [12b]$$

Notons au passage que les besoins UFL et PDI associés à l'évolution pondérale  $\Delta PVV_{mat}$  n'ont pas été pris en compte dans les besoins de gestation INRA 2018 qui était donc un peu sous-estimés dans la première phase de la gestation.

À partir des équations [8], [10], [11'] et [12] ci-dessus il est possible de tracer les évolutions pondérales des différents compartiments corporels de la chèvre en gestation. Les figures 7a et 7b montrent les résultats obtenus pour les prolificités de 1 et 3 chevreaux. On constate par exemple qu'avec trois chevreaux le PVV de l'organisme maternel est plus faible à la mise bas qu'à la fécondation, ce qui n'est pas le cas pour un seul chevreau mis bas. Cette différence est la conséquence des niveaux différents de mobilisation liés à la prolificité.

**3. Calcul des cinétiques de poids vif (PV) sur un cycle productif**

Le principe de ce calcul est d'additionner les évolutions pondérales,

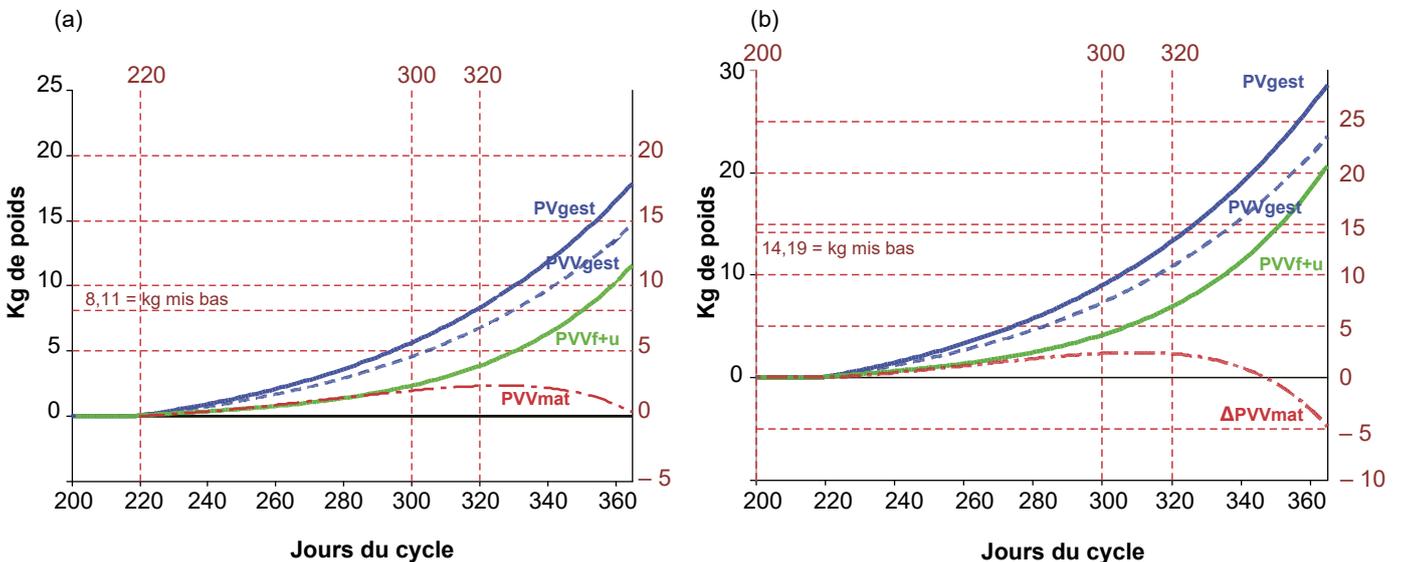
calculées en PVV, liées à la croissance, la lactation et la gestation. Ensuite pour passer aux évolutions de PV il convient de prendre en compte l'évolution des contenus digestifs selon l'approche présentée ci-dessous.

**■ 3.1. La prise en compte des contenus digestifs**

Compte tenu du faible nombre de données disponibles, cette question n'est pas simple à traiter et est toujours objet de débat, sachant que la période la plus difficile à cerner est celle de la fin de gestation et du début de lactation. Dans INRA (2018), il est proposé au chapitre 6 une équation commune aux vaches et chèvres d'évolution moyenne du PVV en %PV au cours des cycles (cf. Eq. 6.13.). Dans ce même chapitre 6 une autre Équation (Eq. 6.14.) statique a été proposée pour prédire les contenus digestifs à partir de leur facteur de variation le plus important qui est le niveau d'ingestion de parois végétales (NDF). Il n'est pas possible de tenir compte de cette dernière approche compte tenu du fait que la teneur en NDF des rations est un critère très variable d'un contexte à l'autre.

Pour tenter de mieux cerner la question de l'évolution des contenus digestifs en phase descendante de la lactation, nous sommes retournés dans la littérature en rassemblant des

**Figure 7.** Évolution pendant la gestation des poids des principaux compartiments corporels pour des prolificités de 1 chevreau (a) et 3 chevreaux (b). On suppose que la fécondation intervient à 220 jours du cycle.



données de contenus digestifs en % du poids vif (CD%PV). Nous avons ajusté un ensemble de 79 données de CD%PV issues de 15 expériences sur vaches et chèvres. Il n'y a pas de différence entre les deux espèces et l'équation moyenne intra-expérience obtenue est :

$$\text{CD\%PV} = 23,83 \times \exp(-0,00096 \times t) - 5,58 \times \exp(-0,02316 \times t) \quad [13a]$$

(n = 79, n<sub>exp</sub> = 15, RMSE = 1,24)

Cette approche actualise le calcul avec l'Eq. 6.13. (INRA, 2018). Avec cette équation [13a], lorsqu'on est au stade initial (t = 0) on a CD%PV<sub>t0</sub> = 18,25 %, valeur très proche du 17,3 % de l'équation 6.13 (INRA, 2018). La **figure 8** montre l'allure de l'évolution non linéaire du critère CD%PV au cours de cycle ; cette évolution suit globalement et de façon logique celle de l'ingestion.

Cette relation [13a] permet de calculer la proportion moyenne des CD à tous les stades du cycle biologique. Pour pouvoir tenir compte en plus de l'influence des niveaux d'ingestion (et de production) sur la capacité d'encombrement du tube digestif, et sachant que les données de base ont été obtenues sur des animaux peu productifs, il a été décidé, sur la base des quelques données disponibles chez des vaches laitières, de multiplier l'équation [13a] par le paramètre suivant  $\alpha = 1/1,025/1,05/1,075$  et 1,1 pour les PL<sub>pot</sub> de 500/700/900/1 100 et 1 300 kg respectivement. On a donc :

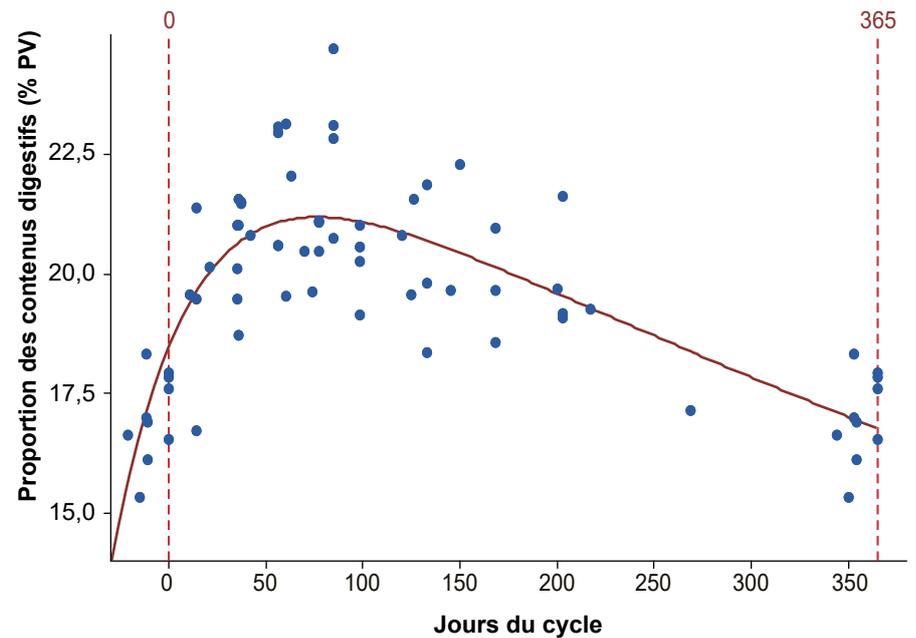
$$\alpha = 1,05 + 0,125 \times (\text{PL}_{\text{pot}} / 1000 - 0,9) \quad [13b]$$

à appliquer dans l'équation :

