

# Modélisation individuelle de la reproduction des vaches Holstein intégrant les effets de la production laitière et des réserves corporelles

BRUN-LAFLEUR L. (1, 2, 3), CUTULLIC E. (1, 2, 4), FAVERDIN P. (1, 2), DELABY L. (1, 2), DISENHAUS C. (1, 2)

(1) INRA, UMR1080 Production du Lait, F-35590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus-Ouest, UMR1080 Production du Lait, F-35000 Rennes, France

(3) Institut de l'Élevage, F-35652, Le Rheu, France

(4) Swiss College of Agriculture, Länggasse 85, 3052 Zollikofen, Suisse

**RÉSUMÉ** - La reproduction est un élément déterminant de la productivité et de la démographie des troupeaux. La dégradation des performances de reproduction au cours des dernières décennies a réduit la longévité des vaches et allongé les lactations. Ces performances sont sensibles à la production laitière et à l'état corporel, eux-mêmes influencés par la conduite du troupeau, notamment son alimentation. Les modèles de simulation individu-centrés permettent de simuler les conséquences des pratiques d'élevage sur les performances des troupeaux laitiers et d'estimer leur variabilité. Un modèle individuel dynamique et stochastique de la reproduction a donc été développé pour la race Holstein à partir de données issues d'une expérimentation récente. Ce modèle couvre le processus de reproduction dans sa globalité et est composé d'une succession d'événements tels que le vêlage, les ovulations, la fécondation et l'éventuelle interruption de gestation. Chaque étape est sensible à la production laitière, à la note d'état corporel ou à leurs variations. Le modèle prend en considération les évolutions récentes des caractéristiques reproductives des vaches, notamment concernant la cyclicité (fréquence des anomalies, durée des cycles), l'expression des chaleurs et les composantes de la fertilité (non-fécondation ou mortalité embryonnaire précoce, mortalité embryonnaire tardive). Une analyse de sensibilité du modèle à la production laitière et à la note d'état corporel au vêlage a été réalisée. L'intervalle entre vêlages et le taux de vêlage simulés sont cohérents avec les résultats observés dans les troupeaux français de race Holstein. Ce modèle pourrait être utilisé dans les modèles de fonctionnement du troupeau pour tester l'effet sur la démographie et la production du troupeau de différentes stratégies d'élevage, notamment la conduite de l'alimentation et de la reproduction.

## An individual reproduction model in Holstein dairy cows taking into account milk yield and body condition

BRUN-LAFLEUR L. (1, 2, 3), CUTULLIC E. (1, 2, 4), FAVERDIN P. (1, 2), DELABY L. (1, 2), DISENHAUS C. (1, 2)

(1) INRA, UMR1080 Production du Lait, F-35590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus-Ouest, UMR1080 Production du Lait, F-35000 Rennes, France

(3) Institut de l'Élevage, F-35652, Le Rheu, France

**SUMMARY** - Reproduction is a key-driver of milk productivity and herd demography. The decline in reproductive performance over the last decades has decreased the life span of cows and increased the length of lactation. This performance is affected by variations in milk yield and body condition score, which in turn are influenced by herd management, in particular feeding management. Individual-based herd simulation models enable the simulation of the consequences of different management strategies on dairy herd performance and the assessment of its variability. A dynamic and stochastic individual reproduction model was developed for the Holstein breed from data from a recent experiment. This model covered the whole reproductive process and was composed of a succession of discrete events, namely calving, ovulations, conception and possible pregnancy interruption. Each stage in reproduction was affected by milk yield, body condition or their changes. The model takes into account recent evolutions in reproductive performance, in particular concerning cyclicity (frequency of abnormalities, cycle length), poor oestrous expression and fertility parameters (fertilisation failure or early embryonic loss, late embryonic loss). The sensitivity of the model to milk yield and body condition score at calving was tested. The simulated calving interval and re-calving rate were consistent with the reproductive performance observed in French Holstein herds. This model could be used in herd simulation models to test the effects of management strategies (feeding and reproductive management) on herd production and demography.

