

Prévision de l'effet des interactions énergie × protéines sur la production et la composition du lait chez la vache laitière

BRUN-LAFLEUR L. (1,2,3), DELABY L. (1,2), LASSALAS J. (1,2), FARGETTON M. (1,2), HUSSON F. (4), FAVERDIN P. (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) Agrocampus-Ouest, UMR6625 laboratoire de mathématiques appliquées, F-35000 Rennes, France

RESUME - Les apports d'énergie et de protéines alimentaires aux vaches laitières constituent un des principaux leviers de modulation de la production et de la composition du lait à court terme. Leurs effets sont assez bien connus séparément mais, en pratique, ces apports varient simultanément avec la ration, et leur interaction éventuelle demeure mal connue. L'objectif de cet essai était donc de construire une loi de réponse de la production et de la composition du lait à des variations conjointes d'énergie et de protéines, de déterminer si cette réponse dépend de la parité et du potentiel de production des vaches, et de mesurer les conséquences de ces réponses sur le rendement d'utilisation de l'azote. Pour cela, neuf traitements alimentaires, définis par leurs apports en énergie et en protéines, ont été appliqués à quarante huit vaches réparties en quatre lots les plus homogènes possibles (primi- ou multipares × hautes ou moyennes productrices). Un traitement alimentaire de référence a été calculé pour couvrir les besoins prévus de chaque groupe et appliqué à chaque vache. Les huit autres traitements correspondaient à des apports fixes d'énergie et de protéines en plus ou en moins par rapport au traitement de référence. En réponse à une augmentation des apports énergétiques, la production laitière, le taux et les matières protéiques ont augmenté d'autant plus fortement que les niveaux d'apports protéiques étaient élevés. L'interaction obtenue est compatible avec l'hypothèse d'une réponse correspondant au plus limitant des deux facteurs : énergie et protéines. En outre, la réponse de la production laitière a été plus forte pour les vaches avec un fort potentiel de production que pour les vaches avec un potentiel moyen. La réponse du taux protéique a été plus forte pour les primipares que pour les multipares. Enfin, maintenir un équilibre de la ration égal à 105 g de PDIE / UFL permet de limiter les rejets azotés dans l'environnement tout en assurant une bonne production.

Predicting the energy × protein interaction on milk production and composition in dairy cows

BRUN-LAFLEUR L. (1,2,3), DELABY L. (1,2), LASSALAS J. (1,2), FARGETTON M. (1,2), HUSSON F. (4), FAVERDIN P. (1,2)

(1) INRA, UMR 1080 Production du Lait, F-35590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus-Ouest, UMR 1080 Production du Lait, F-35000 Rennes, France

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

SUMMARY - Energy and protein supplies to dairy cows are of the main levers to modulate milk production and composition in the short term. Their separate effects are rather well known but, in practice, their supplies vary simultaneously with the diet, and their possible interaction still remains ambiguous. The objective of this trial was thus to construct response equations of milk yield and composition to joint variations of energy and protein supplies, to determine if their responses depend on the parity and potential production of the cows, and to estimate the consequences of their responses on the efficacy of nitrogen use for milk protein. Thus, 9 feeding treatments, defined by their energy and protein supplies, were applied to 48 cows divided into 4 homogeneous groups (primiparous or multiparous × high or medium milk potential). A reference treatment was calculated to cover the predicted requirements of each group of cows and applied to each cow. The 8 other treatments corresponded to fixed supplies of energy and protein, higher or lower than those of the reference treatment. Milk and protein yield and content increased in response to an increase in energy supply and this increase was more important with high protein supply. The obtained interaction was compatible with the concept of a response corresponding to the most limiting factor between energy and protein. Moreover, the response of milk yield was greater for cows with high than medium potential production. And the response of milk protein content was greater for primiparous than for multiparous cows. Finally, maintaining the diet with a protein/energy ratio equal to 105 g of PDIE/UFL permits to limit nitrogen rejection in the environment while maintaining milk production.

