

Effets de la biomasse et de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion, les performances laitières et le comportement alimentaire des vaches laitières conduites en pâturage tournant : étude par méta-analyse

R. DELAGARDE¹, L.A. PÉREZ-PRIETO^{1,2}

¹ PEGASE, INRA, Agrocampus Ouest, 35590, Saint-Gilles, France

² Arturo Prat 391, depto 101, Osorno, Chili

Courriel : remy.delagarde@rennes.inra.fr

La biomasse d'herbe présente et la quantité d'herbe offerte aux vaches lors de l'entrée des vaches sur une parcelle sont deux éléments clé de la gestion du pâturage et de l'efficacité des systèmes bovins laitiers herbagers. Toutefois, les réponses des vaches laitières à ces facteurs sont très variables dans la littérature, en raison notamment de la diversité des méthodes utilisées pour estimer la biomasse d'herbe présente. Une méta-analyse doit permettre de dégager les principales lois de réponse¹.

Dans les systèmes laitiers basés sur une large utilisation du pâturage, les performances économiques sont souvent associées à une bonne valorisation de l'herbe par hectare sans chercher à maximiser la production laitière individuelle (Dillon *et al* 2005). En pâturage tournant ou rationné, la valorisation de l'herbe par hectare et la production laitière par vache, dépendent, pour un troupeau et une qualité de l'herbe donnés, de la pression de pâturage imposée par l'éleveur. Cette pression de pâturage peut être appréciée par la quantité d'herbe offerte (QO), exprimée en kg de MS par vache et par jour (Poppi *et al* 1987, Dalley *et al* 1999, encadré 1). Réduire la surface offerte, c'est-à-dire réduire la quantité d'herbe offerte pour une biomasse d'herbe par ha donnée, accroît le taux d'utilisation de l'herbe et la production laitière par ha, mais limite l'ingestion d'herbe et la production laitière par vache (Baudracco *et al* 2010, Delagarde et Peyraud 2013). L'effet antagoniste de la quantité d'herbe offerte sur la production laitière par vache et sur la production laitière par hectare est aussi observé à long terme, où la notion de quantité d'herbe offerte est alors remplacée par celle du chargement

(vaches/ha : Hoden *et al* 1986, Dillon *et al* 1995, McDonald *et al* 2008, McCarthy *et al* 2011). La quantité d'herbe offerte étant finalement le fruit de décisions de l'éleveur à chaque passage du troupeau dans chaque parcelle, bien connaître ses effets sur les performances peut permettre de mieux gérer le pâturage.

De la même façon, il est connu que la biomasse d'herbe (B) présente à l'entrée des animaux dans une nouvelle parcelle peut affecter l'ingestion et les performances des vaches laitières (Wales *et al* 1999, Pérez-Prieto *et al* 2013). De grandes variations de biomasse d'herbe peuvent être observées en pratique, selon la saison, la croissance de l'herbe, la durée des rotations ou la fertilisation azotée par exemple. Les effets d'un accroissement de la biomasse d'herbe sur les performances des vaches en pâturage tournant sont très variables dans la littérature, certaines études montrant que l'ingestion d'herbe s'accroît avec la biomasse d'herbe, tandis que d'autres démontrent le contraire.

Les raisons de ces divergences sont en partie méthodologiques. En pratique,

chaque équipe de recherches dans le monde a développé une méthodologie et des outils parfois spécifiques pour mesurer ou estimer la hauteur de l'herbe et/ou la biomasse d'herbe présente dans les parcelles. Un point clé est la hauteur à laquelle l'herbe est coupée pour estimer la biomasse d'herbe et donc aussi la quantité d'herbe offerte (Delagarde et O'Donovan 2005, Delagarde *et al* 2011a). Pour une surface donnée, la quantité d'herbe offerte calculée est d'autant plus élevée que l'herbe est coupée près du sol puisque la biomasse d'herbe récoltée augmente avec la profondeur de coupe. Cette hauteur de coupe dépend de l'outil ou de la machine utilisée pour couper ou faucher : ciseaux, scalpel, minitondeuse ou motofaucheuse. En Australie et en Nouvelle-Zélande, la biomasse et la quantité d'herbe offerte sont toujours estimées au ras du sol (Stockdale 1993, Suksombat *et al* 1994, Wales *et al* 1999). En Europe, et notamment en France et en Irlande, la hauteur de coupe varie selon les études, avec une biomasse et une quantité d'herbe offerte qui peuvent être estimées en coupant l'herbe au ras du sol (Stakelum 1986, Ribeiro Filho *et al* 2005), à 2,5-3,5 cm (Maher *et al* 2003, Pérez-Prieto *et al* 2011), ou à 4-5 cm

¹ Ce texte est une synthèse de deux articles publiés en langue anglaise dans la revue Journal of Dairy Science (Pérez-Prieto et Delagarde 2012 et 2013).

(Pérez-Ramírez *et al* 2009, McEvoy *et al* 2010). En raison des fortes densités de l'herbe dans les strates inférieures du couvert végétal (700 à 500 kg MS/ha/cm, Delagarde *et al* 2000, Pérez-Prieto *et al* 2013), la biomasse d'herbe et donc la

quantité d'herbe offerte augmentent beaucoup lorsque la hauteur de coupe diminue (Delagarde *et al* 2011a, Pérez-Prieto et Delagarde 2012). Ceci peut modifier les seuils de recommandations, mais aussi les coefficients de régression

entre la quantité d'herbe offerte et l'ingestion, voire le sens des relations entre biomasse d'herbe et ingestion d'herbe (Delagarde *et al* 2011b, Pérez-Prieto *et al* 2013). Par exemple, une quantité d'herbe offerte de 20 à 25 kg MS/jour est considérée comme faible lorsque l'herbe est coupée au ras du sol (Wales *et al* 1999), mais élevée lorsque l'herbe est coupée à 5 cm (Delagarde *et al* 2011a).

Encadré 1. Définition et interprétation de la biomasse d'herbe et de la quantité d'herbe offerte selon la hauteur de coupe de l'herbe (adapté de Delagarde et Peyraud 2013).

La biomasse d'herbe (B) caractérise l'état du couvert végétal, mesurée ici avant que les vaches n'entrent dans une parcelle. Elle est exprimée en t MS/ha. Elle se mesure classiquement à l'aide d'un outil dont la hauteur de coupe varie le plus souvent entre le ras du sol et une hauteur de 5 cm. Pour une même prairie, plus la hauteur de coupe est basse, plus la biomasse d'herbe mesurée est importante, avec un écart de l'ordre de 2,0 à 2,5 t MS/ha entre une coupe au ras du sol et une coupe à 5 cm sur des prairies à base de graminées de zones tempérées.

La quantité d'herbe offerte (QO) caractérise l'offre alimentaire quotidienne moyenne rapportée à la vache. Elle est exprimée en kg MS/vache/jour. Par définition, la QO se calcule par l'équation générale suivante :

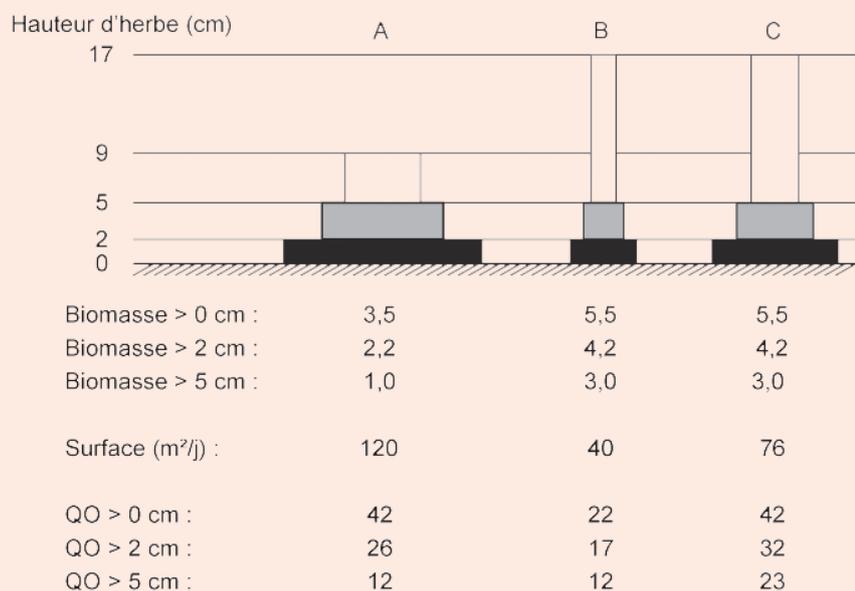
$$QO \text{ (kg MS/vache/jour)} = B \text{ (kg MS/ha)} \times SO \text{ (surface offerte, m}^2\text{/vache/jour)} / 10000.$$

En pâturage tournant, la surface offerte se calcule en tenant compte du nombre de vaches dans le troupeau (Nb VL), du temps de séjour dans la parcelle (TSej, jours) et de la surface de la parcelle (SP, m²) par la formule suivante :

$$SO = SP / (\text{Nb VL} \times \text{TSej}).$$

Pour une même surface offerte, la QO estimée est donc d'autant plus élevée que la hauteur de coupe est basse.

En raison notamment des fortes densités du couvert végétal dans les strates basses, les relations entre B et QO établies pour plusieurs hauteurs de coupe sont assez différentes. Si l'on admet que les vaches ne pâturent jamais en dessous d'une hauteur de 2 cm, la relation entre biomasse d'herbe, quantité d'herbe offerte et hauteur de coupe de l'herbe se complexifie. Dans l'exemple ci-dessous, une prairie A de biomasse faible est comparée à une prairie B ou C de biomasse élevée, soit à même quantité d'herbe offerte au ras du sol (A vs C), soit à même quantité d'herbe offerte au-dessus de 5 cm (A vs B). Les rectangles Noir, Gris et Blanc représentent respectivement la strate non pâturable (comprise entre 0 et 2 cm du sol), la strate partiellement pâturable (comprise entre 2 et 5 cm du sol) et la strate pâturable (au-dessus de 5 cm du sol). La largeur des rectangles est proportionnelle à la surface offerte par vache et par jour. La surface des rectangles est proportionnelle à la biomasse. En conséquence, dans ces trois exemples, les vaches ne consommeront pas la même quantité d'herbe et ne produiront pas la même quantité de lait.



Plusieurs revues bibliographiques ont déjà décrit l'effet de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion des vaches laitières, mais uniquement avec des données obtenues au ras du sol (Mayne 1991, Stockdale 2000), standardisées au ras du sol (Delagarde *et al* 2001a), standardisées à 2 cm (Delagarde *et al* 2011a), ou bien sans tenir compte de la hauteur de coupe (Bargo *et al* 2003). En comparant les études réalisées avec coupe au ras du sol ou à 3 cm, Baudracco *et al* (2010) ont bien montré que la relation entre l'offert et l'ingéré dépendait de la hauteur de coupe de l'herbe. Aucune étude n'a pour l'instant été conduite pour prendre en compte de manière globale l'effet de la hauteur de coupe de l'herbe sur la relation offert/ingéré. Par ailleurs, les relations entre quantité d'herbe offerte et production de lait, composition du lait ou comportement alimentaire sont très peu décrites. De même, si l'effet de la biomasse d'herbe sur l'ingestion est déjà pris en compte dans des modèles de prévision de l'ingestion des vaches laitières au pâturage (Delagarde *et al* 2011a), aucune méta-analyse de la littérature n'a encore été entreprise pour mieux prévoir l'effet de la biomasse d'herbe sur l'ingestion et la production laitière, notamment en considérant l'effet de la méthodologie utilisée, et en particulier la hauteur de coupe de l'herbe.

L'objectif de cet article est de présenter les résultats de deux méta-analyses des essais publiés avec des vaches laitières conduites en pâturage tournant ou rationné, permettant de mieux décrire et comprendre les effets respectifs de la quantité d'herbe offerte et de la biomasse d'herbe à l'entrée des animaux dans une nouvelle parcelle, en tenant compte de la hauteur de coupe de l'herbe dans les équations de prévision. L'ingestion d'herbe, la production laitière, la composition du lait et le comportement alimentaire sont les principales variables étudiées.