## INTRODUCTION

La reproduction est un élément déterminant de la dynamique du troupeau et de sa production laitière. Son influence s'est récemment amplifiée du fait du déclin des performances de reproduction des vaches laitières. Tout modèle individu-centré de fonctionnement du troupeau, utile pour prédire et anticiper la réponse de la production laitière aux pratiques d'élevage, se doit donc d'intégrer un sous-modèle de reproduction fiable. Par ailleurs, comme la fonction de reproduction est sensible à la lactation et à la gestion des réserves corporelles, les stratégies de conduite (alimentation, fréquence de traite...) qui affectent ces facteurs, affectent également les performances de reproduction.

Notre objectif est donc de construire un modèle biologique de reproduction adapté aux génotypes actuels et sensible à

l'état de l'animal, en particulier à sa production laitière et à ses réserves corporelles.

## 1. DESCRIPTION DU MODÈLE DE SIMULATION

### 1.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DU MODÈLE ET ORIGINE DES ÉQUATIONS

Le modèle de reproduction destiné à simuler de manière dynamique des impacts sur le troupeau se doit de représenter pour chaque vache l'ensemble des étapes du processus reproductif, de manière dynamique et stochastique. Le modèle proposé par Oltenacu *et al.* (1980) et souvent utilisé simule le déroulement de la reproduction dans sa globalité, mais ne représente plus de façon satisfaisante les performances de reproduction des vaches laitières actuelles. Nous avons donc choisi de développer un

modèle de reproduction dont la structure s'inspire de ce modèle précurseur, mais construit à partir d'une source de données récente et, dans la mesure du possible, unique, afin de garantir une cohérence du modèle. La base de données utilisée est issue des travaux conduits sur le domaine INRA du Pin-au-Haras (61) et détaillés par Cutullic (2010) et Cutullic *et al.* (2011a,b). Son originalité réside dans le découplage partiel entre la production laitière (PL) et la note d'état corporel (NEC), habituellement fortement corrélées chez les vaches laitières, qui a permis de distinguer leurs effets respectifs sur les différentes étapes de la reproduction.

## 1.2. STRUCTURE DU MODÈLE ET CHOIX DES ÉQUATIONS

Le modèle est représenté comme une suite de processus ponctuels se déclenchant les uns les autres. La figure 1 représente l'articulation des processus et leurs principales fonctions.

L'analyse de la base de données a permis i) de montrer que les différentes étapes de reproduction sont significativement affectées par la PL, la NEC et leurs variations, et ii) de construire les équations du modèle (tableau 1).

La cyclicité est affectée par les réserves corporelles : la reprise de cyclicité est retardée par une NEC faible en début de lactation ; la fréquence des phases lutéales prolongées est élevée lorsque la vache ovule alors qu'elle est en train de maigrir fortement ; et les cycles courts sont plus fréquents lorsque la vache a beaucoup maigri et qu'elle est en train de reprendre de l'état. L'expression des chaleurs est amoindrie par une production de lait élevée au moment de l'ovulation et, dans une moindre mesure, par une NEC faible. Enfin, la fertilité est affectée à la fois par la NEC et la PL : la probabilité de fécondation est moins élevée pour les vaches fortes productrices dont la NEC minimale est très faible, et les mortalités embryonnaires tardives sont plus fréquentes pour les vaches ayant une courbe de PL avec un pic élevé et une faible persistance.

L'intensité de l'expression des chaleurs associées à une ovulation a été modulée suivant 3 types : type 1 = sans aucun signe comportemental ou seulement des signes discrets ; type 2 = avec chevauchement, sans acceptation du chevauchement ; type 3 = avec acceptation du chevauchement. Le modèle prend en compte l'interaction entre vaches pour l'expression des chaleurs, chacune exprimant mieux ses chaleurs lorsqu'au moins une autre ovule le même jour.