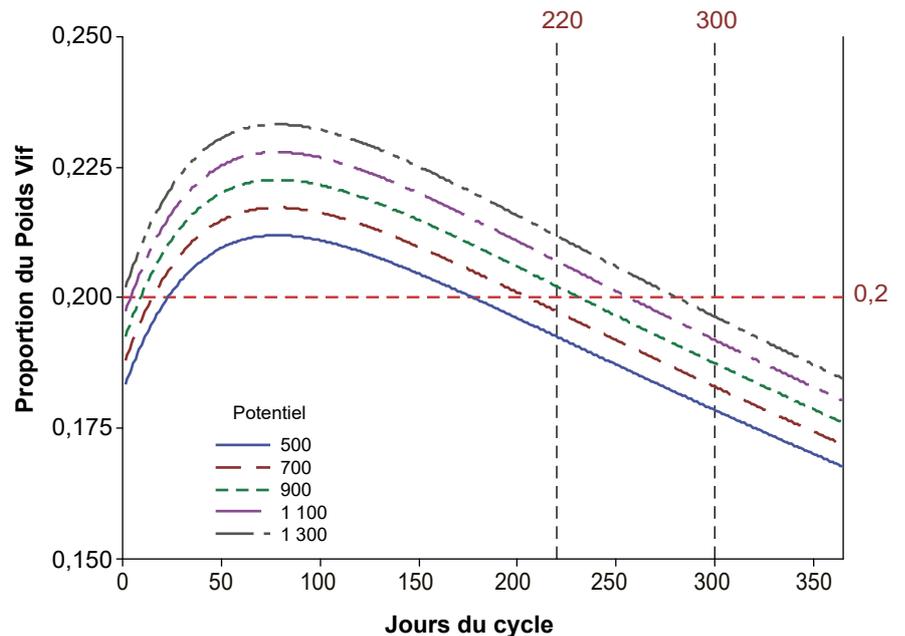
$$\text{CD/PV}_{\text{pot}} = \alpha \times \text{CD\%PV} / 100 \quad [13c]$$

Cette équation [13c] permet d'obtenir des estimations plus précises des CD dès lors que l'on connaît le stade dans le cycle et le potentiel de production. Par exemple, le **tableau 1** indique les valeurs calculées de CD/PV<sub>pot</sub> correspondantes aux différents temps du minimum t<sub>pr</sub> et les potentiels indiqués. La **figure 9** montre les valeurs simulées de la proportion des contenus digestifs en fonction du stade et des cinq potentiels de production (500, 700, 900, 1 100 et 1 300 kg).

**Figure 8.** Évolution au cours d'un cycle (X = 0 est le jour de la mise bas) de la proportion moyenne des contenus digestifs.



**Figure 9.** Simulation de l'évolution au cours d'un cycle de la proportion des contenus digestifs en fonction du stade et du potentiel de production.



### ■ 3.2. L'évolution du poids vif liée à la lactation

Avec l'équation [13c], il est possible de calculer des cinétiques de PV uniquement lié à la lactation (sans indice de temps pour simplifier) à partir de celles du PVV calculées plus haut (cf. Équations [6a à 6d]) et des contenus digestifs :

$$\text{PV} = \text{PVV} / (1 - \text{CD} / \text{PV}_{\text{pot}}) \quad [14]$$

Cette équation [14] peut être appliquée dans les deux sens (voir plus loin), elle s'applique également aux valeurs initiales (PV<sub>0</sub> et PVV<sub>0</sub>) ainsi qu'aux valeurs de PVF et PVVF (**tableau 1**). Par exemple, si on considère des animaux en 3<sup>e</sup> lactation on a PVV<sub>0</sub> = 65 kg et PV<sub>0</sub> = 80 kg environ. Le **tableau 1** indique les valeurs de PVVF et PVF au stade du poids format, indépendamment de la croissance. On dispose donc ainsi de tous les éléments pour calculer

une cinétique de PV en connaissant le potentiel de production et le poids format d'un animal moyen.

**3.3. La prise en compte de la croissance**

Il est nécessaire de tenir compte de la croissance, non seulement pour les primipares mais également pour les animaux en deuxième et troisième lactation au moins, pour pouvoir être assez précis. Les cinétiques d'évolution du PV liées à la croissance (PVtcr) ont été calculées selon le modèle INRA 2018 en considérant une moyenne des chèvres Alpines et Saanen pour l'Eq. 21.33 (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018) impliquant le PV adulte arrondi (PVad = 75 kg et 95 kg respectivement, moyenne 85 kg), un taux fractionnaire de croissance (A = 0,00259, S = 0,00213, moyenne = 0,00235), et l'âge depuis la naissance (Âgej, jours) :

$$PV_{tcr} = 4 + PV_{ad} \times (1 - \exp(-0,00235 \times Agej)) \quad [15a]$$

La constante 4 de cette équation est une estimation moyenne entre races du PV à la naissance, elle peut également être modulée. Cette équation [15a] correspond à un modèle simple à deux compartiments. Elle permet de calculer les PV<sub>0</sub> théorique (PV<sub>0th</sub>) en début de lactation à partir de la parité (ex. 365 j en première mise bas, 730 j en deuxième mise bas...) et du PVad (85 kg

par exemple). On en déduit le « delta » de croissance pondérale au cours du cycle de production de 365 j considéré :

$$\Delta PV_{tcr} = [4 + PV_{ad} \times (1 - \exp(-0,00235 \times Agej))] - PV_{0th} \quad [15b]$$

Les cinétiques obtenues avec cette Eq. [15b] au sein des différents cycles biologiques doivent être ajoutées à celle du PV liée à la lactation (Eq. 14). Cette addition suppose au passage qu'il n'y a pas d'interaction explicite entre la fonction de croissance et la lactation et la gestation respectivement.

$$PV(L + Cr) = PV + \Delta PV_{tcr} \quad [16]$$

Le **tableau 1** indique à titre d'exemple le gain de poids à intégrer entre les stades de la mise bas et de t<sub>pr</sub>. Avec ces calculs on obtient les cinétiques suivantes, par exemple pour les chèvres en 2<sup>e</sup> lactation (**figure 10a**) selon 4 potentiels (700, 900, 1 100 et 1 300 kg en 300 j), sachant que pour cette **figure 10a** la gestation a aussi été considérée (voir ci-dessous).

**3.4. La prise en compte de la gestation**

L'ensemble de l'approche liée à la gestation est présenté dans la partie 2 de ce texte. La variation pondérale maternelle est indiquée en Eq. [6], elle s'ajoute donc à l'Eq. [16] ci-dessus :

$$PV(L + Cr + G) = PV + \Delta PV_{tcr} + \Delta PV_{gest} \quad [17]$$

Par ailleurs, pour évaluer la cinétique pondérale de l'organisme maternel seul, il convient de ne pas prendre en compte l'ensemble fœtal comme dans l'Eq. [17], mais l'évolution de l'organisme maternel seul (cf. Eq. [12b]) selon l'équation suivante :

$$PV(L + Cr + G)_{mat} = PV + \Delta PV_{tcr} + \Delta PV_{mat} \quad [18]$$

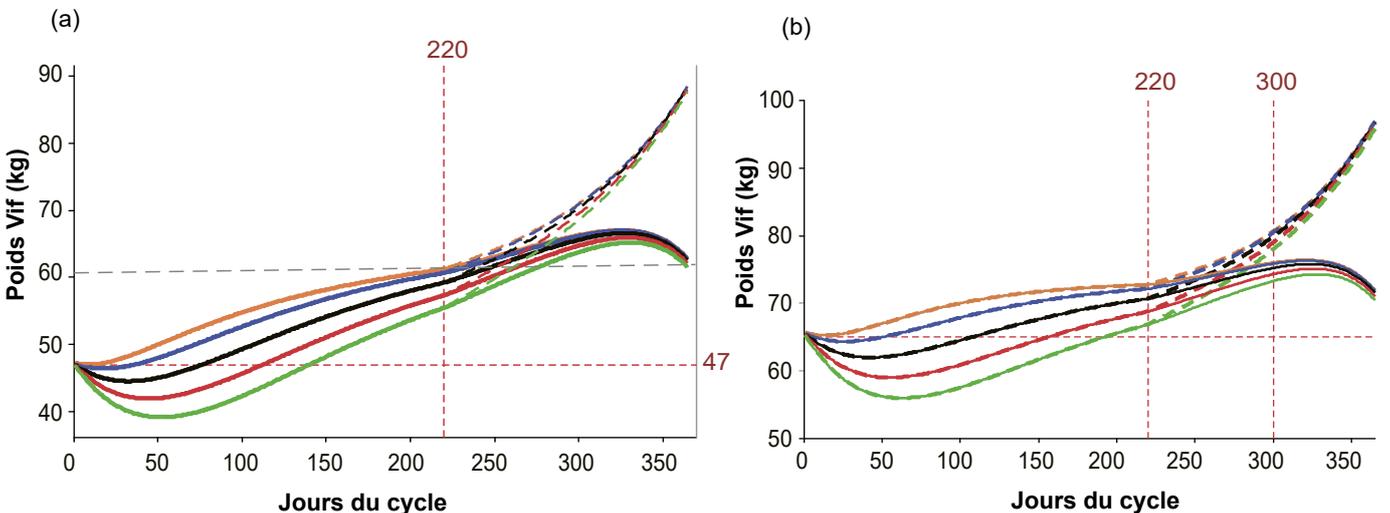
**3.5. Calcul des dynamiques pondérales globales**

Les différentes relations présentées permettent de calculer, en intégrant l'ensemble des fonctions (lactation, croissance et gestation), la cinétique du poids de l'animal entier par l'Eq. [17] ainsi que de l'organisme maternel seul (Eq. 18) comme cela apparaît dans les **figures 10a et 10b**. Ces figures concernent l'évolution comparée du PV entre des chèvres en première et en deuxième lactation, on y voit nettement la différence liée à la croissance.