1 / Constitution et analyses des bases de données

1.1 / Constitution des bases bibliographiques

Deux bases de données indépendantes ont été constituées sous tableur, à partir d'une recherche exhaustive d'articles de la littérature (Agricola, CAB Abstracts

et Web of Science) dans lesquels les effets de la QO (base globale QO_G) ou de la biomasse d'herbe (base globale B_G) ont été étudiés en intra-essai, c'est-à-dire toutes choses étant égales par ailleurs. La recherche d'articles s'est finalement limitée aux vaches laitières, conduites en pâturage tournant ou rationné sur prairies de zones tempérées, ce qui constituait la très grande majorité des articles disponibles (> 95%). L'ingestion d'herbe, la production laitière et/ou le comportement alimentaire devaient être mesurés. Dans la base QO_G , les variations de quantité d'herbe offerte sont en réalité des variations de surface offerte ou de temps de séjour, la biomasse d'herbe avant pâturage étant identique entre traitements. Dans la base B_G , les variations de biomasse d'herbe étudiées s'entendent à même quantité d'herbe offerte, c'est-à-dire avec un ajustement des surfaces offertes proportionnelles aux variations de biomasse d'herbe. Dans chacune des bases, une ligne correspond à un traitement d'un essai, et une colonne à un code ou à une variable mesurée. Chaque essai est identifié par un code unique et les traitements numérotés intra-essai. La hauteur de coupe de l'herbe à laquelle la biomasse et la quantité d'herbe offerte sont mesurées a été codée en 3 valeurs : 0, 3 et 5. Ces valeurs correspondent respectivement à une hauteur de coupe de l'herbe *i*) de 0 cm (coupe au ras du sol, souvent avec des ciseaux ou un scalpel, dans un quadrat de petite surface), *ii*) comprise entre 2,5 et 3,5 cm (coupe généralement réalisée avec une mini-tondeuse ou une tondeuse à moutons sur une largeur de 4 à 10 cm), *iii*) comprise entre 4 et 5 cm (coupe généralement réalisée avec une motofaucheuse sur une largeur de 50 à 100 cm). Une seule publication peut contenir plusieurs essais. Seuls les essais avec des temps d'accès au pâturage supérieurs à 18 h/jour (pâturage jour et nuit), avec une complémentation en concentré inférieure à 1 kg MS/jour et sans complémentation en fourrages ont été retenus. Plus de précisions sur la constitution des bases de données et les filtres retenus avant analyses des bases de données peuvent être trouvées dans Pérez-Prieto et Delagarde (2012 et 2013).

1.2 / Calculs

Afin de pouvoir standardiser tous les calculs (encadré 1), seuls les articles fournissant au moins deux des trois variables suivantes (QO, B et surface offerte) ont été sélectionnés, permettant ainsi de recalculer la troisième. La biomasse et la quantité d'herbe offerte ont été exprimées en t MS/ha et en kg MS/vache/jour, respectivement. La base QO_G a été divisée en 3 sous-bases selon que la hauteur de coupe de l'herbe était de 0 cm (base QO_0), de 3 cm (base QO_3), ou de 5 cm (base QO_5). La base B_G a également été

divisée en 3 sous-bases, selon que les biomasses d'herbe étaient comparées intra-essai à même QO au ras du sol (base B_0), à 3 cm (base B_3), ou à 5 cm (B_5). Lorsque les données étaient disponibles, la vitesse d'ingestion d'herbe moyenne journalière (en g MS/min) a été calculée à partir de l'ingestion quotidienne (en kg MS/jour) et de la durée d'ingestion (en min/jour). Les productions journalières de matières grasses et de protéines ont été calculées à partir de la production et de la composition du lait.

Pour des analyses globales de la base QO_G , les biomasses et les quantités d'herbe offertes de chaque traitement de chaque essai ont aussi été recalculées pour une coupe de l'herbe au ras du sol, à 3 ou à 5 cm. Pour cela, des équations de passage tenant compte de la répartition verticale de la biomasse des prairies de zones tempérées ont été utilisées, permettant d'estimer la biomasse d'herbe dans les strates 0 à 3 cm et dans les strates 3 à 5 cm (Delagarde *et al* 2011a, Pérez-Prieto et Delagarde 2012 et 2013). La base B_G a également été réorganisée pour créer une base de données constituée uniquement des pentes intra-essai des relations entre biomasse d'herbe et variables étudiées (par exemple : kg MS ingéré par t MS/ha). Ceci permet de comparer les essais entre eux sans corriger les biomasses d'herbe mesurées, en considérant la hauteur de coupe de l'herbe comme facteur de variation dans l'analyse des données.

1.3 / Analyses statistiques

Des analyses statistiques intra-essai ont été conduites indépendamment sur chaque base de données. Ces modèles étaient de type linéaire :

$$Y = a + \text{essai} + b \times X ;$$

quadratique :

$$Y = a + \text{essai} + b \times X + c \times X^2 ;$$

ou exponentiel décroissant :

$$Y = a \times (1 - \exp(-b \times X)) + \text{essai} ;$$

selon les variables et les bases de données étudiées (procédures PROC MIXED ou PROC NL MIXED, SAS Institute 2008). Dans ces équations, Y représente la variable à expliquer (ou prévoir), X la variable explicative (QO ou B), a, b et c les paramètres des équations, et « essai » l'effet aléatoire de l'essai.

Sur la base QO_G , des analyses globales ont été réalisées pour tenir compte dans le même modèle des effets conjoints de la hauteur de coupe de l'herbe (HC, cm) et de la QO comme données dans la publication. Ceci a été possible en remplaçant les paramètres fixes des équations précédentes par des régressions linéaires de

l'effet HC, selon les types d'équations suivantes :

$$Y = a \times (1 - \exp(-(b + c \times HC) \times QO)) + \text{essai}$$

$$Y = a + \text{essai} + (b + c \times HC) \times QO + (d + e \times HC) \times QO^2$$

Sur la base B_G , l'effet de la HC sur les effets de la biomasse d'herbe a été testé par analyse de variance à un facteur. Plus de détails sur les modèles d'analyses statistiques et les calculs des données ajustées de l'effet essai peuvent être trouvés dans Pérez-Prieto et Delagarde (2012 et 2013).

2 / Prédiction des effets de la quantité d'herbe offerte

2.1 / Description des bases de données

La base QO_G comprend 97 comparaisons de QO rapportées dans 57 articles publiés entre 1966 et 2011, dont 47 comparaisons au ras du sol (base QO_0), seulement 11 comparaisons à 3 cm (QO_3) et 39 comparaisons à 5 cm (base QO_5). Le pâturage est de type rationné (84) ou tournant (13), sur des prairies de graminées (69), d'association graminées/légumineuses (21) ou de légumineuses pures (7). Les données de la base QO_0 proviennent essentiellement d'Australie et de Nouvelle-Zélande ($n = 29$), mais aussi d'Europe ($n = 15$: Irlande, France et Royaume-Uni). Les données des bases QO_3 et QO_5 proviennent quasi exclusivement d'Europe (Irlande et France surtout).

L'ingestion d'herbe et la production laitière sont en moyenne de 14,8 kg MS/jour et de 18,9 kg de lait/jour, et sont peu différentes entre bases. En revanche, les gammes de QO comparées sont très dépendantes de la hauteur de coupe de l'herbe. Dans la base QO_0 , la biomasse d'herbe moyenne est de 4,4 t MS/ha, pour une gamme de QO étudiée en moyenne de 21 à 43 kg MS/j. Dans la base QO_5 , la biomasse d'herbe moyenne est de 2,4 t MS/ha, pour une gamme de QO étudiée en moyenne de 13 à 20 kg MS/jour. Les valeurs sont intermédiaires dans la base QO_3 . Ainsi, une QO ou une variation de QO mentionnées sans la hauteur de coupe de l'herbe n'est pas interprétable. A titre indicatif, des QO faible, moyenne et élevée sont données au tableau 1 pour chaque hauteur de coupe de l'herbe.

2.2 / Effets de la quantité d'herbe offerte selon la hauteur de coupe

L'ensemble des relations significatives (modèles avec $P < 0,05$) pour chacune des bases (QO_0 , QO_3 et QO_5) est présenté au tableau 2.

Tableau 1. Valeurs indicatives de quantités d'herbe offertes (QO, kg MS/vache/j) pour des vaches laitières en lactation non complétées en pâturage tournant.

Les équivalences entre QO mesurées au ras du sol (QO₀), à 3 cm (QO₃) et à 5 cm (QO₅) sont calculées pour une surface offerte fixe. La biomasse d'herbe moyenne considérée est celle de la base de données QO_G calculée au ras du sol, à 3 cm ou à 5 cm, soit 4,6, 2,7 et 2,1 t MS/ha, respectivement (environ 13-14 cm de hauteur d'herbe mesurée à l'herbomètre à plateau à l'entrée des animaux dans la parcelle).

Variable	QO faible	QO moyenne	QO élevée
QO ₀	20-25	35-40	50-55
QO ₃	12-15	21-24	30-33
QO ₅	9-11	16-18	23-25

Dans les trois bases de données, l'ingestion d'herbe décroît lorsque la QO diminue, selon une loi de type exponentiel décroissant (tableau 2 et figure 1). L'asymptote est similaire entre bases, avec une valeur moyenne de 17-18 kg MS/j lorsque la QO est non limitante. En revanche, le paramètre b décrivant la curvilinearité de la relation diffère fortement entre bases de données (tableau 2). Ceci signifie que le seuil à partir duquel

la QO réduit fortement la pente de la relation entre la quantité d'herbe offerte et la quantité d'herbe ingérée est très dépendant de la méthodologie d'estimation de la QO (hauteur à laquelle l'herbe est coupée). On peut situer ce seuil vers 30, 18 et 13 kg MS d'herbe offerte/vache/j pour une hauteur de coupe de l'herbe de 0, 3 et 5 cm respectivement. Ces valeurs correspondent évidemment exactement à la même surface offerte par animal et

par jour, et donc à la même pression de pâturage réelle (figure 2). Par exemple, pour les seuils indiqués précédemment, la pente est de l'ordre de 0,20, 0,28 et 0,40 kg MS d'herbe ingérée par kg MS d'herbe offerte pour des hauteurs de coupe de l'herbe de 0, 3 et 5 cm respectivement, soit des taux de valorisation marginale de l'herbe offerte compris entre 20 et 40% (figure 2). Pour des QO élevées (> 45 kg MS/j au ras du sol, voir tableau 1), la pente est toujours faible, de l'ordre de 0,1 kg MS d'herbe ingérée par kg MS d'herbe offerte, soit un taux de valorisation marginale de l'herbe offerte très faible (< 10%). En revanche, pour des QO très faibles (20 kg MS/j au ras du sol ou 10 kg MS/j à 5 cm, voir tableau 1), la pente est beaucoup plus élevée, avec une variation de l'ingestion d'herbe de l'ordre de 0,32, 0,55 et 0,70 kg MS par kg MS d'herbe offerte pour des hauteurs de coupe de l'herbe de 0, 3 et 5 cm respectivement, soit des taux de valorisation marginale de l'herbe offerte compris entre 30 et 70% (figure 2). Lorsque l'ingestion d'herbe est exprimée en propor-

Tableau 2. Equations de prévision intra-essai de l'effet de la quantité d'herbe offerte (QO, kg MS/vache/jour), l'herbe étant coupée au ras du sol (base QO₀), à 3 cm (base QO₃) ou à 5 cm (base QO₅) chez la vache laitière conduite en pâturage tournant.

Variable prédite	Type d'Equations	Nombre de données	Ecart-type résiduel	a	b	c	Effet ⁽¹⁾	
							QO	QO ²
Base QO₀								
Herbe ingérée, kg MS/j	Exponentiel ⁽²⁾	123	1,77	18,1	0,053		***	
Production laitière, kg/j	Exponentiel	101	2,91	21,2	0,071		***	
Production de lait 4%, kg/j	Exponentiel	104	2,82	20,2	0,081		***	
Matières utiles, kg/j	Exponentiel	87	0,180	1,47	0,075		***	
Matières grasses, kg/j	Exponentiel	93	0,109	0,82	0,081		***	
Matières protéiques, kg/j	Exponentiel	87	0,076	0,66	0,064		***	
Taux butyreux du lait, g/kg	Quadratique ⁽³⁾	93	1,22	45,7	-0,22	0,0024	***	**
Taux protéique du lait, g/kg	Quadratique	87	0,49	28,7	0,14	-0,0012	***	***
Durée d'ingestion, min/j	Quadratique	35	16,9	346	6,11	-0,052	***	**
Durée de rumination, min/j	Linéaire ⁽⁴⁾	33	16,2	404	-0,10		ns	
Vitesse d'ingestion, g MS/min	Linéaire	35	1,36	17,8	0,29		***	
Base QO₃								
Herbe ingérée, kg MS/j	Exponentiel	27	0,90	16,9	0,107		***	
Production laitière, kg/j	Exponentiel	16	2,41	19,7	0,138		ns	
Production de lait 4%, kg/j	Exponentiel	16	2,38	19,4	0,159		ns	
Matières utiles, kg/j	Exponentiel	16	0,179	1,43	0,160		ns	
Matières grasses, kg/j	Exponentiel	16	0,095	0,77	0,181		ns	
Matières protéiques, kg/j	Exponentiel	16	0,085	0,66	0,140		ns	
Taux butyreux du lait, g/kg	Quadratique	16	0,54	45,9	-0,34	0,0046	*	*
Taux protéique du lait, g/kg	Linéaire	16	0,31	33,0	0,03		ns	
Vitesse d'ingestion, g MS/min	Linéaire	6	1,07	18,0	0,44		t	
Base QO₅								
Herbe ingérée, kg MS/j	Exponentiel	81	1,16	17,5	0,136		***	
Production laitière, kg/j	Exponentiel	87	2,22	20,6	0,185		***	
Production de lait 4%, kg/j	Exponentiel	70	1,98	20,6	0,207		***	
Matières utiles, kg/j	Exponentiel	70	0,142	1,50	0,191		***	
Matières grasses, kg/j	Exponentiel	70	0,075	0,81	0,218		***	
Matières protéiques, kg/j	Exponentiel	70	0,071	0,69	0,165		***	
Taux butyreux du lait, g/kg	Linéaire	70	1,00	42,2	-0,15		***	
Taux protéique du lait, g/kg	Linéaire	70	0,66	31,1	0,08		***	
Durée d'ingestion, min/j	Quadratique	25	25,0	728	-20,85	0,549	*	*
Durée de rumination, min/j	Quadratique	19	18,1	434	2,03		t	
Vitesse d'ingestion, g MS/min	Quadratique	25	1,18	13,1	1,43	-0,030	*	*