## 2. ANALYSE DE SENSIBILITÉ À LA PRODUCTION LAITIÈRE ET À L'ÉTAT CORPOREL, ET COMPARAISON AUX DONNÉES OBSERVÉES

### 2.1. DESCRIPTION DES SIMULATIONS

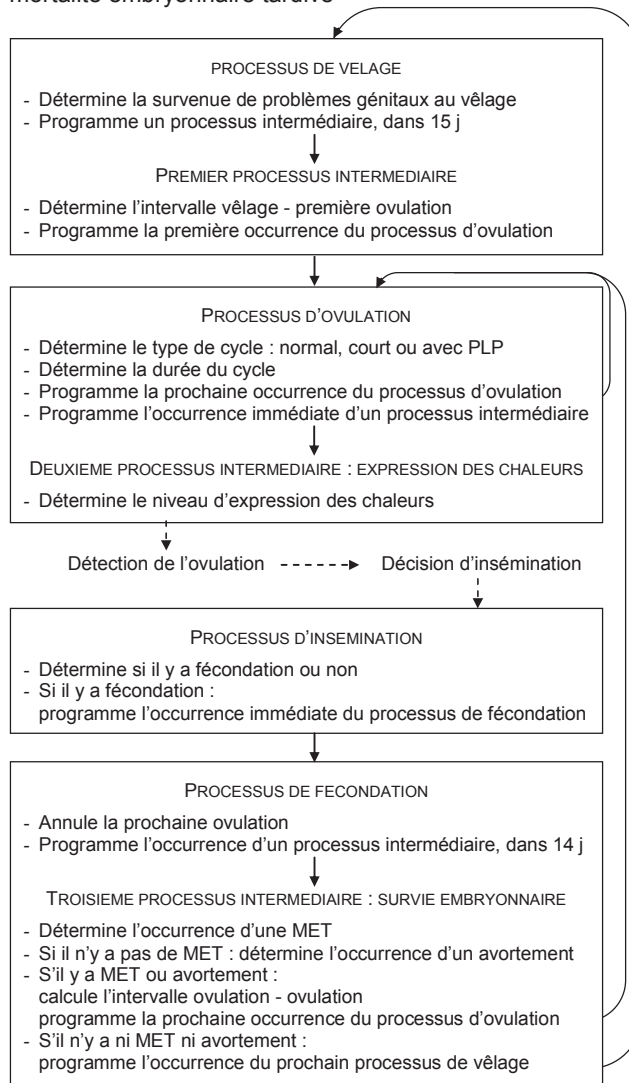
#### 2.1.1. Animaux

Chaque simulation a été réalisée sur un groupe de 50 vaches identiques, de race Holstein, en 3ème lactation, vêlant en novembre à 50 mois d'âge et après 60 j de tarissement.

La PL a été calculée à l'aide du modèle d'évaluation génétique basé sur les contrôles élémentaires (Leclerc *et al.*, 2008) qui intègre la parité, l'âge au vêlage, le mois de vêlage, la durée de tarissement et les stades de lactation et de gestation. Une constante,  $PL_{indiv}$  (kg/j), simule le niveau général de la PL. Elle correspond ici au niveau de PL à environ 110 j de lactation. La NEC a été modélisée à partir des données des multipares du troupeau expérimental utilisé pour construire le modèle :

$$NEC = NEC_{v\acute{e}l} \times \left[ \begin{array}{l} (1.3 - 0.020 \times PL_{max}) \\ + (-0.3 + 0.020 \times PL_{max}) \times \exp(-0.24 \times Sem_{lact}) \\ + (-0.0045 + 0.00035 \times PL_{max}) \times Sem_{lact} \end{array} \right]$$

**Figure 1** Schéma de fonctionnement du modèle représentant les actions des processus ponctuels. Les flèches en trait plein représentent le déclenchement par un processus du processus suivant. L'intervention de l'éleveur, extérieure au strict modèle de reproduction, est représentée par les flèches en pointillés.