INTRODUCTION

La production et la composition du lait sont contrôlées par l'alimentation offerte aux vaches, et plus particulièrement par les apports d'énergie et de protéines. Lorsque l'un de ces apports augmente, la production laitière augmente de façon curvilinéaire avant de plafonner (Coulon et Rémond, 1991 ; Vérité *et al.*, 1997). Cependant, en pratique, les apports protéiques et énergétiques varient simultanément, et la réponse à ces variations conjointes est mal connue (Broster, 1973 ; Cowan *et al.*, 1981 ; Broderick, 2003). En outre, cette réponse peut dépendre de la parité et du génotype des vaches (Hansen *et al.*, 2006). L'objectif de cet essai est donc 1) de déterminer si l'énergie et les protéines

interagissent sur la production et la composition du lait et, le cas échéant, de définir des lois de réponse aux variations simultanées des apports énergétiques et protéiques, 2) de tester si ces réponses dépendent de la parité et du niveau de production des vaches, et 3) de déterminer dans quelle mesure l'équilibre protéines/énergie modifie le rendement d'utilisation de l'azote (Vérité et Delaby, 2000).

1. MATERIEL ET METHODES

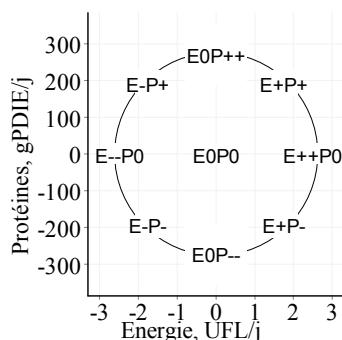
1.1. ANIMAUX, SCHEMA EXPERIMENTAL ET ALIMENTATION

Cette expérimentation a été réalisée à la ferme expérimentale de Méjusse (INRA UMR1080,

Bretagne) avec quarante huit vaches de race Holstein (87±19 jours de lactation) réparties en quatre lots de douze vaches selon leur parité et leur niveau de production : multipares hautes (PL = 41,7 kg±1,8 kg) et moyennes (PL = 34,0 kg±2,0 kg) productrices, et primipares hautes (PL = 32,5 kg±2,0 kg) et moyennes (PL = 28,5 kg±0,9 kg) productrices.

L'essai a été conduit en bloc incomplet équilibré pendant trois périodes de quatre semaines chacune (deux semaines d'adaptation + deux semaines de mesures). Neuf traitements alimentaires ont été comparés pour chacun des quatre lots. Ils étaient définis en termes d'apports d'énergie (UFL) et de protéines (g de PDIE) : un traitement de référence a été ajusté sur les besoins du lot ; les huit autres traitements ont été calculés en écarts fixes d'apports d'énergie et de protéines en plus ou en moins par rapport aux besoins (figure 1). Ces écarts allaient de -2,49 à +2,49 UFL et de -271 à +271 g de PDIE. Ils correspondaient aux mêmes écarts de besoins énergétiques ou protéiques de production laitière, soit un maximum de ±5,65 kg / j. Chaque vache a reçu le traitement de référence (E0P0) et deux autres traitements.

Figure 1 : définition des traitements, en écarts d'apports d'énergie et de protéines par rapport aux besoins prévus des lots de vaches.



Trente-six rations (neuf traitements × quatre lots) ont donc été formulées à partir d'ensilage de maïs, de luzerne déshydratée, de concentré énergétique (pois et triticales), de tourteau de soja et de colza tanné, et de minéraux. Elles ont été ajustées en faisant varier la quantité totale offerte et la nature du concentré, la proportion de concentré dans la ration étant la plus constante possible (38,8 % ± 2,1) et les apports en PDIE et PDIN équilibrés. L'alimentation a été distribuée individuellement, sous forme de ration complète, et en quantité limitée afin de bien maîtriser les apports et de s'affranchir de l'effet de la teneur en protéines de la ration sur l'ingestion (Faverdin *et al.*, 2003).