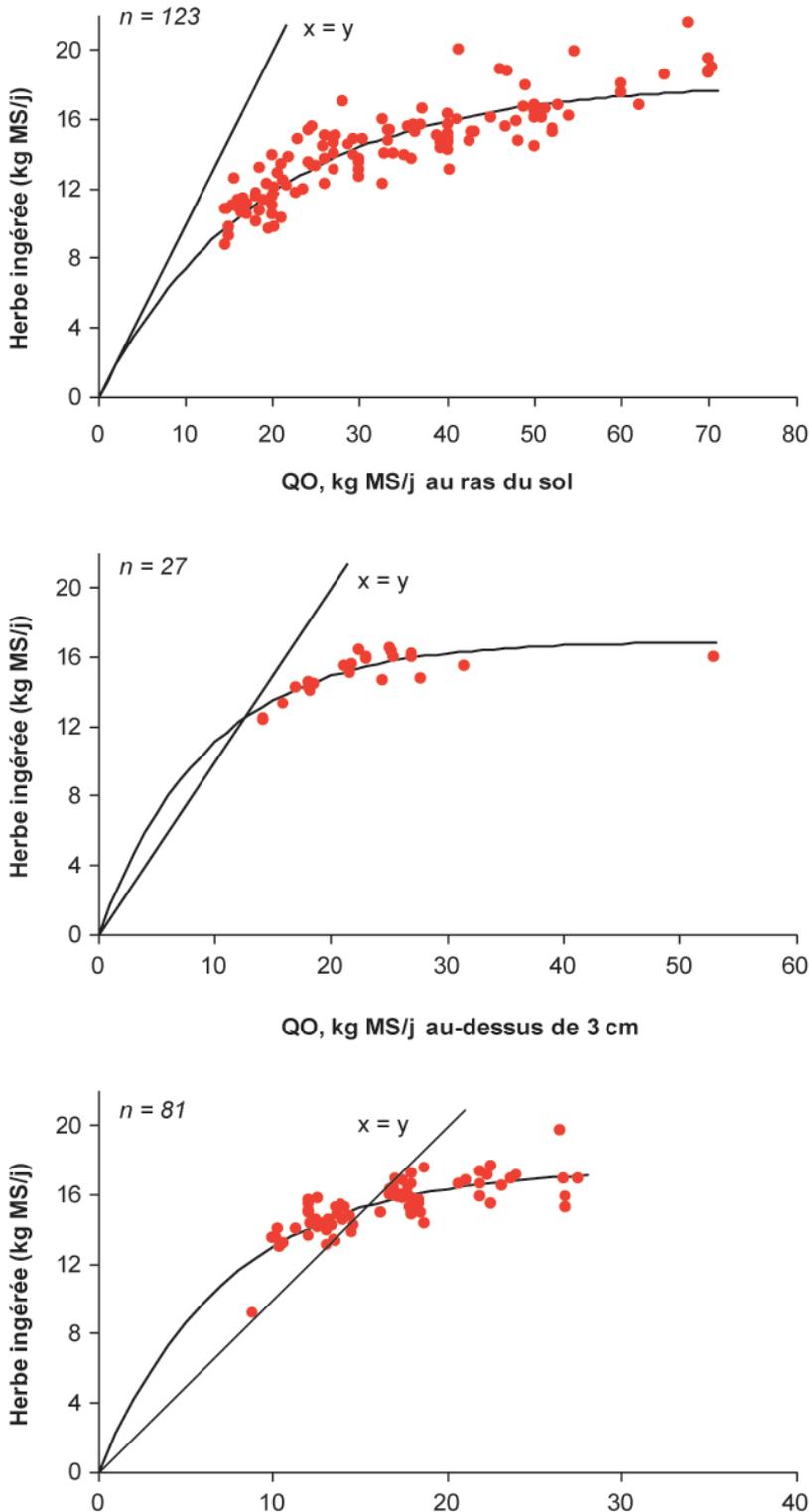
(1) Seuil de signification : ns non significatif ; t $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

(2) Equation de type exponentiel ; $Y = a \times (1 - \exp^{-b \times QO}) + \text{essai}$.

(3) Equation de type quadratique ; $Y = a + \text{essai} + b \times QO + c \times QO^2$.

(4) Equation de type linéaire ; $Y = a + \text{essai} + b \times QO$.

Figure 1. Relation intra-essai entre la quantité d'herbe offerte (QO) et l'ingestion d'herbe chez la vache laitière conduite en pâturage tournant, l'herbe étant coupée au ras du sol (base QO₀), à 3 cm (base QO₃) et à 5 cm (base QO₅).



Les équations de prévision sont données au tableau 2.

tion de l'ingestion maximale (asymptote), les variations relatives d'ingestion avec la QO sont quasi identiques, montrant logiquement que ces relations sont conceptuellement semblables, quelle que soit la hauteur de coupe de l'herbe (figure 2). L'ingestion herbe est de 70, 80 et 90%

de l'ingestion maximale pour des QO de 20, 28 et 40 kg MS/j d'herbe offerte, le maximum (100%) étant atteint pour une QO de l'ordre de 70 kg MS/j mesurée au ras du sol. L'ingestion maximale atteinte au pâturage semble supérieure de 5-10% à l'ingestion mesurée à l'auge (voir § 2.7).

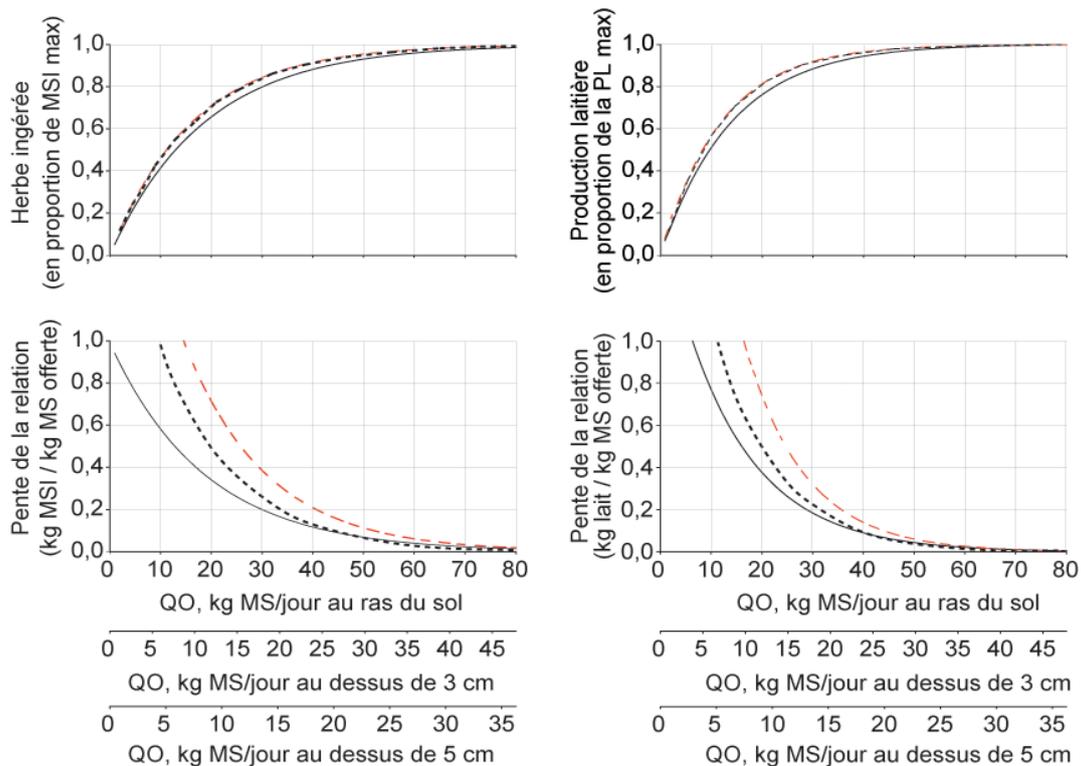
Dans les trois bases de données, d'une manière générale, les lois de réponse à la QO des productions de lait, de lait 4%, de matières grasses et de matières protéiques sont, comme l'ingestion d'herbe, de type exponentiel décroissant (figure 2 et tableau 2). Les variations relatives de production laitière avec la QO, lorsqu'elles sont exprimées en proportion de la production laitière maximale (asymptote), suivent globalement les mêmes lois que celles de l'ingestion, les pentes étant par ailleurs assez semblables (figure 2). La production laitière est de 70, 80 et 90% de la production laitière maximale pour des QO de 15, 20, et 30 kg MS/j d'herbe offerte mesurée au ras du sol, le maximum étant atteint pour une QO de l'ordre de 60 kg MS/j.

Les effets de la QO sur la composition du lait et le comportement alimentaire sont décrits dans le tableau 2. Dans la base QO₀, le taux butyreux du lait diminue et le taux protéique du lait s'accroît lorsque la QO augmente. Les variations sont significatives uniquement lorsque la QO est faible (réponses quadratiques). La durée d'ingestion est la plus faible pour les QO les plus faibles (+ 3 min d'ingestion/jour par kg MS de QO₀) et varie peu lorsque la QO est moyenne à élevée (réponse quadratique). La vitesse d'ingestion d'herbe augmente linéairement avec la QO, de 0,29 g MS/min par kg MS de QO₀. La durée journalière de rumination ne varie pas avec la QO. Dans la base QO₃, le taux butyreux diminue lorsque la QO augmente, mais principalement lorsque la QO est faible (réponse quadratique). Le taux protéique du lait ne varie pas avec la QO₃. Sur le plan comportemental (données très peu nombreuses), seule la vitesse d'ingestion est légèrement affectée par la QO₃, et tend à augmenter linéairement lorsque la QO augmente. Dans la base QO₅, le taux butyreux du lait diminue linéairement et le taux protéique du lait augmente linéairement lorsque la QO augmente. La durée d'ingestion diminue puis augmente lorsque la QO augmente (réponse quadratique). La durée de rumination tend à augmenter linéairement avec la QO₅. La vitesse d'ingestion d'herbe s'accroît de façon quadratique avec la QO₅, avec une pente forte uniquement pour des QO faibles.

2.3 / Analyse globale des effets de la quantité d'herbe offerte

Les réponses d'ingestion et de production des vaches à la quantité d'herbe offerte étant conceptuellement les mêmes dans les trois bases de données, une analyse a été conduite sur la base QO₀, en recalculant la biomasse d'herbe puis la QO au ras du sol dans tous les articles (Pérez-Prieto et Delagarde 2012 et 2013).

Figure 2. Relation intra-essai entre la quantité d’herbe offerte (QO, kg MS/vache/j) et l’ingestion d’herbe (MSI) relative, exprimée en proportion de l’ingestion maximale (MSI max) (graphes de gauche) et la production laitière (PL) relative, exprimée en proportion de la production laitière maximale (PL max) (graphes de droite) chez la vache laitière conduite en pâturage tournant.



Les courbes ont été construites à partir des équations de prévision indiquées au tableau 2 et issues de chaque base de données (bases QO₀ (—), QO₃ (---) et QO₅ (- - -)).

Tableau 3. Equations de prévision intra-essai globales de l’effet de la quantité d’herbe offerte (QO, kg MS/vache/jour) chez la vache laitière conduite en pâturage tournant.

Pour l’ensemble des données d’ingestion d’herbe, de production laitière et de production de matières utiles disponibles dans la base QOG, les QO au ras du sol, à 3 cm et à 5 cm ont été estimées en simulant des coupes d’herbe au ras du sol, à 3 cm et à 5 cm. Pour les données de composition du lait et de comportement alimentaire, moins nombreuses, les relations ont été établies en simulant uniquement une coupe d’herbe au ras du sol.