**3.6. Application au modèle de prévision du poids à la mise bas à partir du « poids vif format »**

Dans le chapitre 21 consacré aux caprins (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018), le modèle générique suivant, à

**Figure 10.** Évolution du poids vif de la chèvre moyenne en première (a) et en deuxième (b) lactation, portant deux chevreaux en fonction de son potentiel de production, de sa croissance et de sa gestation.



Pour la gestation figurent le poids total (pointillé) et le poids de l'organisme maternel.

trois composantes, a été proposé pour calculer PV à tous les stades :

$$PV = PVF + (PV_0 - PVF) \times \exp(-a \times t) + \exp(b \times (t - t_0)) \quad [19]$$

Dans cette équation t, le stade de lactation, est en jours, le PV à un stade donné dépend du poids format (PVF) ainsi que du PV<sub>0</sub> initial (aussitôt après mise bas). Les paramètres PVF, PV<sub>0</sub>, a, b et t<sub>0</sub> varient selon la race (Alpine ou Saanen) et deux niveaux de parité (cf. tableau 21.4 du chapitre 21 d'INRA, 2018). Avec ces propositions, la connaissance de PVF permet d'estimer simplement PV à n'importe quel stade en appliquant à l'Eq. [19] les valeurs de ΔPVF = PV<sub>0</sub> - PVF de 3,3 et 4,6 kg pour des chèvres en première lactation (Alpine et Saanen respectivement) ou 6,2 et 8,4 kg en deuxième lactation ou plus (Alpine et Saanen respectivement). Les principales limites de cette approche étaient liées au fait qu'elles n'intègrent pas les variations du potentiel de production qui jouent sur la cinétique de PV.

Pour être plus précis nous avons donc cherché à tirer profit des parties 1, 2 et 3 ci-dessus qui permettent de calculer [PVF = f(PV<sub>0</sub>)] à travers une approche de type « ingénierie reverse » pour prédire le poids initial à la mise bas PV<sub>0</sub> à partir du PVF. Le but est donc, à partir d'un ensemble de simulations, d'avoir une prédiction [PV<sub>0</sub> = f(PVF)] simple, directe et assez précise pour pouvoir être

appliquée en élevage puisque le PVF est un critère d'entrée et que PV<sub>0</sub> est difficile à mesurer ou estimer en pratique.

Pour cela nous avons simulé, à travers la démarche décrite aux parties 1, 2 et 3, un ensemble de 20 valeurs de PV<sub>0</sub> et PVF pour 4 parités (1/2/3/4) et 5 potentiels de production (500/700/900/1 100/1 300 kg lait). La figure 11a montre les variations observées de la différences ΔPVF = PV<sub>0</sub> - PVF en fonction du potentiel de production et de la parité. La relation n'est pas linéaire et logiquement la chute de poids s'accroît avec le potentiel et la parité. Ces données ont été ajustées par une fonction exponentielle pour tenir compte de l'influence non linéaire du potentiel (POT<sub>1000'</sub> exprimé en 1 000 kg) :

$$\Delta PVF = a \times \exp(0,216 \times (POT_{1000'} - 4)) - 1 \quad [20]$$

Dans cette équation [20] le coefficient « a » dépend de la parité selon une fonction décroissante à l'allure logique compte tenu du fait que la croissance diminue d'une lactation à l'autre (figure 11b).

$$a = 0,767 + 1,221 \times (1 - \exp(-0,619 \times PAR)) \quad [21]$$

Cette modélisation en deux étapes a été appliquée au jeu des données initiales pour avoir une idée de sa précision potentielle, il apparaît que le biais

maximum observé est de 0,5 kg de PV. La méthode proposée permet donc de prédire de façon simple à partir des deux équations [20] et [21] le PV aussitôt après la mise bas en fonction du poids format en tenant compte des principaux facteurs de variation : le potentiel et la parité. Une fois le PV<sub>0</sub> à la mise bas ainsi connu il est possible de dérouler l'ensemble des calculs sur l'évolution des poids, des réserves de la NEC, etc. Il convient de rappeler que ces données concernent des animaux nourris de façon à exprimer leur potentiel de production.

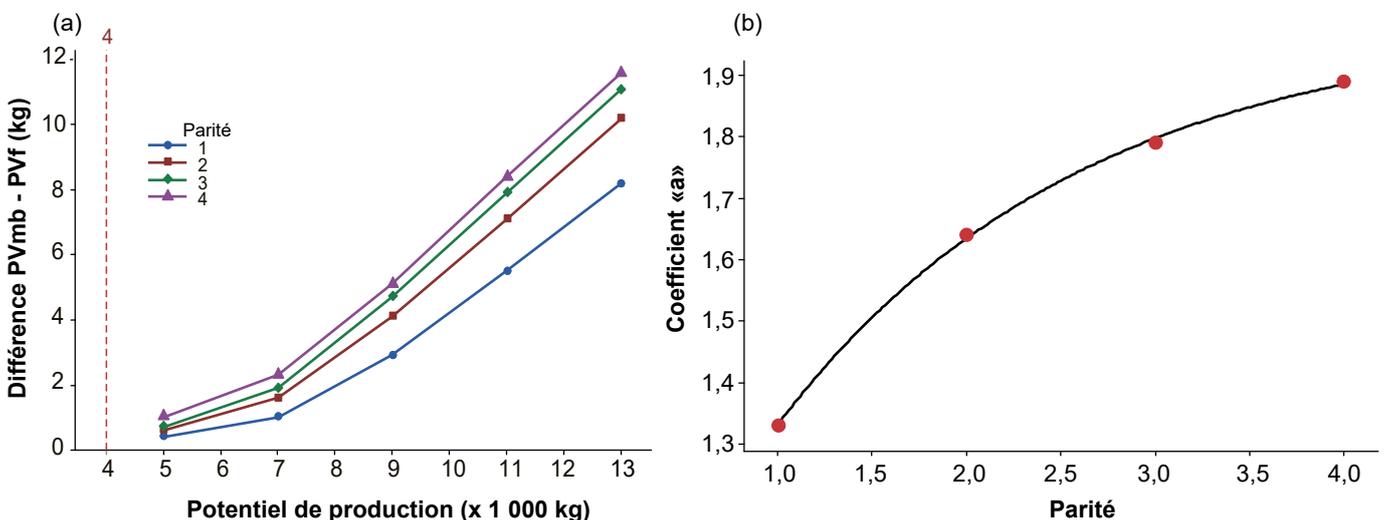
## 4. Calcul et prise en compte de l'évolution de la note d'état corporel (NEC)

### ■ 4.1. Rappel des relations de base entre la NEC et les lipides corporels

La NEC est utilisée pour piloter l'alimentation des chèvres laitières et également des chèvres à viande (Ghosh *et al.*, 2019). Dans le projet Systali nous avons utilisé une relation générale obtenue à l'UMR MoSAR, suite à des abattages et dissections (Morand-Fehr *et al.*, 1991), entre la NEC sternale (NEC<sub>st</sub>) et la teneur en lipides de l'organisme (LIP%PV, Eq. 21.18 d'INRA, 2018).

$$(LIP\%PV - 12,5) = 6,21 \times (NEC_{st} - 3) \quad [22]$$

Figure 11. Influences du potentiel de production sur la chute de poids après mise bas (a) et de la parité sur la variation du coefficient « a » (b) (Eq. 21).



Le bien-fondé de cette équation, en particulier sa pente a été confirmé récemment par Lerch *et al.* (2021), les deux ensembles de données sont présentées dans la figure 12. La pente n'est pas différente entre les deux approches et nous avons donc conservé l'Eq. [22] pour les calculs qui suivent.