1.2. MESURES

Les quantités d'aliments distribués et de refus ont été pesées quotidiennement pour chaque vache. La teneur en matière sèche (MS) de l'ensilage de maïs a été déterminée (80°C, 48 h) chaque jour. Pour calculer la MS ingérée (MSI), la composition des rares refus a été considérée comme identique à celle de la ration offerte. La composition et la valeur nutritive des aliments ont été déterminées par analyse chimique.

La production laitière (PL) a été enregistrée à chaque traite et les taux protéique (TP) et butyreux (TB) ont été déterminés trois jours par semaine pendant les trois premières semaines et cinq jours pendant la dernière semaine de chaque période, séparément sur les traites du matin et de soir. Les vaches ont été pesées une fois par semaine, entre la traite et le repas du matin. L'urée, le glucose, les acides gras non estérifiés et les protéines ont

été dosés dans le plasma sanguin à partir d'échantillons de sang prélevés dans la queue à la fin de chaque période, avant le repas du matin.

1.3. ANALYSES STATISTIQUES

L'analyse statistique a été réalisée avec la procédure MIXED du logiciel SAS (version 8.1 ; SAS Institute, Inc., Cary, NC) en deux étapes.

La première étape a consisté à vérifier si le traitement alimentaire avait un effet sur la production et la composition du lait, l'ingestion, et la concentration plasmatique en urée, seul et en interaction avec la parité ou le niveau de production, grâce au modèle (1) :

$$Y_{ijkmn} = \mu + P_i + N_j + V_{k(ij)} + S_m + T_n + P_i \times N_j + P_i \times T_n + N_j \times T_n + P_i \times N_j \times T_n + e_{ijkmn} \quad (1)$$

où Y_{ijkmn} = variable étudiée, μ = moyenne globale ; P_i = effet de la parité i (1 ddl) ; N_j = effet du niveau de production j (1 ddl) ; $V_{k(ij)}$ = effet de la vache k du groupe de parité i et de niveau de production j (44 ddl) ; S_m = effet de la période m (2 ddl) ; T_n = effet du traitement n (8 ddl) ; $P_i \times N_j$, $P_i \times T_n$, $N_j \times T_n$, et $P_i \times N_j \times T_n$ = interactions entre P_i , N_j ; et T_n , et e_{ijkmn} = erreur associée à chaque Y_{ijkmn} .

La seconde étape a consisté en l'établissement de lois de réponses de la production et de la composition du lait et de la concentration plasmatique en urée, aux variations d'apports d'énergie et de protéines, grâce au modèle (2a) :

$$dY_{ijk}(dE; dN) = \mu + P_i + N_j + V_{k(ij)} + P_i \times N_j + e_1 \cdot dE + e_2 \cdot dE^2 + n_1 \cdot dN + n_2 \cdot dN^2 + a \cdot dE \times dN \quad (2a)$$

où dY_{ijk} = réponse de la variable étudiée aux variations d'apports énergétique et protéique, corrigée de l'effet période ; dE et dN = différences d'apports énergétique (UFL / j) et protéique (100 g PDIE / j) observées entre le traitement de référence (E0P0) et le traitement étudié ; μ = moyenne globale ; P_i = effet de la parité i (1 ddl) ; N_j = effet du niveau de production j (1 ddl) ; $V_{k(ij)}$ = effet de la vache k du groupe de parité i et de niveau de production j (44 ddl) ; $P_i \times N_j$ = effet de l'interaction entre P_i et N_j ; e_1 et e_2 = effets respectivement linéaire et quadratique de la variation d'apport énergétique dE ; n_1 et n_2 = effets respectivement linéaire et quadratique de la variation d'apport protéique dN , et a = effet de l'interaction entre dE et dN .

