



HAL
open science

Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage

Remy Delagarde, Mike O'Donovan

► **To cite this version:**

Remy Delagarde, Mike O'Donovan. Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage. *Productions Animales*, 2005, 18 (4), pp.241-253. hal-02682485

HAL Id: hal-02682485

<https://hal.inrae.fr/hal-02682485>

Submitted on 1 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les modèles de prévision de l'ingestion journalière d'herbe et de la production laitière des vaches au pâturage*

R. DELAGARDE¹, M. O'DONOVAN²

¹INRA, UMR Production du Lait, F-35590 Saint-Gilles

² TEAGASC, Moorepark Research Center, Fermoy, Co. Cork, Ireland

Courriel : Remy.Delagarde@rennes.inra.fr

La gestion des systèmes pâturés doit permettre une bonne adéquation à court, moyen et long terme de l'offre fourragère et de la demande alimentaire du troupeau, tout en assurant une bonne valorisation de cette ressource fourragère. Les pratiques de pâturage sont cependant extrêmement variables, et la quantité d'herbe ingérée par les animaux très sensible aux conditions de pâturage. Le développement de modèles de prévision de l'ingestion, et leur utilisation dans des outils informatiques, permet aujourd'hui de mieux prendre en compte les conséquences des pratiques sur l'alimentation et les performances des vaches laitières dans le raisonnement global de la gestion du pâturage.

Dans de nombreux pays, l'herbe pâturée représente souvent la principale ressource fourragère dans les systèmes intensifs et extensifs de production des ruminants domestiques. La gestion du pâturage doit concilier un double objectif : nourrir correctement le troupeau, et gérer la qualité et la quantité du stock fourrager disponible à l'échelle de la saison de pâturage. Ceci implique de la part de l'éleveur des prises de décisions à court terme (changement de parcelle), à moyen terme (fertilisation, fauche, arrêt ou reprise de la complémentation) et à long terme (système de pâturage, surface totale à pâturer). Cependant, l'alimentation des ruminants au pâturage est souvent difficile à raisonner de par l'impossibilité pratique d'estimer correctement les apports nutritifs permis par l'herbe pâturée. Cette estimation des apports peut être obtenue par l'utilisation de systèmes de prévision de l'ingestion d'herbe. De tels systèmes de prévision de l'ingestion ont été développés depuis longtemps dans le cas des ruminants nourris avec des rations conservées (INRA 1988, Ingvarlsen 1994, Forbes 1995, Faverdin *et al* 1995). En revanche,

peu de ces systèmes ou de ces modèles ont été adaptés au cas du pâturage, en prenant en compte par exemple la disponibilité en herbe (Pittroff et Kothmann 2001). Récemment, plusieurs modèles de prévision de l'ingestion des ruminants au pâturage ont été développés, modèles qui sont pour la plupart déjà intégrés dans des outils informatiques d'aide à la décision pour l'alimentation ou la gestion du pâturage (Freer *et al* 1997, Herrero *et al* 2000, Delaby *et al* 2001b, Cros *et al* 2003, Heard *et al* 2004, Delagarde *et al* 2004).

L'objectif de cet article est de décrire les principales méthodes et modèles existants permettant de prévoir la quantité d'herbe ingérée et la production laitière des vaches au pâturage. La capacité de ces modèles à prévoir l'ingestion dans des situations variables de conditions de pâturage et de complémentation est testée au moyen de simulations. La précision des prévisions des différents modèles est également étudiée à partir de bases de données expérimentales indépendantes, dans lesquelles l'ingestion d'herbe des vaches a été mesurée.

1 / Comment prévoir l'ingestion d'herbe au pâturage ?

Les facteurs affectant l'ingestion d'herbe pâturée sont nombreux et peuvent être regroupés en cinq catégories : ceux liés à l'animal, à la prairie, à la gestion du pâturage, aux compléments distribués et au climat. Les facteurs liés à l'animal et aux aliments (fourrages et concentrés) ont été revus en détail par Faverdin *et al* (1995), ceux plus spécifiques du pâturage par Poppi *et al* (1987), Dove (1996), McGilloy et Mayne (1996), Cherney et Mertens (1998), Peyraud et González-Rodríguez (2000) et Delagarde *et al* (2001a). L'ensemble de ces facteurs régule l'ingestion quotidienne de Matière Sèche (MS) par le biais de contraintes métaboliques, digestives et/ou comportementales. Le contrôle à court terme de la prise alimentaire fait appel à la motivation de l'animal à ingérer et à la préhensibilité de l'aliment, qui déterminent la vitesse d'ingestion. La régulation à moyen terme et à long terme de l'ingestion inclut les

* Ce texte est une adaptation en français d'un rapport de synthèse (Delagarde et O'Donovan 2005), présenté au Symposium Satellite du XX^e Congrès International des Herbages qui s'est tenu à Cork (Irlande) du 03 au 06 juillet 2005.

adaptations digestives et métaboliques de l'animal, de même que la gestion des réserves corporelles et la fonction de reproduction (incluant la gestation et la lactation), spécialement pour les ruminants laitiers (Faverdin *et al* 1995).