#### ■ 4.2. Relations entre les notes de NEC sternales et lombaires.

Comme c'est la note lombaire qui est la plus utilisée sur le terrain, nous avons suggéré dans INRA (2018) d'appliquer une relation générale moyenne souvent admise :

$$\text{NEC\_lomb} = \text{NEC\_st} - 0,5$$

Cette relation a pu être précisée grâce à un ensemble de 553 mesures effectuées sur le site du Pradel (Lefrileux *et al.*, non publié) avec des données de mesures simultanées de NEC\_st ( $3,24 \pm 0,01$ ), de NEC\_lomb ( $2,64 \pm 0,01$ ), de PV ( $68,6 \pm 0,5$  kg), de la parité ( $\text{PAR} = 0,777 \pm 0,017$ ), des nombres de foetus mis bas ( $\text{NBchev} = 1,86 \pm 0,03$ ) et de poids de chevreaux mis bas ( $\text{Pchev} = 8,3 \pm 0,011$  kg) :

$$\begin{aligned} \text{NEC\_lomb} &= 1,363 + 0,465 \\ &\times \text{NEC\_st} - 0,079 \times \text{NBchev} \\ &- 0,098 \times \text{PAR} \end{aligned} \quad [23a]$$

(n = 553,  $R^2 = 0,43$ , ETR = 0,20)

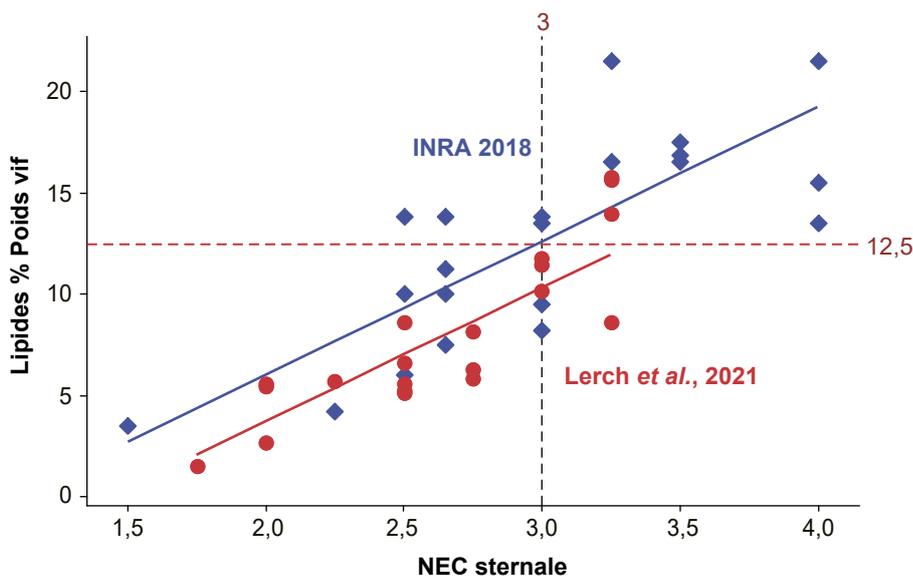
Sur ces mêmes données on obtient la relation globale suivante :

$$\begin{aligned} (\text{NEC\_lomb} - 2,5) &= 0,55 \\ &\times (\text{NEC\_st} - 3) \end{aligned} \quad [23b]$$

(n = 553, R = 0,5, ETR = 0,22)

Les coefficients de NEC\_st ne sont pas significativement différents entre les équations [23a] et [23b]. Les valeurs des NEC\_lomb sont moins étendues que celles des NEC\_st (figure 13a). En conséquence le « poids énergétique » des NEC\_lomb est presque deux fois plus important que celui des NEC\_st, (voir ci-dessous) ce qui nécessite d'être le plus précis possible sur l'évaluation des NEC\_lomb et l'intérêt de l'équation [23a]. Sur un nombre bien plus important de données de la ferme

**Figure 12.** Relations entre la note de NEC sternale et le pourcentage de lipides corporels chez la chèvre, comparaison entre les résultats intégrés dans INRA (2018) et de Lerch *et al.* (2021).



expérimentale caprine du Pradel (Mirabel, France) (n = 21 668), Puillet *et al.* (non publié) ont obtenu un coefficient de pente très proche (0,568) et un ETR comparable. Par ailleurs, lorsque l'on considère un ensemble de 2399 données de NEC\_st ( $3,58 \pm 0,01$ ) et NEC\_lomb ( $2,51 \pm 0,01$ ) de l'élevage de Grignon de l'Unité MoSAR, il y a un écart systématique de 0,215 en faveur du Pradel pour les NEC\_lomb, à NEC\_st égale (figure 13b). Cependant les régressions  $\text{NEC\_lomb} = f(\text{NEC\_st})$  sont parallèles entre les données du Pradel et de Grignon.

Des équations [22] et [23b] on peut déduire la prédiction moyenne de la teneur en lipides du corps en fonction de NEC\_lomb :

$$\begin{aligned} (\text{LIP}\% \text{PV} - 12,5) &= 11,29 \\ &\times (\text{NEC\_lomb} - 2,5) \end{aligned} \quad [24a]$$

Le coefficient de 11,29 (Eq. 24a) par rapport à 6,21 (Eq. 22) confirme le poids énergétique plus important des variations de NEC\_lomb que de celles de NEC\_st. Si 1 point de NEC\_st équivaut à 22,5 UFL (soit 4,43 kg de réserves lipidiques), on en déduit que 1 point de NEC\_lomb  $\Leftrightarrow$  40,9 UFL (soit 8,05 kg de réserves lipidiques). La relation inverse de prévision de la NEC\_lomb autour du pivot [(LIP%PV - 12,5), (NEC\_lomb - 2,5)] est :

$$\begin{aligned} (\text{NEC\_lomb} - 2,5) &= 0,0886 \\ &\times (\text{LIP}\% \text{PV} - 12,5) \end{aligned} \quad [24b]$$

#### ■ 4.3. Calculs de la cinétique de la NEC pour la phase de lactation seule

Avec ces différentes équations de base, il est possible de simuler les évolutions de la NEC lombaire en fonction du stade de la lactation et du potentiel de production, en supposant, comme ci-dessus, que les animaux sont nourris à leur potentiel.

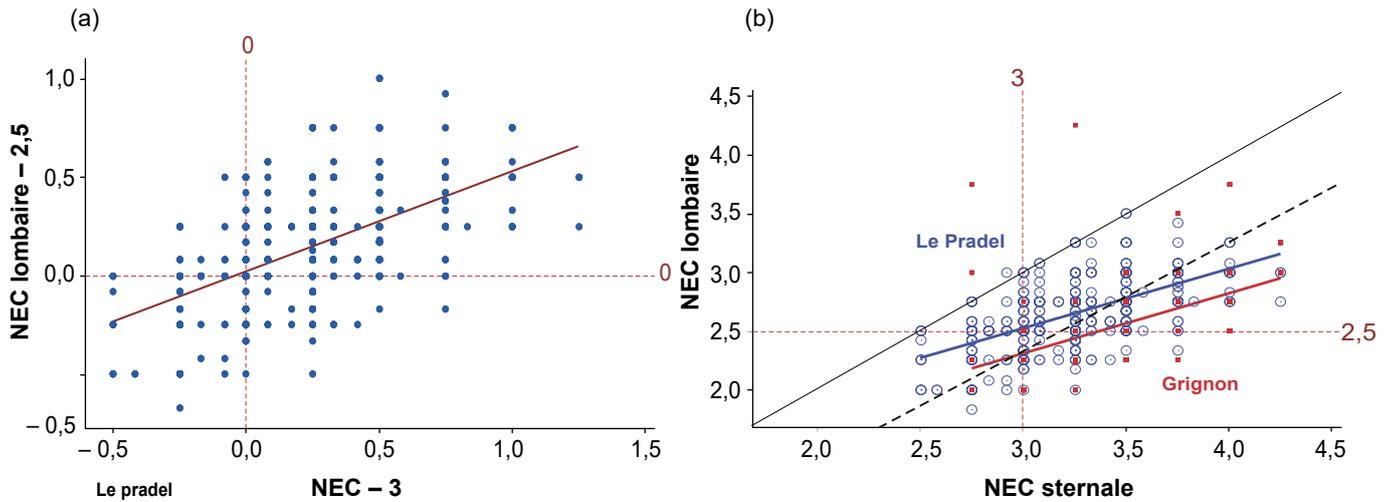
#### ■ 4.4. Prise en compte de la croissance pour le calcul de la NEC

La prise en compte de la croissance se fait à partir de la fonction de croissance présentée plus haut à l'équation 16 [Eq. 16].