Le modèle (2a) a été simplifié lorsque les effets quadratiques ou l'interaction énergie × protéines n'étaient pas significatifs :

$$dY_{ijk}(dE; dN) = \mu + P_i + N_j + V_{k(ij)} + P_i \times N_j + e_1 \cdot dE + n_1 \cdot dN + a \cdot dE \times dN \quad (2b)$$

$$dY_{ijk}(dE; dN) = \mu + P_i + N_j + V_{k(ij)} + P_i \times N_j + e_1 \cdot dE + n_1 \cdot dN \quad (2c)$$

L'effet du traitement sur le rendement d'utilisation de l'azote dans les MP a été analysé avec le modèle (1).

2. RESULTATS

2.1. EFFET DU TRAITEMENT ALIMENTAIRE, DE LA PARITE ET DU NIVEAU DE PRODUCTION SUR LA PRODUCTION ET LA COMPOSITION DU LAIT

Dans l'ordre croissant de PL, on trouve les traitements E+P-, E0P--, E-P-, E--P0, E++P0, E-P+, E0P0, E0P++, et E+P+. Cet ordre est très proche pour les matières grasses (MG) et protéiques (MP) et le TP. Seul le TB n'a pas été affecté par le traitement alimentaire. En outre, l'effet du traitement a interagi avec la parité et le niveau de production (tableau 1). L'amplitude de réponse de la PL aux variations d'apports alimentaires a été plus forte pour

les fortes productrices que pour les moyennes productrices ; et l'amplitude de réponse du TP a été plus forte pour les

primipares que pour les multipares.

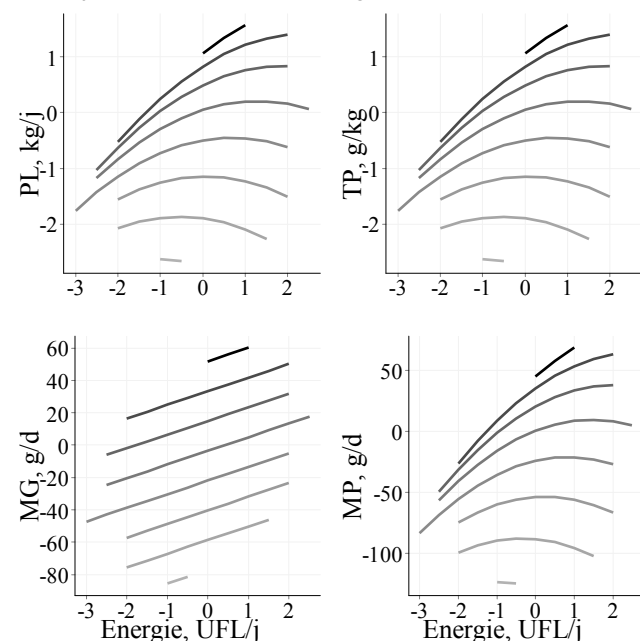
Tableau 1 : effet de la parité (P), du niveau de production (N), de la vache (V), de la période (S), du traitement (T) et de leurs interactions sur l'ingestion (MSI), la production et la composition du lait, et la concentration plasmatique en urée, et écarts-types résiduels (ETR) (modèle (1))

	Effet P (<T)									ETR
	P	N	V	S	T	P×N	P×T	N×T	P×N×T	
MSI, kg/j	<0,001	<0,001	0,013	0,009	<0,001	0,948	<0,001	0,691	0,072	0,40
PL, kg/j	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,016	0,006	0,169	0,84
MG, g/j	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,142	0,852	0,174	0,073	41
MP, g/j	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,240	0,006	0,019	0,218	29
TB, g/kg	0,014	<0,001	<0,001	<0,001	0,883	<0,001	0,263	0,571	0,292	1,5
TP, g/kg	0,334	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,346	0,471	0,59
Urée, mg/dL	0,331	0,012	0,001	0,004	<0,001	0,067	0,007	0,073	0,752	3,52

2.2. LOIS DE REPOSE DE LA PRODUCTION ET DE LA COMPOSITION DU LAIT AUX VARIATIONS DES APPORTS D'ENERGIE ET DE PROTEINES

Les effets des variations d'apports d'énergie et de protéines sur la PL, les MP et le TP n'ont pas été additifs : à niveau d'apport énergétique constant, une augmentation de l'apport protéique a provoqué une augmentation de la PL, des MG, des MP et du TP. Pour la PL, les MP et le TP, cette réponse a été d'autant plus forte que le niveau d'apport énergétique était élevé (figure 2) et pour des niveaux d'apports protéiques faibles, l'augmentation de l'apport énergétique n'a plus entraîné d'augmentation de production. Les variations d'apports d'énergie et de protéines n'ont eu aucun effet sur le TB.