Variable prédite	Type d’équations	Nombre de données	Ecart-type résiduel	a	b	c	Effet ⁽¹⁾	
							QO	QO ²
Herbe ingérée, kg MS/j								
QO ₀	Exponentiel ⁽²⁾	231	1,53	17,8	0,057		***	
QO ₃	Exponentiel	231	1,48	18,0	0,098		***	
QO ₅	Exponentiel	231	1,74	17,7	0,142		***	
Production laitière, kg/j								
QO ₀	Exponentiel	204	2,57	21,1	0,073		***	
QO ₃	Exponentiel	204	2,61	21,1	0,131		***	
QO ₅	Exponentiel	204	2,83	20,8	0,194		***	
Matières utiles, kg/j								
QO ₀	Exponentiel	173	0,165	1,50	0,076		***	
QO ₃	Exponentiel	173	0,167	1,50	0,138		***	
QO ₅	Exponentiel	173	0,185	1,48	0,207		***	
QO₀								
Production de lait 4%, kg/j	Exponentiel	190	2,50	20,5	0,082		***	
Matières grasses, kg/j	Exponentiel	179	0,904	0,82	0,084		***	
Matières protéiques, kg/jour	Exponentiel	173	0,074	0,69	0,065		***	
Taux butyreux du lait, g/kg	Quadratique ⁽³⁾	179	1,08	44,9	- 0,19	0,0019	***	**
Taux protéique du lait, g/kg	Quadratique	173	0,56	29,2	0,12	- 0,0010	***	***
Durée d’ingestion, min/jour	Quadratique	66	24,3	415	4,18	- 0,033	**	*
Durée de rumination, min/j	Linéaire ⁽⁴⁾	54	17,1	424	0,27		ns	
Vitesse d’ingestion, g MS/min	Linéaire	66	1,31	19,2	0,24		***	

(1) Seuil de signification : ns non significatif ; t $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

(2) Equation de type exponentiel ; $Y = a \times (1 - \exp^{-b \times QO}) + \text{essai}$.

(3) Equation de type quadratique ; $Y = a + \text{essai} + b \times QO + c \times QO^2$.

(4) Equation de type linéaire ; $Y = a + \text{essai} + b \times QO$.

Les réponses de l'ingestion d'herbe, de la production de lait, de matières grasses et de matières protéiques aux variations de QO mesurée par une coupe de l'herbe au ras du sol sont toutes de type exponentiel décroissant (tableau 3 et figure 3), avec des pentes d'autant plus fortes que la QO est faible. Le taux butyreux est peu affecté par la QO dans une gamme élevée de QO, et est le plus élevé pour les QO les plus faibles (- 0,05 à - 0,08 g/kg par kg de QO) (réponse quadratique). Le taux protéique du lait est peu affecté par la QO dans une gamme élevée de QO, et est le plus faible pour les QO les plus faibles (+ 0,02 g/kg par kg de QO) (réponse

quadratique). La durée d'ingestion augmente de façon quadratique avec la QO, avec une pente de + 2 min/j par kg MS de QO lorsque la QO est faible, et une pente faible (< + 1 min/j par kg MS de QO) lorsque la QO est élevée. La durée de rumination n'est pas affectée par la QO. La vitesse d'ingestion d'herbe s'accroît linéairement de 0,24 g MS/min par kg MS de QO.

Il est également possible de prévoir les réponses de l'ingestion d'herbe et de la production laitière des vaches directement à partir de la QO indiquée dans les publications, en intégrant un effet linéaire de la hauteur de coupe de l'herbe

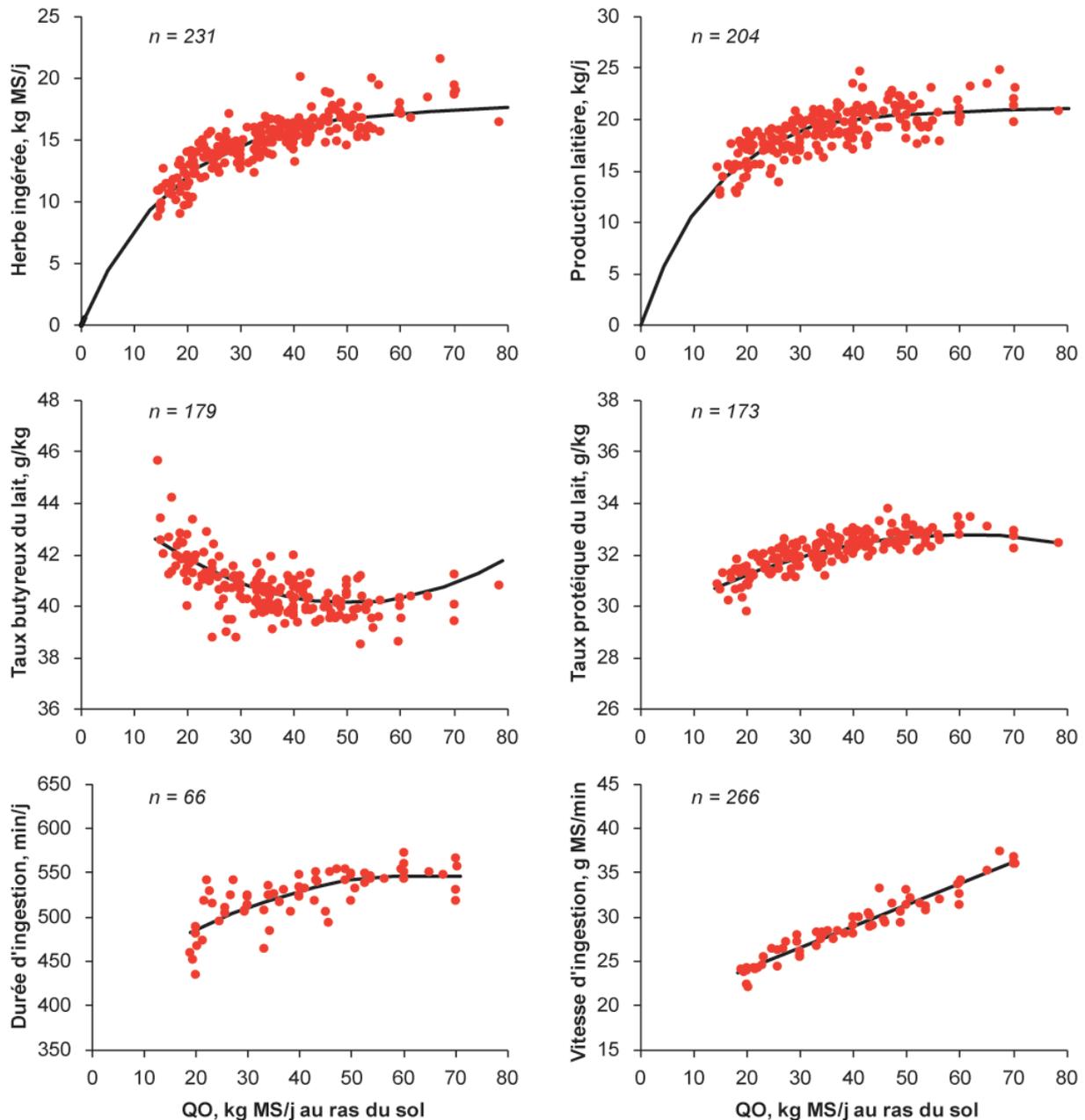
sur le paramètre de curvilinearité de l'équation (tableau 4). Ces équations de prévision ont ainsi un caractère générique car applicables quelles que soient la technique et la hauteur de coupe de l'herbe. La hauteur de coupe de l'herbe a aussi un effet marqué sur la relation entre le taux protéique du lait (TP, g/kg lait) et la QO :

$$TP = 29,4 + (0,115 + 0,026 \times HC) \times QO + (- 0,00095 - 0,00064 \times HC) \times QO^2 ;$$

$$etr = 0,557.$$

Le modèle reliant le taux butyreux du lait à la QO et à la hauteur de coupe de l'herbe n'est pas significatif.

Figure 3. Relation intra-essai entre la quantité d'herbe offerte (QO, kg MS/vache/j) (herbe coupée au ras du sol) et l'ingestion d'herbe, la production laitière, la composition du lait et le comportement alimentaire chez la vache laitière conduite en pâturage tournant (base QO_G).



Les équations de prévision sont données au tableau 3.

Tableau 4. Equations de prévision intra-essai globales de l'effet de la quantité d'herbe offerte (QO, kg MS/vache/jour) et de la hauteur de coupe de l'herbe (HC, cm) sur l'ingestion, la production laitière et la composition du lait chez la vache laitière conduite en pâturage tournant.

Ces équations ont été calculées sur toutes les données de la base QO_G.

Variable prédite	Nombre de données	Ecart-type résiduel	a	b	c	Effet ⁽²⁾	
						HC	QO
Herbe ingérée, kg MS/j ⁽¹⁾	231	1,49	17,8	0,055	0,0146	***	***
Production laitière, kg/j ⁽¹⁾	204	2,60	20,9	0,073	0,0192	***	***
Production de lait 4%, kg/j ⁽¹⁾	190	2,50	20,3	0,080	0,0259	***	***
Matières utiles, kg/j ⁽¹⁾	173	0,166	1,48	0,073	0,0249	***	***
Matières grasses, kg/j ⁽¹⁾	179	0,096	0,81	0,082	0,0257	***	***
Matières protéiques, kg/j ⁽¹⁾	173	0,075	0,68	0,061	0,0230	***	***

⁽¹⁾ Equation : $Y = a \times (1 - \exp^{-(b + c \times HC) \times QO}) + \text{essai}$.

⁽²⁾ Seuil de signification : *** $P < 0,001$.

2.4 / La réponse des animaux à la quantité d'herbe offerte dépend fondamentalement de la méthodologie de mesure (hauteur de coupe de l'herbe)

Des revues précédentes ont déjà montré les relations curvilinéaires entre la QO et l'ingestion des vaches laitières, soit avec une coupe de l'herbe au ras du sol (Delagarde *et al* 2001a, Delagarde et O'Donovan 2005), soit à 2 cm (Delagarde *et al* 2011a), soit à 3-5 cm (Baudracco *et al* 2010). La présente méta-analyse, fondée sur une base de données quasi exhaustive de la littérature, permet de prévoir les effets exponentiels décroissants de la QO sur l'ingestion et les performances des vaches laitières, quelle que soit la hauteur de coupe de l'herbe, donc à la fois dans une très large gamme de gestion du pâturage et de méthodologie de mesures. Elle a permis de montrer que, si les pentes des relations sont logiquement d'autant plus fortes que la hauteur de coupe de l'herbe est élevée (moins de biomasse d'herbe considérée au dénominateur pour une même variation d'ingestion ou de production), la forme de la relation est au contraire indépendante de la méthodologie de mesure utilisée. Elle permet également de mieux interpréter les écarts importants de recommandations et de réponses animales à la QO parfois observés entre différents pays, et de les attribuer clairement à la méthodologie de mesure, montrant la robustesse des équations obtenues ici.

2.5 / Réponses de la production et de la composition du lait à la quantité d'herbe offerte

Cette méta-analyse est la première qui décrit la relation exponentielle décroissante entre la QO et la production laitière des vaches. Jusqu'à présent, seules des équations établies sur des bases locales étaient disponibles, de type linéaire

(Maher *et al* 2003) ou quadratique (Delaby *et al* 2003, Delagarde et O'Donovan 2005), sans description de la variation des taux butyreux et protéique du lait. La relation exponentielle décroissante reliant production laitière à la QO est très cohérente avec celle reliant l'ingestion d'herbe à la QO ; elle peut être prédite là encore quelle que soit la hauteur de coupe de l'herbe. Pour une même variation de QO, la réponse marginale de production laitière est proche de 0,8 kg de lait/kg MS d'herbe ingérée, mais avec une pente proche de 1,0 pour une QO faible à moyenne et proche de 0,7 pour une QO moyenne à élevée. Cette plus forte réponse laitière par kg d'herbe ingérée pour les QO faibles peut s'expliquer par le niveau d'ingestion limité et le bilan énergétique négatif qui en résulte. En effet, Coulon et Rémond (1991) ont bien montré que la réponse marginale de production laitière des vaches était d'autant plus forte que les apports énergétiques étaient faibles, sans doute en raison d'une adaptation métabolique réduisant les dépenses énergétiques, mais aussi peut-être d'une meilleure valorisation et digestibilité de l'herbe sélectionnée liée au plus faible niveau d'ingestion (Sauvant et Nozière 2013). Pourtant, il est connu que la valeur nutritive intrinsèque de l'herbe sélectionnée décroît lorsque la QO diminue, en raison d'une profondeur de défoliation plus élevée, d'une hauteur de sortie de parcelle plus faible (INRA 2007), et d'un accroissement modéré de la proportion de gaines, de tiges et de la teneur en fibres du régime (Delagarde *et al* 2000).

De même, l'accroissement du taux butyreux du lait lorsque la QO diminue pourrait s'expliquer au moins partiellement par une modification du régime alimentaire des vaches et des orientations fermentaires ruminales, avec davantage de gaines, de tiges, de tissus morts et de fibres ingérées (Jarrige *et al* 1995, Delagarde *et al* 2000). La réduction du niveau d'ingestion pourrait également

conduire à une concentration relative des matières grasses produites dans un volume de lait plus faible. L'augmentation quadratique du taux protéique du lait avec la QO est cohérente avec la réponse de l'ingestion, puisque la relation positive entre le taux protéique et les apports énergétiques a été bien documentée (Coulon et Rémond 1991). Par ailleurs, ces relations générales établies pour des essais de type analytique pendant une durée relativement courte (quelques semaines généralement) sont totalement en cohérence avec les effets à long terme du chargement sur la production et la composition du lait (McCarthy *et al* 2011).