Pour évaluer l'évolution de la NEC on doit aussi calculer la croissance moyenne de la masse lipidique au cours du cycle considéré en fonction de la parité à partir de l'Eq. (21.35b) (INRA, 2018) pour prévoir le % Lipides au cours de la croissance, indépendamment de la lactation et de la gestation :

$$\begin{aligned} \text{LIP}\% \text{PVVtr} &= 1,45 \times [15,7 - 14,7 \\ &\times (\exp(-0,0599 \times \text{PVVtr}))] \end{aligned} \quad [25]$$

**Figure 13.** Relation moyenne entre les NEC\_lomb et NEC\_st au Pradel (a) et comparaison des relations établies à partir des données du Pradel et de Grignon (b).



Sachant qu'on a selon l'Eq. 21.34 (INRA, 2018) une relation étroite entre PVV et PV :

$$PVV_{tcr} = -1,94 + 0,907 \times PV_{tcr} \quad [26]$$

On déduit des Eq. 25 et 26 la croissance pondérale de la fraction lipidique (en kg) :

$$PLIP_{tcr} = 0,01 \times LIP\%PVV_{tcr} \times PVV_{tcr} \quad [27]$$

Au stade initial de la mise bas on calcule  $PLIP_{tcr0}$  à partir du  $PVV_{0th}$  de la courbe de croissance ( $PVV_{0th}$ ), lui-même calculé à partir de  $PV_{0th}$  et de l'Eq. [15b]. Pour un cycle donné on peut donc calculer le gain lipidique lié à la croissance seule (en kg) à partir de la mise bas :

$$\Delta LIP_{tcr} = PLIP_{tcr} - PLIP_{tcr0} \quad [28]$$

Cette expression est à ajouter à la variation corporelle des lipides liée aux phases de mobilisation/anabolisme de la lactation (Eq.11c). Pour les lipides corporels en kg on ajoute ceux de la croissance (Eq.8f) à ceux de la lactation (Eq.11c)

$$LIP(L + Cr) = LIP_L + \Delta LIP_{tcr} \quad [29]$$

#### ■ 4.5. Prise en compte de la gestation pour le calcul de la NEC

La prise en compte de la gestation s'effectue à l'aide de la démarche

présentée plus haut en en intégrant l'évolution du PVV et des lipides de l'organisme maternel :

$$LIP(L + Cr + G) = LIP(L + Cr) + \Delta LIP_{gest} \quad [30]$$

Rappelons que pour les calculs de NEC on ne tient pas compte de l'évolution de l'utérus gravide sinon on aurait un accroissement de la NEC en fin de gestation ce qui ne s'observe pas dans la réalité (voir ci-dessous). En effet, la NEC décroît au cours des dernières semaines de la gestation, de façon proportionnelle à l'évolution du PVV maternel présenté partie 2 (figures 6a et b). Cette baisse de la NEC en seconde partie de gestation a été notamment observée en pratique dans les travaux de l'UMR MoSAR grâce à une succession de mesures fréquentes dans le cadre du travail Laporte-Broux *et al.* (2011).

#### ■ 4.6. Calcul de la cinétique globale de la NEC

Comme on dispose des évolutions du PV et des lipides corporels cumulées sur les 3 processus de lactation, croissance et gestation il est possible d'en déduire d'abord l'évolution de la proportion de lipides en % du PV (en excluant l'ensemble foetal)

$$LIP\%PV_{(L+Cr+G)} = 100 \times \frac{LIP_{(L+Cr+G)}}{PV_{(L+Cr+Gmat)}} \quad [31]$$

puis l'évolution des NEC

$$NEC_{st_{(L+Cr+G)}} = 3 + 0,161 \times (LIP\%PV_{(L+Cr+G)} - 12,5) \quad [32]$$

$$NEC_{lomb_{(L+Cr+G)}} = 2,5 + 0,55 \times (NEC_{st} - 3) \quad [33]$$

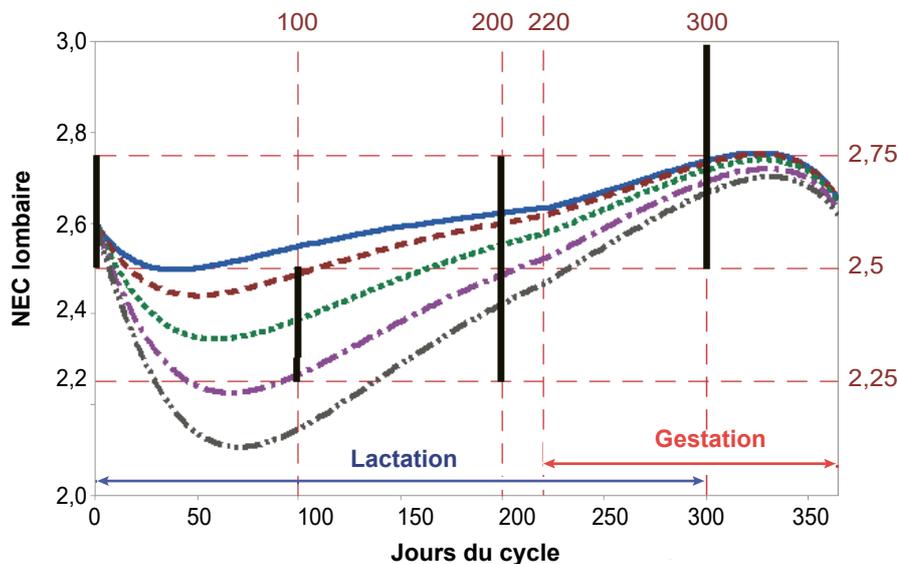
La figure 14 montre les évolutions moyennes de NEC\_lomb pour une chèvre en troisième lactation de 80 kg PV juste après la mise bas (soit environ 65 kg de PVV) possédant 10 kg de réserves lipidiques une NEC\_lomb = 2,5 et une NEC\_st = 3. Cette figure 14 permet de comparer les cinétiques simulées aux valeurs indicatives proposées dans les fiches Casdar-Syscare, on constate logiquement que les animaux à fort potentiel ont tendance à présenter des NEC plus faibles que les références, en particulier à 100 jours.

Comme autre exemple la figure 15 montre les évolutions de la NEC\_sternale chez des chèvres alpines en première lactation présentant une NEC = 3 aussitôt après la mise bas.

Par ailleurs, la figure 16 montre, qu'à potentiel égal, les variations en amplitude de NEC\_sternale sont plus importantes que celles des NEC\_lomb. Ce phénomène est logique compte tenu de ce qui a été indiqué plus haut.

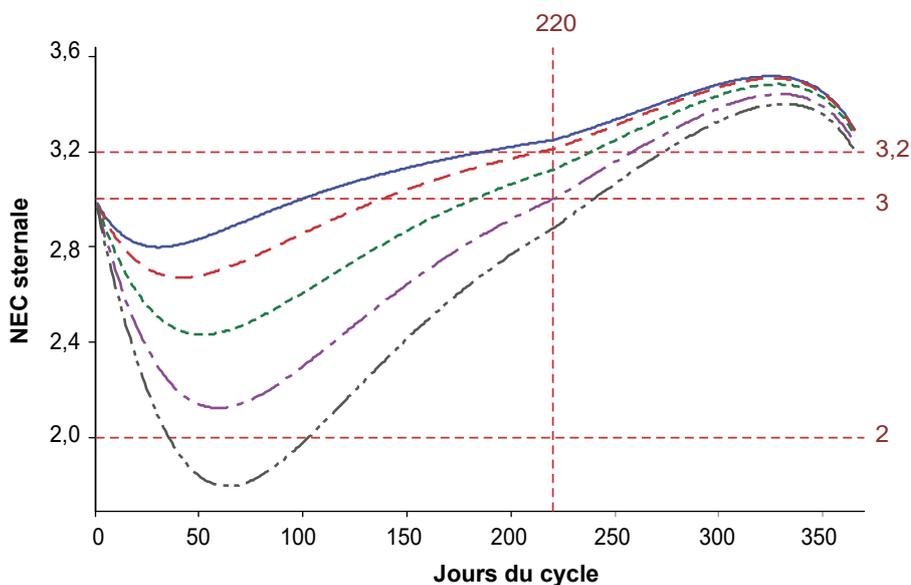
Pour servir de repère pratique ces évolutions peuvent être résumées sur une base mensuelle en fonction du potentiel. Le tableau 2 permet de connaître les évolutions normales de NEC\_st en

**Figure 14.** Évolution simulée de la NEC\_lomb en fonction du stade du cycle et du potentiel de production (500, 700, 900, 1 100, 1 300 kg en 300 j) en tenant compte de croissance et de la gestation et en supposant  $NEC\_lombmb = 2,6$ .