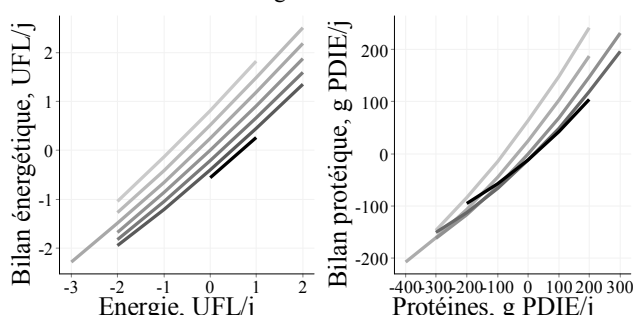
Figure 2 : réponse de la production et de la composition du lait aux variations des apports d'énergie et de protéines. Les variations d'apports protéiques sont représentées par les niveaux de gris, du plus clair pour -400 g de PDIE / j au plus sombre pour +300 g de PDIE / j, avec un incrément de 100 g entre deux courbes voisines.



2.3. BILANS ENERGETIQUE ET PROTEIQUE

Les lois de réponse obtenues pour la production et la composition du lait ont permis de déduire des lois de réponse pour les bilans énergétique et protéique (figure 3). Le bilan énergétique augmente avec les apports énergétiques et le bilan protéique avec les apports protéiques. En outre, le bilan énergétique diminue quand les apports protéiques augmentent et le bilan protéique diminue quand les apports énergétiques augmentent, pour des niveaux d'apports protéiques élevés.

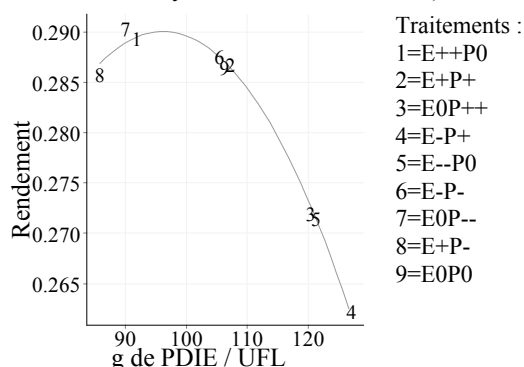
Figure 3 : réponse des bilans d'énergie et de protéines aux variations des apports d'énergie et de protéines. Les variations d'apports de protéines pour le bilan énergétique et les variations d'apports d'énergie pour le bilan protéique sont représentées par les niveaux de gris, du plus clair pour -2 UFL ou -300 g de PDIE au plus sombre pour +2 UFL ou +300 g de PDIE, avec un incrément d'1 UFL ou 100 g de PDIE entre deux courbes voisines.



2.4. RENDEMENT D'UTILISATION DE L'AZOTE POUR LA LACTATION

Pour les six rations avec des rapports protéines / énergie faibles ou moyens, le rendement d'utilisation de l'azote alimentaire pour la synthèse des protéines du lait a été à peu près constant ($P > 0,10$ entre les traitements, modèle (1)) et supérieur à 0,285. En revanche, pour les rations riches en protéines par rapport à l'énergie, le rendement moyen d'utilisation de l'azote par traitement a diminué (figure 4).

Figure 4 : rendement d'utilisation dans le lait de l'azote ingéré et régression quadratique correspondante ($R^2 = 0,99$; erreur standard résiduelle = 0,00086 ; $y = -0,30x^2 + 0,57x + 0,02$).