Le rapport TB/TP du lait augmente lorsque la QO diminue, en raison des variations inverses et d'amplitude assez similaire des taux butyreux et protéique lors d'une réduction de la QO (figure 3). Cette variation du rapport TB/TP est cependant relativement faible, de l'ordre de 10%, entre des quantités d'herbe offertes faibles (TB/TP = 1,34) et élevées (TB/TP = 1,23). La teneur en matières utiles du lait (somme des matières grasses et des matières protéiques) ne varie pas avec la QO, et la production journalière de matières utiles suit globalement la même loi de réponse exponentielle décroissante que la production laitière brute.

2.6 / Adaptation comportementale des vaches aux variations de quantité d'herbe offerte

Les variations de la durée d'ingestion avec la QO sont proportionnellement très faibles par rapport aux variations d'ingestion, avec une réduction de la durée d'ingestion observée uniquement pour des QO très faibles. Cela montre que la durée d'ingestion n'est pas une variable d'ajustement utilisée par les vaches laitières pour essayer de maintenir leur niveau d'ingestion en cas de restriction

de la disponibilité en herbe, qui limite fortement leur vitesse d'ingestion. Ce comportement des vaches est spécifique du pâturage tournant et diffère de celui observé en pâturage continu (Rook *et al* 1994, Gibb *et al* 1997). En effet, en pâturage continu, la faible vitesse d'ingestion observée pour des hauteurs d'herbe très faibles, limitée par le faible poids des bouchées (Prache et Peyraud 1997), est partiellement compensée par un accroissement de la durée d'ingestion, jusqu'à plus de 650 min/jour (Hodgson 1986). Dans notre base de données, la durée d'ingestion a très rarement dépassé 600 min/jour (Bargo *et al* 2002, Kennedy *et al* 2007), avec la majorité des études rapportant des durées d'ingestion comprises entre 450 et 550 min/jour. En pâturage tournant, offrir peu d'herbe aux vaches signifie toujours les forcer à pâturer plus profondément dans le couvert végétal, et donc accroître leur temps passé à pâturer des strates moins accessibles ou moins préhensibles. Ceci limite intrinsèquement leur vitesse d'ingestion (Barrett *et al* 2001), mais aussi probablement leur motivation à pâturer dans de telles conditions. Ceci est notamment visible en pâturage tournant simplifié où, en fin de parcelle, malgré une surface à explorer importante et un degré de restriction alimentaire très sévère, les vaches (Delagarde *et al* 2010) et les brebis (Penning *et al* 1994) n'augmentent pas leur durée d'ingestion, contrairement à ce qui est observé en pâturage continu (Penning *et al* 1991).

2.7 / Implications pratiques des effets de la quantité d'herbe offerte

Le fait que les lois de réponse relatives de l'ingestion et de la production laitière à la QO en pâturage tournant soient conceptuellement indépendantes de la hauteur de coupe de l'herbe montre que la méthodologie utilisée (hauteur, outil et surface de coupe) n'a pas d'effet propre sur la relation offert/ingéré/production, ce qui est logique puisque la prairie offerte est la même bien qu'on puisse la couper à des hauteurs différentes. Cela a pu être montré en recalibrant toutes les biomasses d'herbe mesurées à différentes hauteurs (entre 0 et 5 cm) pour toutes les publications, en utilisant des équations de passage tenant compte des densités spécifiques à chaque strate du couvert végétal. Ces équations de passage ont été développées essentiellement pour des couverts prairiaux de graminées (ray-grass anglais surtout), avec ou sans trèfles (Delagarde *et al* 2000, Delagarde *et al* 2011a, Pérez-Prieto et Delagarde 2013), et sont compatibles avec les densités ou les relations hauteur/biomasse d'herbe déterminées en Australie (Stockdale et Dellow 1995). Avec le développement de prairies plus diversifiées, contenant de

la luzerne ou de la chicorée par exemple, ou avec d'autres types de couverts pâturés (céréales d'hiver, inter-cultures), les relations offert/ingéré/production sont sans doute à reconsidérer de façon globale, au delà de la probable inadéquation des équations de passage actuelles, nécessitant des travaux spécifiques pour ces nouveaux fourrages pâturés.

Les équations proposées permettent de prévoir l'effet des pratiques sur les performances des vaches au pâturage. Cependant, les valeurs des asymptotes pour les relations exponentielles correspondent aux caractéristiques moyennes des troupeaux et des conditions de pâturage de la base de données. Par exemple, les valeurs maximales de l'ingestion d'herbe et de la production laitière sont de 18 kg MS/j et de 21 kg de lait/j, mais des valeurs plus élevées peuvent être observées au pâturage pour des vaches de potentiel génétique élevé et des prairies d'excellente qualité (Bargo *et al* 2002, McCarthy *et al* 2007). Les équations rapportées dans cette méta-analyse deviennent plus universellement applicables si l'asymptote est considérée comme une valeur potentielle qui peut être modifiée selon les caractéristiques du troupeau (sa capacité d'ingestion et sa production potentielle) et de la prairie (son ingestibilité potentielle). De nombreux modèles de prévision de l'ingestion sont d'ailleurs basés sur ce principe, l'ingestion d'herbe au pâturage étant considérée comme une proportion de l'ingestion volontaire de la même herbe fauchée et distribuée à volonté à l'auge (Sibbald *et al* 1979, Freer *et al* 1997, Herrero *et al* 2000, Jouven *et al* 2008, Delagarde *et al* 2011a). Dans ce cas, seule la partie de l'équation décrivant la forme de la loi de réponse peut être utilisée, comme prédicteur des variations relatives de l'ingestion d'herbe ou de la production laitière. Ici, l'asymptote de l'équation générale reliant quantité d'herbe offerte et ingestion d'herbe est de 17,8 kg MS/jour. Cela est supérieur d'environ 5-10% à l'ingestion volontaire que l'on peut estimer grossièrement à partir des caractéristiques moyennes de l'herbe offerte et des vaches dans la base de données (herbe : 77% de dMO et 0,98 UEL/kg MS, vaches : 530 kg de poids vif, produisant 19 kg de lait, soit une capacité d'ingestion d'environ 16 UEL, ce qui permet de prévoir une ingestion volontaire d'herbe d'environ 16,3 kg MS/jour). Le fait que les vaches mangent plus au pâturage en situation pléthorique qu'à l'auge avec de l'herbe fauchée peut s'expliquer par le fait qu'elles sélectionnent alors une herbe plus digestible et plus ingestible, ce qui est déjà pris en compte dans les modèles de prévision de l'ingestion au pâturage (asymptote égale à 1,08 fois l'ingestion volontaire : Delagarde *et al* 2011a) et dans le module pâturage des vaches laitières du logiciel INRAtion (INRA 2007).

3 / Prévision des effets de la biomasse d'herbe

3.1 / Description de la base de données

La base B_G comprend 27 comparaisons de biomasses d'herbe intra-essai, provenant de 15 articles publiés entre 1986 et 2012, toutes en pâturage rationné, sur des prairies de ray-grass anglais (18) ou d'associations ray-grass/trèfle (9). Les comparaisons de biomasses d'herbe ont été réalisées 11 fois à même QO au ras du sol (base B₀ : Irlande, Nouvelle-Zélande, Australie et France), 3 fois à même QO au-dessus de 3 cm (base B₃ : Irlande et France), et 13 fois à même QO au-dessus de 5 cm (base B₅ : Royaume-Uni, Irlande et France). Les valeurs moyennes des biomasses d'herbe faible et élevée comparées sont de 3,2 et 4,7 t MS/ha, 2,1 et 4,0 t MS/ha, et 1,7 et 3,2 t MS/ha, pour des QO moyennes de 31, 19 et 17 kg MS/jour, dans les bases B₀, B₃ et B₅, respectivement. La digestibilité de l'herbe a peu varié entre bases de données et entre biomasses d'herbe comparées, corroborant le fait que l'effet de la biomasse d'herbe étudié ici est lié principalement à des variations de structure et non de valeur nutritive du couvert végétal.

3.2 / Effets de la biomasse d'herbe dans chaque base de données

A même QO mesurée au ras du sol (base B₀), l'ingestion d'herbe augmente linéairement quand la biomasse d'herbe s'accroît (+ 1,58 kg MS/jour par t MS/ha), de même que la vitesse d'ingestion d'herbe (4,83 g MS/min par t MS/ha) (tableau 5 et figure 4). La production laitière tend également à augmenter avec la biomasse d'herbe, de 1,04 kg de lait par t MS/ha (tableau 5 et figure 5). La durée d'ingestion n'est pas affectée par la biomasse d'herbe.

A même QO au-dessus de 3 cm (base B₃), l'ingestion d'herbe et la production laitière ne sont pas affectées par la biomasse d'herbe. La durée d'ingestion tend à décroître (- 22 min/jour par t MS/ha) et la vitesse d'ingestion d'herbe tend à augmenter (+ 1,6 g MS/min par t MS/ha) lorsque la biomasse d'herbe augmente.

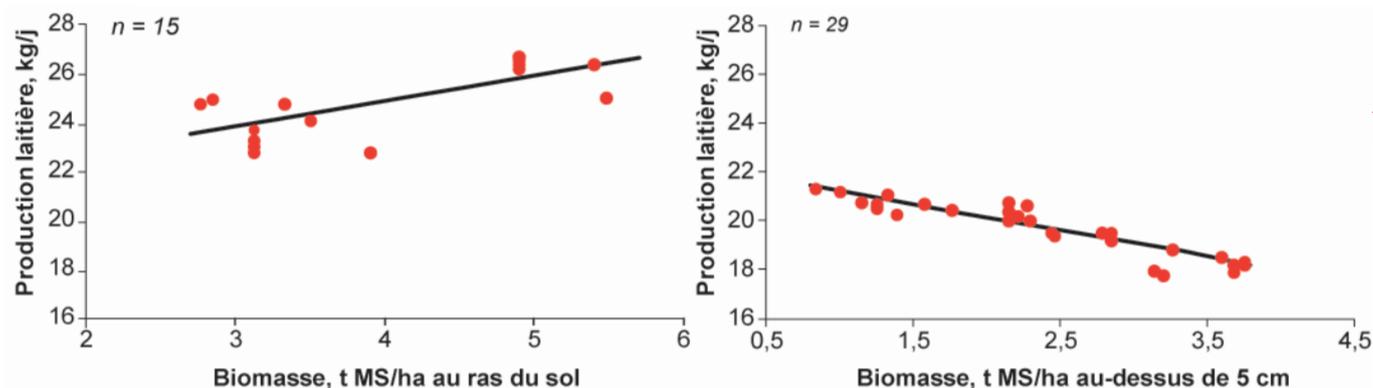
A même QO au-dessus de 5 cm (base B₅), l'ingestion d'herbe (- 0,65 kg MS/jour par t MS/ha), la production laitière (- 1,09 kg/jour par t MS/ha), la production de lait 4% (- 1,04 kg/jour par t MS/ha) et la production de matières grasses protéiques (- 41 g/jour par t MS/ha) diminuent lorsque la biomasse d'herbe augmente, tandis que la production de matières grasses tend à diminuer (- 33 g/jour par t MS/ha). En effet, le taux butyreux du lait tend à augmenter lorsque la biomasse d'herbe

Tableau 5. Equations de prévision intra-essai de l'effet de la biomasse d'herbe (B , t MS/ha) sur l'ingestion d'herbe, la production laitière et le comportement alimentaire chez la vache laitière conduite en pâturage tournant, selon que les biomasses d'herbe sont comparées en intra-essai à même quantité d'herbe offerte (QO , kg MS/vache/jour) au ras du sol (base B_0), au-dessus de 3 cm (base B_3) ou au-dessus de 5 cm (base B_5).

Variable prédite	Equation : $Y = a + \text{essai} + b \times B$				Effet ¹ B
	Nombre de données	Ecart-type résiduel	a	b	
Base B_0					
Herbe ingérée, kg MS/j	23	1,22	8,5	1,58	**
Production laitière, kg/j	15	1,37	20,7	1,04	t
Durée d'ingestion, min/j	10	14,7	493	- 3,1	ns
Vitesse d'ingestion, g MS/min	10	1,91	9,9	4,83	**
Base B_3					
Herbe ingérée, kg MS/j	6	0,01	14,8	0,17	ns
Durée d'ingestion, min/j	6	4,5	583	- 22,0	t
Vitesse d'ingestion, g MS/min	6	0,88	24,8	1,63	t
Base B_5					
Herbe ingérée, kg MS/j	24	0,64	17,6	- 0,65	**
Production laitière, kg/j	29	0,70	22,3	- 1,09	**
Production de lait 4%, kg/j	23	0,85	22,1	- 1,04	*
Matières grasses, kg/j	23	41,8	850	- 32,7	t
Matières protéiques, kg/j	23	34,8	743	- 41,1	**
Taux butyreux du lait, g/kg	23	1,41	37,0	0,88	t
Taux protéique du lait, g/kg	23	0,37	33,3	- 0,16	ns

¹ Seuil de signification : ns non significatif ; t $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

Figure 5. Relation intra-essai entre la biomasse d'herbe à l'entrée des animaux dans une nouvelle parcelle et la production laitière chez la vache laitière conduite en pâturage tournant lorsque les biomasses sont comparées à même QO , l'herbe étant coupée au ras du sol (base B_0) ou à 5 cm (base B_5).