#### 2.1.2. Conduite de la reproduction par l'éleveur

Afin de tester la sensibilité du modèle biologique, la conduite de la reproduction a été rendue peu contraignante. L'éleveur insémine toutes les vaches qu'il juge en chaleur. La détection des ovulations par l'éleveur est bonne, avec des taux de détection de 0,20, 0,80 et 0,90 respectivement pour les ovulation avec expression des chaleurs de type 1, 2 et 3, et un taux quotidien de fausses détection de 0,0002. Les inséminations peuvent être réalisées à partir de 50 j après vêlage et jusqu'à la fin de la simulation.

#### 2.1.3. Plan d'expérience

La sensibilité à la PL et à la NEC a été testée grâce à un plan factoriel complet avec trois niveaux de PL et trois niveaux de NEC au vêlage ( $NEC_{v\acute{e}l}$ ) (figure 2). Chacun des neuf traitements a été testé à l'aide de 20 simulations de 600 j à partir du vêlage.

## 2.2. CHOIX DES VARIABLES ÉTUDIÉES ET ANALYSE STATISTIQUE

Le taux de revêlage, défini comme le pourcentage de vaches initiales vêlant une nouvelle fois au cours de la simulation (i.e. avec insémination fécondante avant 320 j), et l'intervalle vêlage-vêlage moyen (IVV, j) ont été choisis comme variables agrégées représentant la réussite de la reproduction à l'échelle du troupeau.

**Tableau 1** Équations utilisées dans le modèle de reproduction

Équation <sup>a</sup>	Numéro
Problèmes génitaux au vêlage (PGV) $P(PGV) = 0,28$	1
Intervalle vêlage - première ovulation (IVO, j) <sup>b</sup> Tirage de $\ln(IVO+4)$ dans une distribution normale de moyenne $\mu$ et d'écart-type $\sigma$ $\mu = 4,834 - 0,222 \times multi + 0,221 \times pgv - 0,939 \times NEC_{v\acute{e}l+30} + 0,152 \times NEC_{v\acute{e}l+30}^2$ $\sigma = 0,600 - 0,182 \times multi$	2 3
Expression des chaleurs <sup>c</sup> pour la première ovulation : $P(type3) = 0,027 + 0,211 \times autOv + 0,05$ , $P(type2) = 0,041 + 0,102 \times autOv + 0,05$ pour les ovulations suivantes : $P(type3) = \frac{1}{1+A+B} + 0,05$ , $P(type2) = \frac{A}{1+A+B} + 0,05$ où $A = \exp(-2,866 - 0,264 \times autreOv + 0,0422 \times PL + 0,338 \times NEC)$ , et $B = \exp(-1,097 - 1,081 \times autOv + 0,0832 \times PL - 0,557 \times NEC)$ pour toutes les ovulations : $P(type1) = 1 - P(type2) - P(type3)$	4, 5 6, 7 8 9 10
Type de cycle <sup>d</sup> $P(cycleNormal) = \frac{1}{1+A+B}$ , $P(cycleCourt) = \frac{A}{1+A+B}$ , $P(PLP) = \frac{B}{1+A+B}$ où $A = \exp(-5,298 + 4,763 \times ovul1 + 2,669 \times NEC_{dyn} - 1,863 \times NEC_{dif})$ et $B = \exp(-2,461 + 0,474 \times ovul1 - 1,422 \times NEC_{dyn} + 0,306 \times NEC_{dif})$	11, 12, 13 14 15
Durée de cycle Pour un cycle normal : tirage dans une distribution normale de moyenne 22,75 j et d'écart-type 3,17 j Pour un cycle court : tirage dans une distribution normale de moyenne 10,70 j et d'écart-type 1,66 j Pour les cycles avec PLP : 31 j plus tirage dans une loi exponentielle de paramètre 0,0307	16 17 18
Fécondation à l'insémination $P(f\acute{e}condation) = \frac{A}{1+A} \times k_1$ où $A = \exp(-2,064 + 0,696 \times NEC_{min} + 1,386 \times delaiSup50)$ , $k_1 = 1 - 0,02 \times (PL_{indiv} - 30)$	19 20, 21
Interruption de gestation par mortalité embryonnaire tardive (MET) ou avortement <sup>f</sup> $P(MET / f\acute{e}condation) = \frac{A}{1+A}$ où $A = \exp\left(-1,3438 - 5,7696 \times \frac{PL_{f+14} - MY_{f-14}}{28}\right)$ $P(avortement / (f\acute{e}condation, pasDeMET)) = 0,03$	22, 23 24
Intervalle ovulation – ovulation en cas d'interruption de gestation En cas de MET : tirage dans une loi uniforme entre 25 et 50 j En cas d'avortement : tirage dans une loi uniforme entre 50 et 250 j	25 26