2.5. CONCENTRATION PLASMATIQUE EN UREE

Les effets du traitement et de la parité sur la concentration plasmatique en urée n'ont pas été additifs. Cependant, globalement et quelle que soit la parité, les trois traitements qui ont produit les plus faibles concentrations en urée correspondaient aux rations pauvres en protéines par rapport à l'énergie (E++P0, E+P-, et EOP--), et les trois traitements qui ont produit les plus fortes concentrations en urée correspondaient aux rations riches en protéines par rapport à l'énergie (E--P0, E-P+, et EOP++).

3. DISCUSSION

3.1. PARITE ET NIVEAU DE PRODUCTION : DEUX CARACTERISTIQUES QUI CONDITIONNENT LA REPONSE DES VACHES A L'ALIMENTATION

A mêmes apports d'énergie et de protéines, les vaches ayant le potentiel le plus élevé produisent plus, et l'amplitude de réponse de production pour un même écart d'apport autour des besoins s'accroît avec la PL potentielle. Le potentiel de la vache agirait sur la partition des nutriments entre les différentes fonctions : les fortes productrices orienteraient les nutriments préférentiellement vers la synthèse du lait, au détriment de leurs réserves corporelles (Friggens et Newbold, 2007).

En outre, cette étude montre que le TP des primipares est plus sensible aux changements d'apports alimentaires que celui des multipares. Cela est principalement dû aux rations pauvres en protéines (E+P- et E0P--) pour lesquelles les primipares diminuent fortement leur TP. Lorsque les protéines disponibles sont limitées, les primipares, qui ont des besoins protéiques élevés pour leur croissance, pourraient privilégier cette fonction de croissance (Hanigan *et al.*, 1998) et ainsi limiter la production de matières protéiques du lait. Couvrir les besoins protéiques des jeunes vaches est donc particulièrement important pour permettre à la fois la croissance de l'animal et la production laitière.

3.2. LA PRODUCTION LAITIERE, UN COMPROMIS ENTRE DEUX FACTEURS LIMITANTS : L'ENERGIE ET LES PROTEINES

L'un des principaux résultats de cet essai est l'interaction significative entre énergie et protéines, non seulement sur la PL, mais également sur les MP et le TP. Ces grandeurs répondent plus fortement à l'augmentation de l'énergie ou des protéines lorsque l'autre apport (respectivement de protéines ou d'énergie) est élevé. Cette interaction clarifie la tendance observée par d'autres auteurs (Gordon et Forbes, 1970 ; Cowan *et al.*, 1981). En outre, la diminution du bilan énergétique avec l'augmentation des apports protéiques pourrait s'expliquer par le fait que l'augmentation des apports protéiques provoque une augmentation de la production de lait et de matières, nécessitant ainsi plus d'énergie pour la synthèse du lait. La vache puiserait alors le complément d'énergie nécessaire à cette synthèse dans ses réserves corporelles (Broster et Alderman, 1977). Parallèlement, le bilan protéique diminue avec l'augmentation des apports énergétiques ; mais cette diminution semble assez rapidement plafonnée, surtout pour des niveaux d'apports protéiques faibles. Les protéines seraient donc principalement fournies par l'alimentation, même si la mobilisation de protéines corporelles est possible (Botts, 1979). Les lois de réponse de la production et de la composition du lait et les bilans énergétique et protéique nous amènent à formuler l'explication suivante : la production résulterait d'un compromis entre deux facteurs : l'énergie et les protéines. Elle serait déterminée par le facteur le plus limitant des deux. Les réserves corporelles serviraient de tampon, tout au moins pour des durées relativement courtes et des vaches en bon état corporel, puisque l'essai a été réalisé avec des périodes de quatre semaines sur des vaches en milieu de lactation.