Les équations de prévision sont données au tableau 5.

Tableau 6. Pentés moyennes de l'effet de la biomasse d'herbe (t MS/ha) sur l'ingestion d'herbe, la production laitière et le comportement alimentaire chez la vache laitière conduite en pâturage tournant (base globale), selon que les biomasses d'herbe sont comparées en intra-essai à même quantité d'herbe offerte (QO , kg MS/jour) au ras du sol (QO_0), au-dessus de 3 cm (QO_3) ou au-dessus de 5 cm (QO_5).

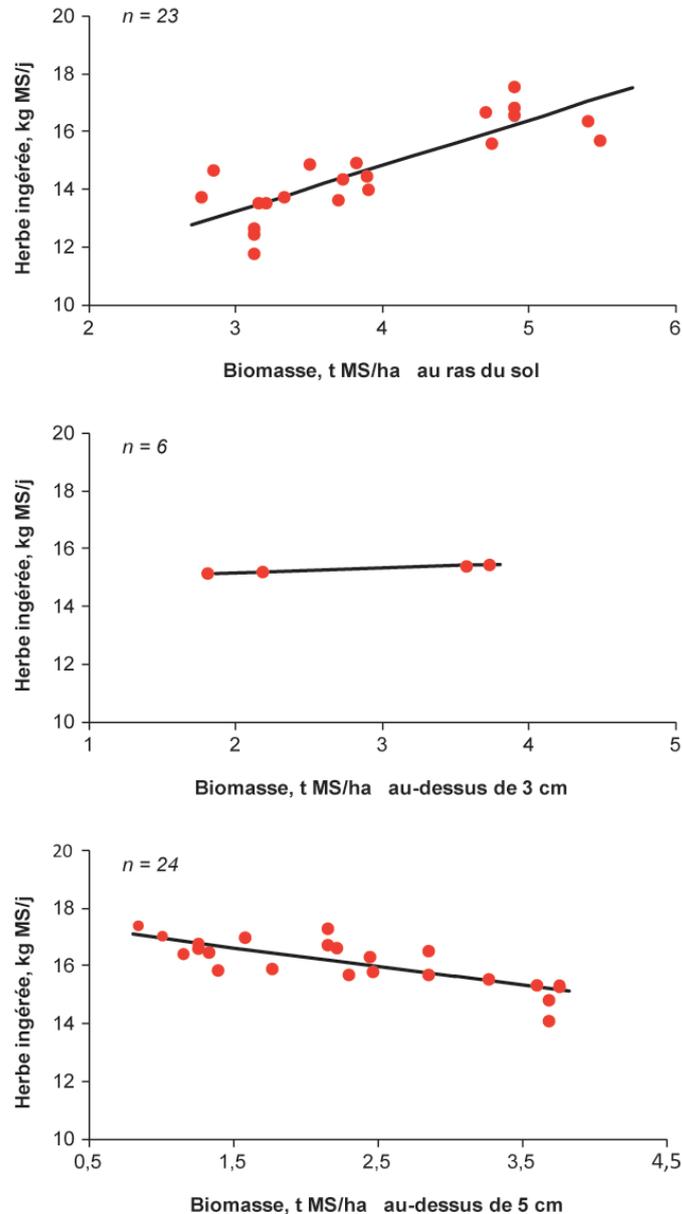
Variable prédite	Nombre de données	Biomasses comparées à même			Ecart-type résiduel	Effet HC ^(1,2)	
		QO_0	QO_3	QO_5		Linéaire	Quadratique
Ingestion d'herbe, kg MS/jour /t	25	1,74 ⁽³⁾	0,21	- 0,81	0,983	***	ns
Production laitière, kg/jour /t	21	1,23	0,06	- 0,92	1,513	**	ns
Vitesse d'ingestion, g MS/min /t	12	5,12	0,95	- 1,83	1,839	***	ns

(1) Seuil de signification : ns non significatif ; t $P < 0,1$; * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$.

(2) HC : hauteur de coupe de l'herbe.

(3) Exemple d'interprétation : l'ingestion d'herbe s'accroît de 1,74 kg MS/jour pour chaque tonne de MS/ha en plus, lorsque deux biomasses d'herbe sont comparées à même QO_0 .

Figure 4. Relation intra-essai entre la biomasse d'herbe à l'entrée des animaux dans une nouvelle parcelle et l'ingestion d'herbe chez la vache laitière conduite en pâturage tournant lorsque les biomasses d'herbe sont comparées à même QO, l'herbe étant coupée au ras du sol (base B_0), à 3 cm (base B_3) ou à 5 cm (base B_5).



Les équations de prévision sont données au tableau 5.

augmente (+ 0,9 g/kg par t MS/ha), alors que le taux protéique n'est pas affecté par la biomasse d'herbe (tableau 5).

3.3 / Analyse globale des effets intra-essai de la biomasse d'herbe

Lorsque toutes les données sont regroupées (base B_G), la hauteur de coupe de l'herbe affecte largement la relation entre biomasse d'herbe et ingestion d'herbe, production laitière ou vitesse d'ingestion (tableau 6). Ainsi, les pentes des relations diminuent toutes lorsque la hauteur de coupe de l'herbe augmente, avec des pentes positives, nulles, et négatives lorsque les biomasses d'herbe sont comparées à même QO_0 , QO_3 et QO_5 ,

respectivement. Par exemple, l'ingestion d'herbe et la production laitière s'accroissent quand la biomasse d'herbe augmente à même QO_0 (+ 1,7 kg MS/jour et + 1,2 kg de lait/jour par t MS/ha), sont peu affectées par la biomasse d'herbe à même QO_3 (+ 0,2 kg MS/jour et + 0,1 kg de lait par t MS/ha), et diminuent quand la biomasse d'herbe augmente à même QO_5 (- 0,8 kg MS/jour et - 0,9 kg de lait par t MS/ha) (figures 4 et 5). De la même façon, la vitesse d'ingestion d'herbe augmente avec la biomasse d'herbe à même QO_0 (+ 5,1 g MS/min par t MS/ha), mais diminue lorsque la biomasse d'herbe augmente à même QO_5 (- 1,8 g MS/min par t MS/ha). La relation entre biomasse d'herbe et durée d'ingestion n'est pas affectée par la hauteur de coupe de l'herbe.

3.4 / L'effet de la biomasse d'herbe dépend largement de la méthodologie de mesure (hauteur de coupe de l'herbe)

Les résultats de cette méta-analyse confirment les hypothèses et principes de calcul du module pâturage du logiciel INRation (Delagarde 2009, Delagarde *et al* 2011a) ainsi que les résultats expérimentaux de Pérez-Prieto *et al* (2013), qui considèrent ou montrent que les effets de la biomasse d'herbe sur l'ingestion et la production laitière sont inféodés à la hauteur à laquelle la biomasse d'herbe est mesurée. Un accroissement de la biomasse d'herbe présente lorsque les vaches entrent dans une

nouvelle parcelle a des effets positifs ou négatifs sur l'ingestion et la production selon que l'on coupe l'herbe au ras du sol ou à 5 cm. De même, ce travail confirme que la biomasse d'herbe n'a aucun effet sur l'ingestion d'herbe et la production laitière à même quantité d'herbe offerte au-dessus de 3 cm. Le fait que la pente de la relation entre la biomasse d'herbe et l'ingestion d'herbe (ou la production laitière) soit 3 fois plus élevée lorsque l'herbe est coupée au ras du sol qu'à 5 cm (+ 1,6 contre - 0,5 kg MS ingéré par tonne MS/ha) montre que l'ingestion d'herbe est beaucoup plus sensible à la biomasse d'herbe lorsqu'on raisonne au ras du sol plutôt qu'à 5 cm. Il sera donc particulièrement important de tenir compte de la biomasse et de la quantité d'herbe offerte pour estimer l'ingestion d'herbe lorsque l'herbe est coupée au ras du sol, alors que la quantité d'herbe offerte seule peut permettre de relativement bien prévoir l'ingestion d'herbe lorsque l'herbe est coupée à 5 cm (Delagarde *et al* 2011b), du moins dans une gamme courante de variation de biomasse d'herbe.

Les raisons de cet effet majeur de la hauteur de coupe sur la relation entre biomasse d'herbe et ingestion ont été évoquées par Delagarde *et al* (2001a), puis expliquées et représentées graphiquement par Delagarde *et al* (2011a) et Delagarde et Peyraud (2013), et enfin démontrées expérimentalement par Pérez-Prieto *et al* (2013). Brièvement, si l'on considère que les vaches sont au moins partiellement capables de pâturer dans les strates comprises entre 2 et 5 cm du sol, mais pas les strates comprises entre 0 et 2 cm, il est possible de montrer que la quantité d'herbe offerte mesurée au ras du sol surestime d'autant plus la quantité d'herbe réellement disponible que la biomasse d'herbe est faible (encadré 1). De même, la quantité d'herbe offerte au-dessus de 5 cm sous-estime d'autant plus la quantité d'herbe réellement disponible que la biomasse d'herbe est élevée. Dans des prairies de zones tempérées à base de ray-grass, ce travail confirme donc que la quantité d'herbe offerte mesurée au-dessus de 2-3 cm est bien le meilleur indicateur de disponibilité en herbe pour les vaches laitières, car elle permet de bien prévoir l'ingestion d'herbe par les vaches quelle que soit la biomasse d'herbe, au moins dans la gamme couramment rencontrée en pratique (Delagarde *et al* 2011b, O'Neill *et al* 2012). Des biomasses d'herbe faibles (hauteur mesurée à l'herbomètre à plateau à l'entrée dans la parcelle inférieure à 8 cm, soit moins de 1 t MS/ha au-dessus de 5 cm) peuvent quand même limiter l'ingestion d'herbe comme en pâturage continu, car la hauteur pâturée pendant le temps de séjour et *a fortiori* en fin de parcelle peut alors être

très faible (< 3-4 cm, Pérez-Prieto *et al* 2011).

3.5 / Adaptation comportementale des vaches aux variations de biomasse d'herbe

Lorsque les variations de biomasse d'herbe n'induisent pas de variations de valeur nutritive de l'herbe, comme c'est globalement le cas dans cette base de données, l'effet de la biomasse d'herbe sur l'ingestion passe par des mécanismes « non-nutritionnels » liés à la facilité de préhension ou préhensibilité de l'herbe (Poppi *et al* 1987, Prache et Peyraud 1997), donc par des adaptations comportementales. Ici, l'effet de la biomasse d'herbe sur l'ingestion est clairement relié à des variations de la vitesse d'ingestion, puisque les variations de la durée d'ingestion sont non significatives (bases B₀ et B₅) ou faibles (base B₃).

Dans la base B₀, la forte augmentation de la vitesse d'ingestion d'herbe avec l'accroissement de la biomasse d'herbe (+ 5 g MS/min par t MS/ha) est en bonne cohérence avec les résultats des essais sur vaches laitières conduites en pâturage continu avec des hauteurs (ou biomasses) d'herbe croissantes (Rook *et al* 1994, Gibb *et al* 1997). En revanche, la faible variation de durée d'ingestion lorsque la biomasse d'herbe diminue est spécifique du pâturage tournant, car, lorsque la surface est non limitante (pâturage continu), les vaches pâturent plus longtemps afin de compenser la réduction majeure de la vitesse d'ingestion (cf. § 2.6). Cette méta-analyse montre donc que les adaptations comportementales journalières des vaches à des variations de biomasse d'herbe sont différentes entre systèmes de pâturage (tournant et continu).

Lorsque l'herbe est coupée à 5 cm, il est remarquable que la réduction d'ingestion observée lorsque la biomasse d'herbe augmente est reliée également à une réduction de la vitesse d'ingestion d'herbe (- 2 g MS/min par t MS/ha, tableau 6). Cela semble *a priori* en parfaite contradiction avec les nombreux résultats observés à court terme, qui montrent tous une relation positive et forte entre biomasse d'herbe et vitesse d'ingestion d'herbe à l'échelle de la minute ou de l'heure (Hodgson 1986, Rook *et al* 1994, Prache et Peyraud 1997). En pâturage tournant, la biomasse d'herbe n'est mesurée qu'avant le jour d'entrée des vaches dans la parcelle. Mais les résultats indiquent qu'une description même détaillée de la structure du couvert végétal lorsque les vaches entrent dans une nouvelle parcelle n'est pas suffisante pour prévoir le comportement alimentaire moyen des vaches laitières sur l'ensemble du temps de séjour dans la parcel-

le. En effet, les caractéristiques initiales du couvert végétal permettent de bien prévoir les conditions de pâturage au début du séjour sur la parcelle, mais pas ultérieurement dans la suite du processus de défoliation à la fin du séjour sur la parcelle. En fin de processus de défoliation, il faut faire l'hypothèse d'une très forte réduction de la vitesse d'ingestion sur les prairies de biomasse d'herbe élevée pour atteindre au final une vitesse d'ingestion moyenne plus faible que sur les prairies de biomasse d'herbe faible. A même QO₅, ceci s'explique par une très forte réduction de surface offerte pour les biomasses d'herbe élevées, qui accroît la profondeur de défoliation et conduit à une réduction drastique de la hauteur résiduelle de limbes (Pérez-Prieto *et al* 2013).