Les barres verticales indiquent les zones « plausibles » de variations de NEC selon les fiches Casdar-Syscare.

**Figure 15.** Évolution simulée de la NEC\_sternale chez des chèvres en première lactation en fonction du stade et du potentiel de production (du haut en bas : 500, 700, 900, 1 100, 1 300 kg/300 j en tenant compte de croissance et de la gestation et en supposant  $NEC\_st\_mb = 3,0$ ).



fonction du mois de lactation et du potentiel de production. Par exemple, une chèvre de potentiel 1 100 kg lait en 300 j aura une chute de NEC\_st de 0,2 point environ au cours du second mois de lactation, sur les 3 premiers mois elle perdra normalement 0,86 point de NEC.

Confrontées à la réalité ces données peuvent servir de repère et peut être aider à un diagnostic d'élevage.

Ultérieurement, ces données pourront servir de base de grilles d'évaluation de la NEC par imagerie 3D (Huau *et al.*, 2020).

## Discussion et conclusion

La démarche présentée dans cet article montre qu'il est possible d'utiliser des équations (énergétiques

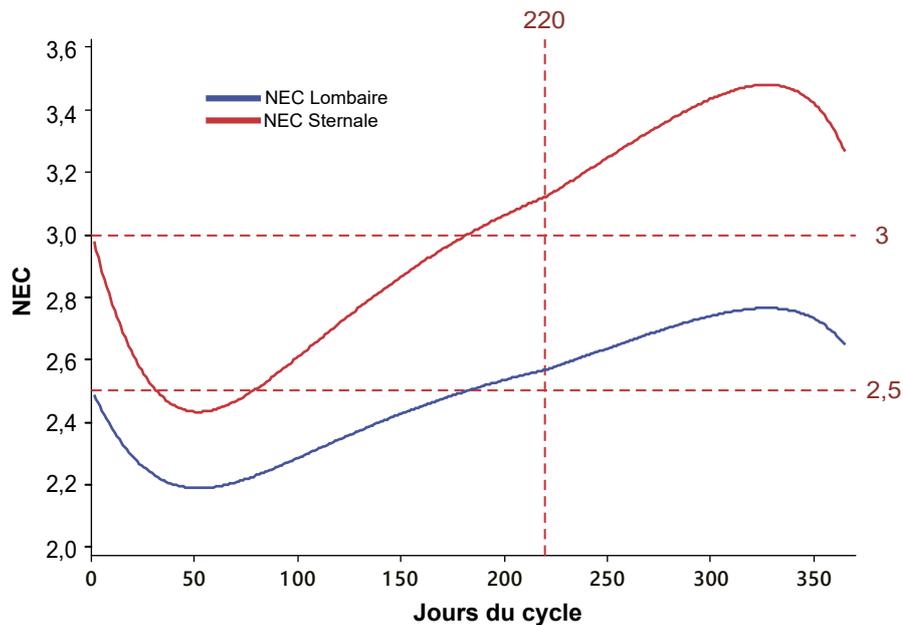
principalement) du modèle INRA 2018 pour prédire les cinétiques de production, de poids vif et de NEC d'une chèvre laitière à l'échelle d'un cycle productif, en prenant en compte les effets liés à la lactation, à la gestation, à la croissance et à l'évolution des contenus digestifs entre deux mises bas. Cette démarche originale s'appuie au maximum sur des données expérimentales et intègre des variables faisant sens sur le terrain (poids format et NEC) pour permettre de se rapprocher au mieux de la réalité, dans l'état actuel des connaissances. Cette démarche a permis d'évaluer la cohérence satisfaisante des différentes équations dynamiques du modèle INRA 2018 (Sauvant et Giger-Reverdin, 2018) et a également montré qu'il était nécessaire de le compléter sur deux principaux points :

i) la cinétique des contenus digestifs en fonction du stade et du potentiel de production,

ii) l'anabolisme de gestation qui se met en place dans la première phase de cet état avant que la mobilisation des réserves maternelles ne devienne dominante. Cet anabolisme dépend de la prolificité et ce point amène à revisiter le calcul des besoins de gestation qui est un peu plus élevé qu'initialement prévu au cours des trois premiers mois de gestation.

Par ailleurs, les cinétiques de poids vif et de NEC sont modulées par le potentiel de production laitière (*via* la variation de l'utilisation des réserves pendant la lactation), par la parité (*via* l'impact de la croissance) et la prolificité (*via* l'impact de la gestation). Il est ainsi possible de représenter de façon dynamique une bonne partie de la variabilité entre les animaux, avec des facteurs de variation accessibles sur le terrain (production laitière, prolificité). Le faisceau de trajectoires moyennes proposé dans ce travail constitue un support intéressant pour l'élaboration du rationnement en lot, où l'éleveur choisit un animal cible, qui évolue selon son potentiel comme c'est le cas dans ce travail. Les cinétiques présentées ici ont ainsi été choisies pour le développement de l'outil INRAtion®V5 – Rumin'Al afin de fournir à l'utilisateur

**Figure 16.** Comparaison des évolutions simulées des NEC\_sternale et NEC\_lomb pour des chèvres de 900 kg de potentiel de production en deuxième lactation.



une tendance pour apprécier l'évolution moyenne de son lot d'animaux, sur la base de son animal cible. Il convient de garder à l'esprit que, les cinétiques proposées supposent de connaître de façon assez précise sur le terrain certains paramètres comme le « poids format » et la NEC à la mise bas etc. Or ces données ne sont que très partiellement connues, ou connues avec assez peu de précision. Donc même

si le modèle est cohérent il devra être validé par les éleveurs et techniciens utilisateurs. Ils seront alors à même de juger de la cohérence entre ces données observées et leurs hypothèses sur les données non connues nécessaires aux calculs des bilans nutritionnels. Une autre piste pour valider les bases conceptuelles du modèle proposé ici serait de tester la démarche de calcul pour la brebis laitière. En effet, l'intérêt

de cette espèce est de présenter un potentiel laitier moindre et une prolificité plus élevée avec par conséquent des profils de mobilisation et de reconstitution des réserves différents de ceux de la chèvre laitière.

Les simplifications nécessaires pour aboutir à un modèle « moyen », facilement utilisable pour le terrain impliquent nécessairement un certain nombre de limites, principalement autour de l'intégration des facteurs à l'origine de la variabilité individuelle des chèvres, ainsi :

i) Les cinétiques sont prédites pour un cycle productif, entre deux mises-bas, avec des stades bien définis (fécondation à 220 jours de lactation par exemple). La démarche n'a pas pris en compte la variabilité des durées des états physiologiques, liée aux performances de reproduction (par exemple échec à l'insémination artificielle et fécondation sur les retours) et à leur gestion (conduite en lactation longue par exemple). Cette prise en compte ne pourra se faire que lorsque les conséquences de ces variations de durées sur les critères considérés (production, évolution des réserves...) auront été quantifiées et modélisées.

**Tableau 2.** Évolution mensuelle moyenne normale des NEC sternales (prises en exemple) en fonction du potentiel laitier.

Mois/Potentiel	500	700	900	1100	1300
1	-0,223	-0,334	-0,502	-0,677	-0,834
2	0,027	-0,034	-0,116	-0,203	-0,278
3	0,068	0,064	0,048	0,023	0,001
4	0,054	0,081	0,103	0,115	0,124
5	0,035	0,070	0,109	0,140	0,166
6	0,020	0,053	0,095	0,134	0,166
7	0,011	0,037	0,076	0,114	0,147
8	0,006	0,025	0,057	0,092	0,123
9	0,003	0,016	0,042	0,072	0,099
10	0,002	0,010	0,031	0,055	0,078

ii) L'intégration de la croissance, et des possibilités de son paramétrage, permet, dans une certaine mesure, la prise en compte de l'effet de la parité sur les cinétiques de poids vif et de NEC. Cependant, cet effet demeure isolé dans le sens où les cycles de production successifs restent dans la trajectoire des potentiels et n'interagissent pas entre eux. Par exemple, la trajectoire de poids vif d'une primipare mal nourrie n'est pas prévisible avec ce modèle ainsi que son arrière-effet sur sa trajectoire en deuxième lactation.

iii) Plus globalement, la représentation centrée sur un cycle productif adoptée dans la démarche conduit à négliger un certain nombre d'interactions entre les stades physiologiques. Par exemple, dans ce modèle, les variations de la prolificité influencent effectivement les phases d'anabolisme et de mobilisation énergétique de la gestation, en revanche elles n'affectent pas la croissance pendant cette même gestation, ni la production laitière pendant la lactation suivante, or on sait que ce facteur existe. Toutefois, par le biais de la NEC à la mise bas, le modèle reflète bien que la prolificité puisse affecter concrètement la dynamique des réserves au cours de la lactation suivante.