<sup>a</sup>  $P(X)$  est la probabilité de X et  $P(X/Y)$  la probabilité de X sachant Y.

<sup>b</sup> *multi* est égal à 1 pour les multipares et à 0 pour les primipares ; *pgv* est égal à 1 si il y a eu des problèmes génitaux au vêlage et à 0 sinon ;  $NEC_{v\acute{e}l+30}$  est la NEC 30 j après le vêlage

<sup>c</sup> *type 1*, *type 2* et *type 3* sont les niveaux croissants d'expression des chaleurs ; *autOv* est égal à 1 si au moins une autre vache ovule le même jour et à 0 sinon.

<sup>d</sup> *ovul1* est égal à 1 pour la première ovulation suivant le vêlage et à 0 pour les suivantes ; *NEC<sub>dyn</sub>* représente la dynamique de la NEC et est calculée par la variation de NEC durant les 30 j précédant l'ovulation ; *NEC<sub>dif</sub>* est la différence de NEC entre le vêlage et le jour de l'ovulation ; PLP = phase lutéale prolongée

<sup>e</sup>  $NEC_{min}$  est la valeur minimale prise par la NEC entre le vêlage et l'insémination ; *delaiSup50* est égal à 1 si le délai entre vêlage et insémination est supérieur à 50 j et à 0 sinon.

<sup>f</sup>  $PL_{f+14}$  et  $PL_{f-14}$  sont les valeurs de la PL 14 j après et 14 j avant la fécondation respectivement.

**Tableau 2** Effet de la PL<sub>indiv</sub> (réponse pour 10 kg de lait) et de la NEC (réponse pour 1 point de NEC) sur les performances de reproduction. Seuils de significativité : \*\*\*P<0,001 ; \*\* P<0,01 ; \* P<0,05.

	moyenne ± écart-type	min - max	PL <sub>indiv</sub>	NEC <sub>vêl</sub>	interaction
taux de revêlage (%)	78,7 ± 8,1	54,0 - 94,0	-11,4 ***	-3,61 ns	+1,85 **
taux de revêlage <i>max 90 j<sup>a</sup></i> (%)	50,8 ± 14,0	20,0 - 88,0	-13,6 ***	+6,18 ***	ns
intervalle vêlage – vêlage, moyenne (j)	412,3 ± 21,1	365 - 463	+13,9 ***	-17,6 ***	+2,19 *
intervalle vêlage – vêlage, écart-type (j)	63,7 ± 10,5	38,2 - 83,5	+2,55 ns	-10,2 ***	+1,83 *
intervalle vêlage – vêlage <i>max 90 j<sup>a</sup></i> , moyenne (j)	370,8 ± 7,1	352 - 396	-1,78 ns	-9,27 ***	+1,97 **
intervalle vêlage – 1 <sup>ère</sup> IA, moyenne (j)	82,6 ± 9,3	65,1 - 107,1	+8,83 ***	-4,61 ***	ns
intervalle vêlage – 1 <sup>ère</sup> IA, écart-type (j)	32,6 ± 8,8	14,9 - 54,5	+6,76 ***	-2,99 ***	ns
% Intervalle vêlage – 1 <sup>ère</sup> IA > 90 j	27,3 ± 11,3	6,2 - 54,2	+10,4 ***	-5,29 ***	ns
% Intervalle vêlage – IA fécondante <sup>b</sup> > 110 j	51,6 ± 13,8	10,6 - 82,1	+6,25 *	-14,0 ***	+2,12 **
nombre d'IA par revêlage, à l'échelle du groupe	3,15 ± 0,84	1,5 - 5,6	+0,79 ***	-0,31 ***	ns