Lorsque des biomasses d'herbe sont comparées à même QO₃ (base B₃), donc sans variation d'ingestion, la durée et la vitesse d'ingestion varient peu, suggérant des conditions de pâturage et de préhensibilité moyennes assez semblables entre biomasses d'herbe. Cette hypothèse semble vérifiée par des mesures fines de structure du couvert végétal, comme la hauteur moyenne des limbes foliaires en sortie de parcelle (hauteur de la talle - hauteur de la gaine). Ce critère, reconnu comme un bon prédicteur de la sévérité de pâturage et de l'ingestion des vaches (Wade 1991, Delagarde *et al* 2001b), est en effet identique entre prairies de biomasses d'herbe différentes lorsqu'elles sont comparées à même QO₃, ce qui n'est pas le cas lorsqu'elles sont comparées à même QO₅ ou QO₀ (Pérez-Prieto *et al* 2013).

3.6 / Implications pratiques des effets de la biomasse d'herbe

Cette méta-analyse montre qu'une partie de la variation de l'ingestion d'herbe attribuée dans la littérature à des changements de biomasse d'herbe en pâturage tournant n'est pas liée à un effet strict de la biomasse mais plutôt à la méthodologie choisie pour conduire l'expérimentation. Ainsi, toute pratique ou tout traitement expérimental modifiant directement ou indirectement la biomasse d'herbe (type de prairie, fertilisation azotée) peut ainsi affecter l'ingestion d'herbe et la production laitière, positivement ou négativement, selon les choix méthodologiques des expérimentateurs. L'effet final du traitement testé sera alors une combinaison de l'effet propre du traitement et d'un effet indirect de la biomasse d'herbe, variable selon la hauteur de coupe utilisée.

Quantifier l'effet de la biomasse d'herbe sur l'ingestion et les performances à même quantité d'herbe offerte se fait généralement dans des essais de court à

moyen terme (1 à 3 mois), pour contrôler du mieux possible les conditions expérimentales. Qu'en est-il à plus long terme, sur une ou plusieurs saisons de pâturage, dans des conditions classiques d'élevage ? En pratique, pour une saison donnée, modifier la biomasse d'herbe lorsque les vaches entrent dans une nouvelle parcelle se fait essentiellement en modifiant la vitesse de rotation ou les intervalles entre pâturages (10, 20, 30 ou 40 jours...). Des travaux anciens (McFeely *et al* 1975, Leaver 1985) ou récents (Wims *et al* 2014) montrent que ni la production laitière ni l'ingestion quotidienne des vaches laitières ne sont affectées par l'intervalle entre pâturages ou par la biomasse d'herbe, à l'échelle de l'année, ce qui corrobore les résultats de cette méta-analyse. Ces résultats ne s'observent cependant que lorsque la biomasse d'herbe, au travers de l'âge de repousses, affecte peu ou pas la composition chimique de l'herbe, comme c'est le cas dans cette méta-analyse et dans les travaux de Wims *et al* (2014). En cas de biomasse d'herbe très élevée (pâturage mal géré), ou pendant la phase reproductive (épiaison), la réduction bien connue de la valeur nutritive de l'herbe avec l'âge de repousse pourrait cependant limiter l'ingestion d'herbe et la production laitière, notamment *via* une réduction de son ingestibilité (INRA 2007). En pratique, pour un type de prairie donnée et dans la gamme classique de variation de biomasse ou de hauteur d'herbe (8-16 cm, mesure à l'herbomètre à plateau) au pâturage, cet effet de la qualité d'herbe sur l'ingestion reste négligeable au regard des effets de la biomasse ou de la quantité d'herbe offerte décrits ici.

Les équations rapportées dans cette méta-analyse permettent de mettre en cohérence les effets respectifs attendus de la biomasse et de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion d'herbe et la production laitière, en fonction de la hauteur de coupe de l'herbe. Tout modèle prévisionnel basé sur une coupe d'herbe réalisée au ras du sol devrait considérer un effet positif de la biomasse d'herbe sur l'ingestion (comme dans le modèle Diet-Check : Heard *et al* 2004), tandis qu'un modèle prévisionnel basé sur une coupe d'herbe à 5 cm devrait toujours considérer un effet négatif de la biomasse d'herbe sur l'ingestion (Delagarde et O'Donovan 2005). L'hypothèse retenue dans le module pâturage du logiciel INRAtion (Delagarde 2009, Delagarde *et al* 2011a), qui consiste à recalculer la biomasse et la quantité d'herbe offerte au-dessus de 2-3 cm pour définir la

disponibilité en herbe sans effet de la biomasse d'herbe, est aussi cohérent avec les résultats de cette méta-analyse.

Cette méta-analyse n'a traité que des vaches laitières pâturant des prairies de zones tempérées, situation pour laquelle le nombre de données disponibles est conséquent. La validité de ces résultats pour d'autres types de ruminants (jeunes bovins, vaches allaitantes, ovins, caprins) voire d'herbivores (chevaux) ou d'autres types de couverts végétaux (prairies de zones tropicales) n'est à ce jour pas connue. Des essais avec des génisses pâturant des prairies de *Dichantium* spp. en milieu tropical semblent montrer des lois assez semblables (Boval *et al* 2007). Il est cependant très probable que le seuil identifié de 2 à 3 cm ne sera pas pertinent pour décrire la disponibilité en herbe pour des animaux capables de pâturer plus (ou moins) ras que les vaches laitières. De même, les caractéristiques morphologiques des plantes jouent très probablement un rôle majeur sur la hauteur à laquelle il faudrait définir la disponibilité en herbe, en raison par exemple de tiges ou de gaines dures et de diamètre trop élevé pour être sectionnées par les animaux au pâturage. Au Brésil, avec certaines espèces de graminées tropicales, il est ainsi recommandé de pâturer avec des hauteurs de l'herbe à l'entrée des animaux dans la parcelle de 1 m et de viser des hauteurs de l'herbe à la sortie de la parcelle de 50 cm (de Almeida, Setelich et Ribeiro Filho, communication personnelle).

Conclusion

Chez la vache laitière conduite en pâturage tournant, les relations entre quantité d'herbe offerte et ingestion d'herbe, production laitière ou comportement alimentaire, ainsi que les valeurs des seuils limitant l'ingestion ou les performances, sont très dépendantes de la hauteur de coupe de l'herbe utilisée pour estimer la biomasse d'herbe. Ces relations sont de type exponentiel décroissant, quelle que soit la hauteur de coupe de l'herbe. Les fortes réductions d'ingestion d'herbe ou de production laitière observées en pâturage sévère (faible quantité d'herbe offerte) sont liées à la réduction drastique de la vitesse d'ingestion d'herbe en fin de séjour dans la parcelle, malgré des conditions de pâturage en début de séjour dans la parcelle identiques à celles d'un pâturage plus libéral (quantité d'herbe offerte élevée). Cela est lié aux difficultés de préhension de l'herbe en fin de séjour

dans les strates basses du couvert végétal. Chez la vache laitière conduite en pâturage tournant, la durée d'ingestion n'est pas une variable comportementale d'ajustement aux variations de la quantité d'herbe offerte.

La méta-analyse concernant l'effet de la biomasse d'herbe permet de mieux comprendre et interpréter les résultats apparemment contradictoires de la littérature, en montrant le rôle prépondérant de la hauteur de coupe de l'herbe sur les relations entre la biomasse d'herbe et l'ingestion, la production laitière ou le comportement alimentaire. Elle démontre aussi que la quantité d'herbe offerte calculée au-dessus de 2-3 cm du sol est un estimateur robuste de la quantité d'herbe réellement disponible pour la vache laitière en pâturage tournant, car non sensible aux variations de biomasse d'herbe dans une très large gamme. Selon la biomasse d'herbe, la quantité d'herbe offerte mesurée au ras du sol ou au-dessus de 5 cm sur-estime ou sous-estime la quantité d'herbe réellement accessible pour les vaches.

Ces deux méta-analyses permettent de mieux interpréter les grandes variations des réponses des vaches laitières à la quantité d'herbe offerte ou à la biomasse d'herbe en pâturage tournant observées dans la littérature. Elles montrent l'importance de la méthodologie utilisée (hauteur de coupe de l'herbe pour estimer la biomasse) sur les lois de réponses animales, et doivent permettre de mieux conceptualiser et prévoir l'effet des facteurs de régulation de l'ingestion sur les performances des vaches laitières en pâturage tournant. Une harmonisation des méthodes de mesure permettrait aussi d'éviter les problèmes d'interprétation des données. Il pourrait être pertinent d'utiliser systématiquement une hauteur de coupe de 3 cm pour toute mesure de biomasse dans des prairies de zones tempérées, même si les vaches ne pâturent pas jusqu'à cette hauteur.

Remerciements

Nous remercions vivement la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT, Santiago, Chili) et l'Ambassade de France (Santiago, Chili) pour le financement de la thèse de Lucio Pérez-Prieto en France. Nous remercions également Luc Delaby (UMR1348 INRA-Agrocampus Ouest PEGASE, Saint-Gilles, France) pour ses conseils dans l'analyse statistique des données.