iv) Dans le présent modèle, comme dans celui de Puillet *et al.* (2008), la forme de courbe de lactation prise en compte correspond à la forme « classique » la plus fréquemment observée. Or Arnal *et al.* (2018) ont montré en traitant des milliers de données de courbes de production du contrôle laitier caprin que des formes non « classiques » représentaient une part non négligeable des courbes de lactation. Il importe donc de pouvoir préciser les types de trajectoires de l'ingestion et des réserves à associer à ces courbes de lactation. Par ailleurs, le nombre de chèvres conduites en lactation longue est de plus en plus important en France. Un premier travail a permis d'avoir une bonne idée des trajectoires des chèvres en lactation longue (Douhard *et al.*, 2013) et il conviendrait de pouvoir préciser les choses en intégrant en particulier les lactations longues observées lors du

contrôle laitier caprin comme cela a été déjà initié (De Crémoux *et al.*, 2020).

v) Enfin, le présent modèle, comme celui de Puillet *et al.* (2018), n'intègre pas les phénomènes d'adaptation autour de la réalisation du potentiel comme ça a été réalisé à travers les réponses aux pratiques alimentaires (niveaux d'apports de concentré, d'UFL et de PDI autour du pivot, chapitre 6, INRA, 2018). La prise en compte de ces réponses qui sont mesurées à court et moyen terme (3 à 10 semaines en général) devra chercher à prendre en compte des phénomènes d'habituation, ou de rétroaction, ou d'interactions encore non connues entre les pratiques alimentaires et les différents statuts physiologiques. Par exemple, la prédiction de la Capacité d'Ingestion (CI) actuelle (cf. Eq. 21.46 du chapitre 21, INRA, 2018) ne tient pas compte d'une relation négative entre la CI et l'état des réserves, évaluée par la NEC comme cela existe déjà pour les vaches laitières (Faverdin *et al.*, 2018), or on sait depuis longtemps que les chèvres les plus grasses ingèrent moins et réciproquement (Chilliard, 1985). Sur ces aspects, un modèle mécaniste intégrant les relations NEC-engraissement corporel (cf. Eq. 22) et apte à simuler plusieurs lactations successives devrait permettre d'établir une relation négative entre la CI et la NEC qui soit utilisable en pratique. Cet aspect est essentiel si on a l'ambition de mettre en place des stratégies alimentaires réalistes à long terme. Par ailleurs, le modèle proposé n'intègre pas d'autres perturbations environnementales que celles évoquées ci-dessus, par exemple les situations de stress thermique ne sont pas prises en compte, il en est de même pour l'influence de la photopériode, qui a été démontrée (Chilliard et Bocquier, 2000), et de la saison de mise bas dont on connaît les effets sur la courbe de lactation.

Les limites évoquées ci-dessus ouvrent des perspectives intéressantes pour faire progresser les connaissances sur l'évolution des trajectoires individuelles des chèvres laitières. Une première perspective de ce travail est l'intégration des équations proposées

dans des modèles mécanistes existants, à l'échelle de l'animal entier (Puillet *et al.*, 2008 ; Martin et Sauvant, 2010 ; Daniel *et al.*, 2017). Ce type de modèles intègre la partition de l'énergie entre les fonctions biologiques et la coordination de cette partition en fonction des stades physiologiques. Ainsi, il serait possible de mieux simuler les interactions entre stades, au cours des cycles de production successifs. En retour, la démarche proposée ici permettra d'actualiser ces modèles sur les bases biologiques spécifiques à la nutrition de la chèvre laitière.

Une deuxième perspective de ce travail est la valorisation des données issues du phénotypage. Les progrès réalisés dans l'automatisation de la collecte de données en élevage permettent d'accéder à des données plus fréquentes et sur un plus grand nombre d'individus. Des travaux en cours (Huau *et al.*, 2020) ouvrent également la voie à une estimation de la NEC de façon automatique. Ces séries temporelles phénotypiques peuvent être utilisées dans des modèles d'interprétation (par exemple, PV : (Puillet *et al.*, 2010a ; Puillet et Martin, 2017 ; NEC : Macé *et al.*, 2020) pour produire des indicateurs synthétiques, résumant la trajectoire productive à long terme de la chèvre. Ces indicateurs, issues de dynamiques réelles observées en élevage, peuvent être combinés avec les dynamiques de PV et de NEC prédites par les approches nutritionnelles, pour mieux comprendre le déroulement de la carrière d'une chèvre laitière au cours des cycles productifs, en fonction de son environnement alimentaire et des facteurs de variation individuels comme le potentiel laitier ou la prolificité. Ce type d'approche, combinant nutrition et phénotypage, contribuera à une meilleure connaissance de l'efficacité alimentaire chez la chèvre laitière, en intégrant mieux le rôle clé des réserves corporelles et l'aspect temps long, *via* la prise en compte des cycles successifs de production (Puillet *et al.*, 2010a). Elle contribuera également à une meilleure compréhension de la variabilité individuelle, élément essentiel à l'élaboration du rationnement en lot (Puillet *et al.*, 2010b).