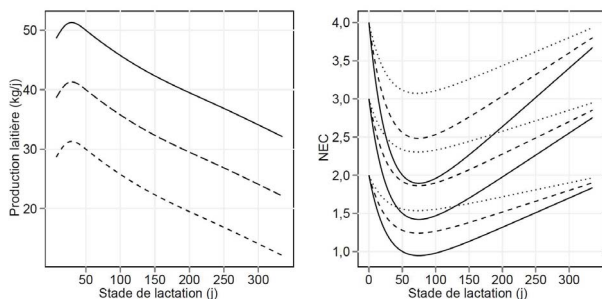
<sup>a</sup> *max 90 j* = pour une période de reproduction limitée à 90 j par vache

<sup>b</sup> Ici, l'IA dite « fécondante » est l'IA donnant lieu au vêlage suivant

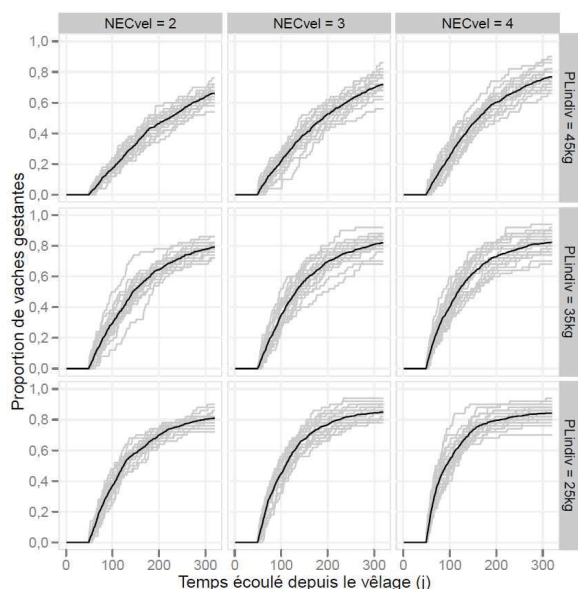
Cependant, si la période de reproduction est illimitée, la plupart des vaches finissent par revêler au prix d'un allongement important de l'IVV moyen. Nous avons donc également étudié ces variables en limitant les inséminations à la période 50-140 j après vêlage. Les performances ont été analysées grâce au modèle suivant :

$$Y_i = \mu + a \times PL_{\text{indiv}} + b \times NEC_{\text{vêl}} + c \times PL_{\text{indiv}} \times NEC_{\text{vêl}} + e_i$$

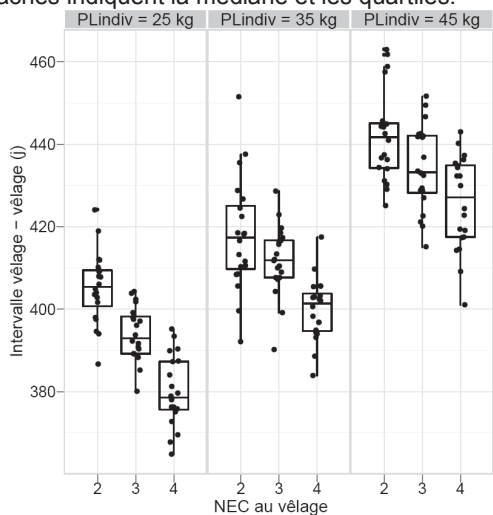
**Figure 2** Courbes de PL et de NEC correspondant aux trois valeurs de PL<sub>indiv</sub> à 110 j (25 kg --, 35 kg - - et 45 kg —) et aux trois valeurs de NEC au vêlage (2, 3 et 4).