Références

- Bargo F., Muller L.D., Delahoy J.E., Cassidy T.W., 2002. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *J. Dairy Sci.*, 85, 1777-1792.
- Bargo F., Muller L.D., Kolver E.S., Delahoy J.E., 2003. Production and digestion of supplemented dairy cows on pasture. *J. Dairy Sci.*, 86, 1-42.
- Barrett P.D., Laidlaw A.S., Mayne C.S., Christie H., 2001. Pattern of herbage intake rate and bite dimensions of rotationally grazed dairy cows as sward height declines. *Grass Forage Sci.*, 56, 362-373.
- Baudracco J., Lopez-Villalobos N., Holmes C.W., McDonald K.A., 2010. Effects of stocking rate, supplementation, genotype and their interactions on grazing dairy systems: a review. *N. Z. J. Agric. Res.*, 53, 109-133.
- Boval M., Archimède H., Cruz P., Duru M., 2007. Intake and digestibility in heifers grazing a *Dichanthium* spp. dominated pasture, at 14 and 28 days of regrowth. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 134, 18-31.
- Coulon J.B., Rémond B., 1991. Variations in milk output and milk protein content in response to the level of energy supply to the dairy cow: a review. *Livest. Prod. Sci.*, 29, 31-47.
- Dalley D.E., Roche J.R., Grainger C., Moate P.J., 1999. Dry matter intake, nutrient selection and milk production of dairy cows grazing rainfed perennial pastures at different herbage allowances in spring. *Aust. J. Exp. Agric.*, 39, 923-931.
- Delaby L., Peyraud J.L., Delagarde R., 2003. Faut-il compléter les vaches laitières au pâturage ? *INRA Prod. Anim.*, 16, 183-195.
- Delagarde R., 2009. Outils et indicateurs pour calculer et concilier ingestion des vaches laitières et valorisation de l'herbe au pâturage. *Fourrages*, 198, 175-190.
- Delagarde R., O'Donovan M., 2005. Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage. *INRA Prod. Anim.*, 18, 241-253.
- Delagarde R., Peyraud J.L., 2013. Gérer les variations des apports alimentaires des vaches laitières au pâturage. *INRA Prod. Anim.*, 26, 263-276.
- Delagarde R., Peyraud J.L., Delaby L., Faverdin P., 2000. Vertical distribution of biomass, chemical composition and pepsin-cellulase digestibility in a perennial ryegrass sward: interaction with month of year, regrowth age and time of day. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 84, 49-68.
- Delagarde R., Prache S., D'Hour P., Petit M., 2001a. Ingestion de l'herbe par les ruminants au pâturage. *Fourrages*, 166, 189-212.
- Delagarde R., Peyraud J.L., Parga J., Ribeiro Filho H.M.N., 2001b. Caractéristiques de la prairie avant et après un pâturage: quels indicateurs de l'ingestion chez la vache laitière ? *Renc. Rech. Rumin.*, 8, 209-212.
- Delagarde R., Peyraud J.L., Wade M.H., 2010. Daily pattern of feeding activities of dairy cows in a 8-d rotational grazing system. In: *Grassland Science in Europe*, 15, 931-933.
- Delagarde R., Faverdin P., Baratte C., Peyraud J.L., 2011a. GrazeIn: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 2. Prediction of intake under rotational and continuously stocked grazing management. *Grass Forage Sci.*, 66, 45-60.
- Delagarde R., Valk H., Mayne C.S., Rook A.J., González-Rodríguez A., Baratte C., Faverdin P., Peyraud J.L., 2011b. GrazeIn: a model of herbage intake and milk production for grazing dairy cows. 3. Simulations and external validation of the model. *Grass Forage Sci.*, 66, 61-77.
- Dillon P., Crosse S., Stakelum G., Flynn F., 1995. The effect of calving date and stocking rate on the performance of spring-calving dairy cows. *Grass Forage Sci.*, 50, 286-299.
- Dillon P., Roche J.R., Shalloo L., Horan B., 2005. Optimising financial return from grazing in temperate pastures. In: *Utilisation of grazed grass in temperate animal systems*. Murphy J.J. (Ed). 20th IGC, Cork, Ireland, 131-147.
- Freer M., Moore A.D., Donnelly J.R., 1997. GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. II. The animal biology model for feed intake, production and reproduction and the GrazFeed DSS. *Agric. Syst.*, 54, 77-126.
- Gibb M.J., Huckle C.A., Nuthall R., Rook A.J., 1997. Effect of sward surface height on intake and grazing behaviour by lactating Holstein Friesian cows. *Grass Forage Sci.*, 52, 309-321.
- Heard J.W., Cohen D.C., Doyle P.T., Wales W.J., Stockdale C.R., 2004. Diet-Check - a tactical decision support tool for feeding decisions with grazing dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 112, 177-194.
- Herrero M., Fawcett R.H., Silveira V., Busqué J., Bernués A., Dent J.B., 2000. Modelling the growth and utilisation of kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) under grazing. 1. Model definition and parameterisation. *Agric. Syst.*, 65, 73-97.
- Hoden A., Muller A., Journet M., Faverdin P., 1986. Pâturage pour vaches laitières. I. Comparaison des systèmes de pâturage "rationné" et "tournant simplifié" en zone normande. *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 64, 25-35.
- Hodgson J., 1986. Grazing behaviour and herbage intake. In: *Grazing*. Frame J. (Ed). Occasional Symposium n° 19, British Grassland Society, UK, 51-64.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins : Besoins des animaux - Valeurs des aliments. Editions QUAE, Versailles, France.
- Jarrige R., Grenet E., Demarquilly C., Besle J.M., 1995. Les constituants de l'appareil végétatif des plantes fourragères. In : *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion*. Jarrige R., Ruckebusch Y., Demarquilly C., Farce M.H., Journet M. (Eds). INRA Editions, Versailles, France, 25-81.
- Jouven M., Agabriel J., Baumont R., 2008. A model predicting the seasonal dynamics of intake and production for suckler cows and their calves fed indoors or at pasture. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 256-279.
- Kennedy E., O'Donovan M., Murphy J.P., Delaby L., O'Mara F.P., 2007. Effect of spring grazing date and stocking rate on sward characteristics and dairy cow production during mid-lactation. *J. Dairy Sci.*, 90, 2035-2046.
- Leaver J.D., 1985. Milk production from grazed temperate grassland. *J. Dairy Res.*, 52, 313-344.
- Maher J., Stakelum G., Rath M., 2003. Effect of daily herbage allowance on the performance of spring-calving dairy cows. *Ir. J. Agric. Food Res.*, 42, 229-241.
- Mayne C.S., 1991. Effects of supplementation on the performance of both growing and lactating cattle at pasture. In: *Occasional Symposium n° 25, British Grassland Society, UK*, 55-71.
- McCarthy S., Horan B., Rath M., Linnane M., O'Connor P., Dillon P., 2007. The influence of strain of Holstein-Friesian dairy cow and pasture-based feeding system on grazing behaviour, intake and milk production. *Grass Forage Sci.*, 62, 13-26.
- McCarthy B., Delaby L., Pierce K.M., Journet F., Horan B., 2011. Meta-analysis of the impact of stocking rate on the productivity of pasture-based milk production systems. *Animal*, 5, 784-794.
- McDonald K.A., Verkerk G.A., Thorrold B.S., Pryce J.E., Penno J.W., McNaughton L.R., Burton L.J., Lancaster J.A.S., Williamson J.H., Holmes C. W., 2008. A comparison of three strains of Holstein-Friesian grazed on pasture and managed under different feed allowances. *J. Dairy Sci.*, 91, 1693-1707.
- McEvoy M., Delaby L., Murphy J.P., Boland T.M., O'Donovan M., 2010. Effect of herbage mass and allowance on sward characteristics, milk production, intake and rumen volatile fatty acid concentration. *Grass Forage Sci.*, 65, 335-347.
- McFeely P.C., Browne D., Carty O., 1975. Effect of grazing interval and stocking rate on milk production and pasture yield. *Ir. J. Agric. Res.*, 14, 309-319.
- O'Neill B.F., Lewis E., O'Donovan M., Shalloo L., Mulligan F.J., Boland T.M., Delagarde R., 2012. Evaluation of the Graze In model of grass dry-matter intake and milk production prediction for dairy cows in temperate grass-based production systems. 1. Sward characteristics and grazing management factors. *Grass Forage Sci.*, 68, 504-523.
- Penning P.D., Parsons A.J., Orr R.J., Treacher T.T., 1991. Intake and behaviour responses by sheep to changes in sward characteristics under continuous stocking. *Grass Forage Sci.*, 46, 15-28.
- Penning P.D., Parsons A.J., Orr R.J., Hooper G.E., 1994. Intake and behaviour responses by sheep to changes in sward characteristics under rotational grazing. *Grass Forage Sci.*, 49, 476-486.
- Pérez-Prieto L.A., Delagarde R., 2012. Meta-analysis of the effect of pregrazing pasture mass on pasture intake, milk production, and grazing behavior of dairy cows strip-grazing temperate grasslands. *J. Dairy Sci.*, 95, 5317-5330.
- Pérez-Prieto L.A., Delagarde R., 2013. Meta-analysis of the effect of pasture allowance on pasture intake, milk production, and grazing behavior of dairy cows grazing temperate grasslands. *J. Dairy Sci.*, 96, 6671-6689.

- Pérez-Prieto L.A., Peyraud J.L., Delagarde R., 2011. Pasture intake, milk production and grazing behaviour of dairy cows grazing low-mass pastures at three daily allowances in winter. *Livest. Sci.*, 137, 151-160.
- Pérez-Prieto L.A., Peyraud J.L., Delagarde R., 2013. Does pre-grazing herbage mass really affect herbage intake and milk production of strip-grazing dairy cows? *Grass Forage Sci.*, 68, 93-109.
- Pérez-Ramírez E., Peyraud J.L., Delagarde R., 2009. Restricting daily time at pasture at low and high pasture allowance: effects on pasture intake and behavioral adaptation of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 92, 3331-3340.
- Poppi D.P., Hughes T.P., L'Huillier, P.J., 1987. Intake of pasture by grazing ruminants. In: *Feeding livestock on pasture*. Nicol A.M. (Ed). Occasional Publication n°10, N. Z. Soc. Anim. Prod., 55-63.
- Prache S., Peyraud J.L., 1997. Préhensibilité de l'herbe pâturée chez les bovins et les ovins. *INRA Prod. Anim.*, 10, 377-390.
- Ribeiro Filho H.M.N., Delagarde R., Peyraud J.L., 2005. Herbage intake and milk yield of dairy cows grazing perennial ryegrass swards or white clover/perennial ryegrass swards at low- and medium-herbage allowances. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 119, 13-27.
- Rook A.J., Huckle C.A., Wilkins R.J., 1994. The effects of sward height and concentrate supplementation on the performance of spring calving dairy cows grazing perennial ryegrass-white clover swards. *Anim. Prod.*, 58, 167-172.
- SAS Institute., 2008. *SAS User's Guide: Statistics*. SAS Institute Inc., Cary, NC, US.
- Sauvant D., Nozière P., 2013. Rénovation des unités alimentaires des ruminants: les principales relations utilisées pour le calcul des apports alimentaires. *Renc. Rech. Rumin.*, 20, 33-40.
- Sibbald A.R., Maxwell T.J., Eadie J., 1979. A conceptual approach to the modelling of herbage intake by hill sheep. *Agric. Syst.*, 4, 119-134.
- Stakelum G., 1986. Herbage intake of grazing dairy cows. I. Effect of autumn supplementation with concentrates and herbage allowance on herbage intake. *Ir. J. Agric. Res.*, 25, 31-40.
- Stockdale C.R., 1993. The productivity of lactating dairy cows fed irrigated persian clover (*Trifolium respinatum*). *Aust. J. Agric. Res.*, 44, 1591-1608.
- Stockdale C.R., 2000. Levels of pasture substitution when concentrates are fed to grazing dairy cows in northern Victoria. *Aust. J. Exp. Agric.*, 40, 913-921.
- Stockdale C.R., Dellow D.W., 1995. The productivity of lactating dairy cows grazing white clover and supplemented with maize silage. *Aust. J. Agric. Res.*, 46, 1205-1217.
- Suksombat W., Holmes C.W., Wilson G.F., 1994. Effects of herbage allowance and a high protein supplement on performance of dairy cows grazing on autumn-winter pastures. *Proc. N. Z. Soc. Anim. Prod.*, 54, 83-86.
- Wade M.H., 1991. Factors affecting the availability of vegetative *Lolium perenne* to grazing dairy cows with special reference to sward characteristics, stocking rate and grazing method. Thèse de doctorat. Université Rennes 1, Rennes, France.
- Wales W.J., Doyle P.T., Stockdale C.R., Dellow D.W., 1999. Effects of variations in herbage mass, allowance, and level of supplement on nutrient intake and milk production of dairy cows in spring and summer. *Aust. J. Exp. Agric.*, 39, 119-130.
- Wims C.M., Delaby L., Boland T.M., O'Donovan M., 2014. Effect of pre-grazing herbage mass on dairy cow performance, grass dry matter production and output from perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) pastures. *Animal*, 8, 141-151.

Résumé

En pâturage tournant, la gestion du pâturage par les éleveurs détermine en partie les performances des vaches laitières et la valorisation de l'herbe. Deux méta-analyses de la littérature ont été réalisées afin de définir les effets respectifs de la quantité d'herbe offerte (exprimée en kg MS/vache/jour, étudiée à même biomasse d'herbe) et de la biomasse d'herbe (exprimée en kg MS/ha, étudiée à même quantité d'herbe offerte) sur l'ingestion, la production laitière et le comportement alimentaire des vaches. La hauteur à laquelle l'herbe est coupée (0, 2-3 ou 5 cm au-dessus du sol) pour estimer la biomasse d'herbe a été considérée comme un facteur explicatif clé de la variabilité des réponses des vaches. Les relations curvilinéaires décrivant les effets de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion et la production laitière sont conceptuellement identiques et indépendantes de la méthodologie de prélèvement de l'herbe (hauteur de coupe), même si les paramètres des équations restent spécifiques à chaque méthodologie. Les variations d'ingestion et de production laitière sont reliées à des variations importantes de la vitesse d'ingestion, mais peu à celles de la durée d'ingestion. L'effet de la biomasse d'herbe sur l'ingestion, la production laitière et la vitesse d'ingestion est inféodé à la méthodologie de prélèvement de l'herbe (hauteur de coupe) : il peut être positif, nul ou négatif selon la hauteur de coupe de l'herbe choisie (0, 3 ou 5 cm). La quantité d'herbe offerte au-dessus de 3 cm est le meilleur prédicteur des performances des vaches, car elle ne dépend pas de la biomasse d'herbe. Ces résultats permettent de mieux comprendre et prévoir les effets des pratiques sur les performances des vaches laitières en pâturage tournant.

Abstract

Meta-analyses of the effects of pre-grazing herbage mass and herbage allowance on pasture intake, milk production and composition, and grazing behaviour of rotationally grazing dairy cows

Grazing management is known to affect dairy cow performance. Two meta-analyses of the literature were performed for reviewing the effects of either herbage allowance (kg DM/cow/day, studied at a given herbage mass) or pre-grazing herbage mass (kg DM/ha, studied at a given herbage allowance) on pasture intake, milk production and grazing behaviour of dairy cows under rotational grazing management. The height at which pasture is cut (0 vs 3 cm vs 5 cm above ground level) to estimate pre-grazing herbage mass was considered as a primary factor explaining the variability of cow responses. The curvilinear relationships describing the effects of herbage allowance on herbage intake and milk production were conceptually similar whatever the methodology of herbage sampling (cutting height), even if equations parameters are specific to each cutting height. Herbage intake and milk production variations were related to herbage intake rate rather than to grazing time variations. The effect of pre-grazing herbage mass on herbage intake, herbage intake rate and milk production depends on the methodology of herbage sampling: it is positive, null or negative depending on whether the cutting height is at ground level, above 3 cm or above 5 cm from ground level, respectively. Herbage allowance measured above 3 cm is the best predictor of cow performance because it is independent of pre-grazing herbage mass. These results allow better understanding and predicting of the effects of grazing management on performance of rotationally grazing dairy cows.

DELAGARDE R., PÉREZ-PRIETO L.A., 2016. Effets de la biomasse et de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion, les performances laitières et le comportement alimentaire des vaches laitières conduites en pâturage tournant : étude par méta-analyse. *INRA Prod. Anim.*, 29, 87-102.