Afin de prendre en compte à la fois le niveau de production et le concept de facteur le plus limitant entre énergie et protéines, les variations relatives de PL (dPL , %) peuvent être estimées par le minimum des réponses maximales à l'énergie (dPL_E , %) et aux protéines (dPL_N , %) :

$$dPL = \min(dPL_E; dPL_N),$$

$$dPL_E = 4,44 + 2,74dE - 0,0587dE^2, dE \text{ en UFL/j}$$

$$dPL_N = 0,902 + 2,38dN - 0,0399dN^2, dN \text{ en } 100 \text{ gPDIE/j}$$

3.3. L'EQUILIBRE PROTEINES / ENERGIE : UNE CONDITION POUR LIMITER LES REJETS AZOTES

Maintenir l'équilibre de la ration autour du seuil de 105 g de PDIE / UFL permet de limiter au maximum les rejets d'azote dans l'environnement par kg de lait produit tout en recherchant une bonne efficacité de production. Ce phénomène et la valeur du seuil concordent avec la bibliographie (Vérité et Delaby, 2000). En effet, avec ces rations équilibrées en PDIN et PDIE, la quantité d'azote rejeté et l'urémie plasmatique augmentent linéairement avec le rapport PDIE / UFL. Comme la production de matières protéiques s'accroît de façon curvilinéaire avec ce rapport, le rejet d'azote par g de protéine synthétisé (ou par kg de lait) n'augmente pas jusqu'à 105 g de PDIE / UFL, alors qu'il s'accroît au-delà.

CONCLUSION

Cet essai, conduit en milieu de lactation, montre que la production de lait et de matières augmente avec les apports énergétiques et protéiques mais que ces deux effets ne sont pas additifs : la variation de PL autour de la production potentielle semble correspondre à la production la plus limitante des deux lois de réponse liées à l'énergie et aux protéines. D'autre part, l'amplitude de réponse de la production laitière augmente avec le niveau de production des vaches, et les primipares ont une réponse du TP plus forte que les multipares. Il est donc nécessaire de bien prendre en compte la parité et le potentiel de production des vaches pour déterminer leurs rations.

En outre, pour augmenter la production laitière à travers l'alimentation tout en limitant les rejets d'azote dans l'environnement, il est préférable d'augmenter les apports d'énergie et de protéines simultanément, en maintenant un équilibre autour de 105 g de PDIE / UFL.

Les auteurs remercient l'ensemble du personnel des installations expérimentales du domaine de Méjusseaume (UMR1080 INRA Agrocampus-Ouest), en particulier A. Mottin et G Théaud, pour la conduite de cet essai, et du personnel du laboratoire de l'UMR1080 (INRA Agrocampus-Ouest), en particulier T. Le Mouel, pour les analyses des paramètres sanguins.

Botts, R.L., Hemken, R.W., Bull, L.S., 1979. *J. Dairy Sci.*, 62, 433-440

Broderick, G.A., 2003. *J. Dairy Sci.*, 86, 1370-1381

Broster, W., 1973. *Proc. Nut. Soc.*, 32, 115-122

Broster, W., Alderman, G., 1977. *Livest. Prod. Sci.*, 4, 263-275

Coulon, J.B., Rémond, B., 1991. *Livest. Prod. Sci.*, 29, 31-47

Cowan, R., Reid, G., Greenhalgh, J., Tait C, 1981. *J. Dairy Res.*, 48, 201-212

Faverdin, P., M'Hamed, D., Vérité, R., 2003. *Anim. Sci.*, 76, 137-146

Friggens, N.C., Newbold, J.R., 2007. *Animal*, 1, 87-97

Gordon, F.J., Forbes, T.J., 1970. *J. Dairy Res.*, 37, 481-491

Hanigan, M.D., Cant, J.P., Weakley, D.C., Beckett, J.L., 1998. *J. Dairy Sci.*, 81, 3385-3401

Hansen, J.V., Friggens, N.C., Højsgaard, S., 2006. *Livest. Sci.*, 104, 53-62

Vérité, R., Faverdin, P., Agabriel, J., 1997. *In, Recent advances in animal nutrition, Eds Wiseman, J., Garnsworthy, P.C., Nottingham University Press, Nottingham, pp 153-166*

Vérité, R., Delaby, L., 2000. *Ann.Zootech.*, 49, 217-23