**Figure 3** Proportion cumulée de vaches gestantes en fonction du stade de lactation pour les différents niveaux de PL<sub>indiv</sub> (lignes) et NEC<sub>vêl</sub> (colonnes)



**Figure 4** Intervalle vêlage - vêlage en fonction de la PL<sub>indiv</sub> et de la NEC au vêlage (NEC<sub>vêl</sub>). Chaque point représente la valeur moyenne pour une simulation. Les boîtes à moustaches indiquent la médiane et les quartiles.



### 2.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

L'augmentation de la PL<sub>indiv</sub> ou la diminution de la NEC<sub>vêl</sub> pénalise la reproduction (tableau 2, figure 3, figure 4) en induisant :

- une diminution du taux de revêlage pour une période de reproduction courte, d'environ -14 point / +10 kg de lait et -6 points / -1 point de NEC,
- une augmentation de l'IVV, de l'ordre de +20 j / +10 kg de lait et +10 j / -1 point de NEC.

Les interactions PL<sub>indiv</sub> x NEC<sub>vêl</sub> observées sur le taux de revêlage en période de reproduction longue et sur l'IVV en période de reproduction courte traduisent des phénomènes de saturation : en période de reproduction longue, une forte amélioration se traduit principalement par une diminution de l'IVV car le taux de revêlage se rapproche de 1 ; et en période de reproduction courte, une détérioration de la reproduction se traduit par une diminution du taux de revêlage car l'IVV est plafonné.

### 2.4. COMPARAISON DES DONNÉES SIMULÉES À DES DONNÉES OBSERVÉES

Comme le modèle est constitué d'une agrégation de nombreuses étapes, il importe de vérifier que les performances globales simulées restent cohérentes avec celles observées dans la base de données originelle, où les vaches sont conduites en vêlages groupés. Le taux de revêlage simulé était de 53% (±7,1) et variait de 38 à 64%, donc très comparable à celui observé dans la base de données : 50% pour les Holstein multipares avec un niveau d'alimentation élevé.

Avec une période de reproduction longue, l'IVV simulé a été en moyenne de 412 j pour l'ensemble des simulations et de 410 j pour les simulations avec les vaches moyennes productrices, ce qui est cohérent avec les durées observées dans les élevages français (Barbat *et al.*, 2005).

Par ailleurs, la proportion de vaches gestantes en fonction du stade de lactation est cohérente avec les données de la bibliographie (Mackey *et al.*, 2007).

### CONCLUSION

Le modèle développé permet de rendre les performances de reproduction sensibles à la production laitière et à l'état corporel des vaches, et donc à la conduite du troupeau. Bien que construit par agrégation d'étapes, il simule de manière satisfaisante les performances globales du troupeau. Il peut donc être facilement intégré dans un modèle de fonctionnement du troupeau laitier pour tester l'impact des pratiques sur les performances.

*Les auteurs remercient le personnel de la ferme expérimentale INRA de Borculo, au Pin-au-Haras, pour sa coopération dans la gestion de l'essai et la réalisation des mesures associées.*

Barbat, A., Druet, T., Bonaiti, B., Guillaume, F., Colleau, J.J., Boichard, D., 2005. Renc. Rech. Ruminants, 12, 137-140  
 Cutullic, E., 2010. Concurrence entre lactation et reproduction chez la vache laitière, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie  
 Cutullic, E., Delaby, L., Gallard, Y., Disenhaus, C., 2011a. Animal, 5, 731-740  
 Cutullic, E., Delaby, L., Gallard, Y., Disenhaus, C., 2011b. Animal, accepté  
 Leclerc, H., Duclos, D., Barbat, A., Druet, T., Ducrocq, V., 2008. Animal, 2, 344-353  
 Mackey, D.R., Gordon, A.W., McCoy, M.A., Verner, M., Mayne, C.S., 2007. Animal, 1, 29-43  
 Oltenacu, P., Milligan, R., Rounsaville, T., Foote, R., 1980. Agricultural Systems, 5, 193-205