## Références

- Arnal M., Robert-Granié C., Larroque H., 2018. Diversity of dairy goat lactation curves in France. *J. Dairy Sci.*, 101, 11040-11051. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14980>
- Castagnino de Souza D., Härter C.J., Rivera A.R., Dorneles de Lima L., de Oliveira Silva H.G., Biagioli B., Resende K.T., Teixeira I.A., 2015. Changes in maternal body composition and metabolism of dairy goats during pregnancy. *R. Bras. Zootec.*, 44, 92-102. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902015000300003>
- Chilliard Y., 1985. Métabolisme du tissu adipeux, lipogenèse mammaire et activités lipoprotéine-lipidiques chez la chèvre au cours du cycle gestation-lactation. Thèse Doc. État es-Sci., Univ. Paris 6, France, 134pp., 1323 ref.
- Chilliard Y., Bocquier F., 2000. Direct effects of photoperiod on lipid metabolism, leptin synthesis and milk secretion in adult sheep. In: *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Symp. Rum. Physiol.*, Pretoria (ZAF), 18-22 Oct. 1999. CAB Intern., 2000. *Rum. Physiol. Digestion Metabol., Growth Reprod.*, (Ed. P.B. Cronje), 12, 205-223. <https://doi.org/10.1079/9780851994635.0205>
- Chilliard Y., Sauvant D., Hervieu J., Dorleans M., Morand-Fehr P., 1977. Lipoprotein lipase activity and composition of omental adipose tissue as related to lipid metabolism of the goat in late pregnancy and early lactation. *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.*, 17, 1021-1033. <https://doi.org/10.1051/rnd:19770809>
- Chilliard Y., Sauvant D., Morand-Fehr P., Delouis C., 1987. Relations entre le bilan énergétique et l'activité métabolique du tissu adipeux de la chèvre au cours de la première moitié de la lactation. *Reprod. Nutr. Dev.*, 27, 307-308. <https://doi.org/10.1051/rnd:19870263>
- Contrôle laitier caprin, 2015. Résultats du Contrôle Laitier de l'année 2015, espèce caprine. 31p. Idèle et FCEL.
- Daniel J.B., Friggens N.C., van Laar H., Ingvarsen K.L., Sauvant D., 2017. Modeling homeorhetic trajectories of milk component yields, body composition and dry-matter intake in dairy cows: Influence of parity, milk production potential and breed. *Animal*, 12, 1182-1195. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002828>
- De Crémoux R., Legris M., Clement V., 2020. Évaluation de la variabilité inter-élevage des carrières et des performances des chèvres conduites en lactation longue. *Renc. Rech. Rum.*, 25, 580.
- Douhard F., Friggens N.C., Tessier J., Martin O., Tichit M., Sauvant D., 2013. Characterization of a changing relationship between milk production and liveweight for dairy goats undergoing extended lactation. *J. Dairy Sci.*, 96, 5698-5711. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6374>
- Ghosh C.P., Datta S., Mandal D., Das A.K., Roy D.C., Roy A., Tudu N.K., 2019. Body condition scoring in goat: Impact and significance. *J. Entomol. Zool. Studies*, 7, 554-560.
- Härter C.J., Lima L.D., Silva H.G.O., Castagnino D.S., Rivera A.R., Resende K.T., Teixeira I.A.M.A., 2017. Energy and protein requirements for maintenance of dairy goats during pregnancy and their efficiencies of use. *J. Anim. Sci.*, 95, 4181-4193. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1490>
- Huau C., Pommaret A., Augerat D., Marechal P., Delattre L., Rupp R., 2020. L'imagerie 3D : une autre méthode d'évaluation de l'état corporel chez la chèvre Alpine. *Renc. Rech. Rum.*, 25, 61.
- INRA, 2018. Alimentation des ruminants. Éditions Quae, Versailles, France, 728p.
- Laporte-Broux B., Christine Duvaux-Ponter C., Roussel S., Promp J., Chavatte-Palmer P., Ponter A., 2011. Restricted feeding of goats during the last third of gestation modifies both metabolic parameters and behaviour. *Livest. Sci.*, 138, 74-88. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.12.008>
- Leitch S., de la Torre A., Huau C., Monziols M., Xavier C., Le Cozler L.L.Y., Faverdin P., Lambertson P., Chery I., Heimo D., Loncke C., Schmidely P., Pires J.A.A., 2021. Estimation of dairy goat body composition: A direct calibration and comparison of eight methods. *Methods*, Elsevier, In press. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.06.014>
- Macé T., Hazard D., Carrière F., Douls S., Foulquié D., González García E., Masoomah T., 2020. PhenoBR: a model to characterise T. variations of body reserves in meat ewes. 71<sup>th</sup> Ann. Meeting Eur. Assoc. Anim. Prod., Virtual Meeting, Portugal. 672p. <https://hal.inrae.fr/hal-03197881>
- Martin O., Sauvant D., 2010. A teleonomic model describing performance (body, and intake) during growth and over repeated reproductive cycles throughout the lifespan of dairy cattle. 1. Trajectories of life and function priorities and genetic scaling and 2. Voluntary intake and energy partitioning. *Animal*, 4, 12, 2030-2056. <https://doi.org/10.1017/S1751731110001357>
- Morand-Fehr P., Schmidely P., Hervieu J., Bas P., 1991. Évaluation de la teneur en lipides des chèvres laitières selon leur stade physiologiques par les notes d'état corporel, des paramètres zootechniques et métaboliques. *Options Méditerranéennes. Série A*, 13, 69-73.
- Puillet L., Martin O., 2017. A dynamic model as a tool to describe the variability of lifetime body weight trajectories in livestock females. *Journal of Animal Science*, 95, 4846-4856. <https://doi.org/10.2527/jas2017.1803>
- Puillet L., Martin O., Tichit M., Sauvant D., 2008. Simple representation of physiological regulations in a model of lactating female: application to the dairy goat. *Animal*, 2, 235-246. <https://doi.org/10.1017/S1751731107001140>
- Puillet L., Sauvant D., Tichit M., 2010a. Intérêts et limites de la prise en compte de la variabilité individuelle dans les modèles de fonctionnement du troupeau. *INRA Prod. Anim.*, 23, 255-268. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2010.23.3.3307>
- Puillet L., Martin O., Sauvant D., Tichit M., 2010b. An individual-based model simulating goat response variability and long-term herd performance. *Animal*, 4, 2084-2098. <https://doi.org/10.1017/S1751731110001059>
- Sauvant D., Giger-Reverdin S., 2018. «Alimentation des caprins». Chap 21. In *Alimentation des Ruminants*. 728p. Éditions Quae, Versailles, France.
- Sauvant D., Chilliard Y., Bas P., Morand-Fehr P., 1979. Goat adipose tissue mobilization and Milk production level. *Annales de Recherches Vétérinaires, INRA Éditions*, 10, 404-407.
- Sauvant D., Robert J.C., Legendre D., Ternois F., Hervieu J., Duron M., 1986. Relations entre les sécrétions mammaires et les teneurs en nutriments énergétiques et azotés sanguins chez la chèvre au début de la lactation. *Reprod. Nutr. Dev.* 26, 589-595. <https://doi.org/10.1051/rnd:19860408>
- Sauvant D., Chilliard Y., Morand-Fehr P., 1991. Etiological aspects of nutritional and metabolic disorder of goats. In: «Goat Nutrition», 124-142, EAAP Publication n° 46.
- Sauvant D., Nozière P., Ortigues-Marty I., 2018. « Dépenses, efficacité métabolique et besoins en énergie ». Chap 6. In *Alimentation des Ruminants*. 728p. Éditions Quae, Versailles, France.
- Sauvant D., Chapoutot P., Giger-Reverdin S., Bluet B., 2021. Extension spatio-temporelle du modèle chèvre INRA 2018 : 1. Application à l'alimentation en lots. *INRAE Prod. Anim.*, 34, 305-326. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.4.5354>
- Schmidely P., Bas P., Morand-Fehr P., Hervieu J., Rouzeau A., 1995. *Options Méditerranéennes. Série A*, 27, 141-150.

## Résumé

L'objectif de ce travail était de simuler les évolutions du Poids Vif (PV), de ses composantes (ex. les réserves corporelles) et de la Note d'État Corporel (NEC) des chèvres sur un cycle de production en s'appuyant sur les relations dynamiques du modèle nutritionnel caprin INRA 2018. Dans un premier temps, l'approche a considéré de façon distincte les phénomènes de changement de poids vif liés à la lactation, la gestation et la croissance. En effet, la nature des informations disponibles *a priori* et les démarches calculatoires n'étaient pas les mêmes pour ces trois états physiologiques. Pour les situations considérées, un modèle original d'évolution des contenus digestifs au cours d'un cycle productif a été développé pour aboutir à des évolutions du PV et du PV vide (PVV), défini comme le poids maternel hors contenus digestifs et utérus

gravide. Pour la lactation, la démarche a consisté à utiliser les équations de la dynamique des réserves énergétiques pour déterminer les bilans énergétiques cumulés puis les cinétiques de PVV, en intégrant l'effet du potentiel de production laitière. Pour la gestation, l'approche a consisté à utiliser les cinétiques de PV puis de PVV, pour distinguer la cinétique pondérale de l'utérus gravide, fonction de la prolificité, et la cinétique pondérale de l'organisme maternel seul. Pour ce dernier, une approche originale a permis d'estimer l'anabolisme maternel en début de gestation et le catabolisme en seconde partie de gestation en intégrant l'effet de la prolificité. Les cinétiques de PV et PVV au cours des trois états physiologiques ont été combinées pour prédire la cinétique globale sur un cycle productif. Il a ainsi été possible de proposer une méthode d'estimation des cinétiques de PV à partir de la donnée du « poids vif format » (PVF correspondant au PV minimal atteint pendant un cycle productif). Enfin, la prédiction des cinétiques des NEC a été possible grâce aux relations disponibles entre la NEC sternale et la teneur en lipides corporels, ainsi qu'entre les NEC sternales et lombaires. Les évolutions de la NEC ont été calculées en séparant les phases de lactation, croissance et gestation, en particulier pour s'appuyer sur l'évolution de l'organisme maternel indépendamment de celle de l'utérus gravide. Ce modèle a été intégré dans le module « chèvres laitières » du logiciel de rationnement INRAration®V5 – Rumin'AI afin de pouvoir tracer les dynamiques d'évolution du PV et de la NEC correspondant au potentiel des animaux afin de les comparer aux valeurs réelles.

## Abstract

### **Spatio-temporal extension of the INRA 2018 goat model. 2. Dynamic changes of body reserves, body weight and body condition score throughout a whole productive cycle**

*The objective of this study was to use the dynamic relationships of the INRA 2018 nutritional model to simulate changes of body weight (BW), its components (e.g. body reserves) and body condition score (BCS) of goats throughout a whole productive cycle. In a first step, the approach considered separately the changes induced by lactation, gestation and growth as available information and computing steps were not the same for the three physiological stages. A model of gut contents was used to achieve the prediction of BW and empty body weight (EBW). For lactation, equations for energy changes in body reserves were used to determine cumulated energy balance and then BW dynamics, accounting for the effect of milk production potential. For gestation, BW and EBW dynamics were used to differentiate gravid uterus, depending on prolificacy, from maternal mass. For this latter, an original approach allowed the estimation of maternal anabolism in early gestation and catabolism in late gestation, both depending on the effect of prolificacy. For growth, the approach based on BW at birth and at maturity did not raise specific problems. Dynamics of BW and EBW for the 3 physiological stage were combined to predict the overall dynamics throughout a productive cycle, and the BW "format" was integrated as an input parameter. Finally, predicting BCS was based on relationships between sternal BCS and lipid content in BW. Equations for converting sternal BCS into lumbar BCS were also proposed. BCS dynamics were computed for each physiological stages, in particular during gestation to account for maternal mass changes. All these equations were included in the Ruminal'caprin software.*

SAUVANT D., PUILLET L., BLUET B., 2022. Extension spatio-temporelle du modèle chèvre INRA 2018 : 2. L'évolution de la dynamique des réserves, du poids vif et de la NEC sur un cycle productif. INRAE Prod. Anim., 35, pages 73-90.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2022.35.1.5492>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.