La structure générale et la complexité des modèles existants est donc extrêmement variable selon le pas de temps choisi pour la prévision de l'ingestion (de la seconde à la semaine), selon la fonction biologique considérée comme déterminante dans la régulation de l'ingestion (métabolisme, digestion, comportement), mais aussi selon l'existence préalable éventuelle de systèmes de prévision pour l'alimentation hivernale adoptés dans certains pays. L'approche mathématique, la complexité des algorithmes, et la taille des bases de données utilisées pour le paramétrage des équations peuvent également affecter de façon importante la complexité et les potentialités d'un modèle. D'une manière très simpliste, les modèles de prévision de l'ingestion

peuvent être considérés soit comme empiriques, soit comme mécanistes.

1.1 / Modèles empiriques

Les modèles empiriques permettent de prévoir l'ingestion à partir de plusieurs variables connues pour affecter l'ingestion, généralement au moyen de régressions multiples établies par compilation de données expérimentales. Une telle approche a été développée depuis longtemps pour les vaches laitières au pâturage, mais en considérant souvent un nombre limité de facteurs de variation de l'ingestion. Les régressions multiples les plus complètes considèrent les caractéristiques des vaches (souvent production laitière et poids vif), la valeur nutritive de l'herbe (digestibilité), les aliments complémentaires (concentré ingéré) et la gestion du pâturage (Stockdale 1985, Caird et Holmes 1986, Peyraud *et al* 1996, Stockdale 2000, Maher *et al* 2003, Stakelum et Dillon 2004). Pour la gestion du pâturage, sont pris en compte

des paramètres descriptifs de l'état du couvert végétal comme la hauteur d'herbe ou la biomasse (kg MS/ha), ainsi que des paramètres quantitatifs de l'offre alimentaire comme la surface offerte ou la quantité d'herbe offerte par vache et par jour, produit de la biomasse par la surface offerte.

Etonnamment, de tels modèles empiriques ont été rarement développés pour la prévision des performances laitières des vaches au pâturage (Delaby *et al* 2001a, Maher *et al* 2003), alors que les données expérimentales disponibles sur le lait produit sont beaucoup plus nombreuses et plus simples à obtenir que celles sur l'ingestion d'herbe. Une sélection des principales régressions multiples permettant de prévoir l'ingestion d'herbe et la production laitière des vaches au pâturage est présentée dans le tableau 1.

Le principal avantage de ces modèles empiriques est que l'ingestion et les performances peuvent être estimées

Tableau 1. Les principales régressions multiples permettant de prévoir l'ingestion d'herbe et la production laitière des vaches au pâturage.

Référence	Meijs et Hoekstra 1984	Stockdale 1985	Caird et Holmes 1986		Peyraud <i>et al</i> 1996		Stockdale 2000	Maher <i>et al</i> 2003	O'Donovan <i>et al</i> np	Delaby <i>et al</i> 2001a	Delaby <i>et al</i> 2003	Maher <i>et al</i> 2003	O'Donovan <i>et al</i> np
	To	To	To	Co	To	To	To	To	To	To	To	To	To
Variable étudiée	MOIH	MSIH	MOIT	MOIT	MOIH	MOIH	MSIH	MOIH	MSIH	PL	PL	PL	PL
n	117	223	165	144	95	95	-	192	2839	197	550	192	2839
R ²	0,90	0,79	0,67	0,53	0,72	0,60	0,81	0,78	0,52	0,89	0,91	0,74	0,84
Etr	0,78	1,30	1,91	2,52	1,52	1,78	0,26	1,12	2,03	1,67	1,47	1,68	2,71
Origine	-0,61	-7,817	0,32	8,23	-40,3	-2,5	2,34	3,85	-12,5	-1,9	-4,2	-0,835	-9,1
Animal													
PV		1,10	1,00	0,40	0,95	0,74		0,50	1,19				
PLpre					0,26	0,26		0,14		0,69	0,63	0,66	
PL			0,18	0,21									
PLpic									0,23				0,59
SL				0,069					0,035				-0,38
Prairie et pâturage													
Hauteur calcul (cm)	4	0	0	0	0	0	0	4	4	5	5	4	4
DMO (0-1)		6			25				10				24
SO ⁻¹					-114								
BIOM		1,1	-1,0		9,4				2,6				-0,9
BIOM ²					-0,82				-0,0005				
QHO	0,98	0,27	0,54			0,33	0,28	0,23	0,17	0,2	0,68	0,30	0,14
QHO ²	-0,0140	-0,0018	-0,0060			-0,0033	-0,0073		-0,0017		-0,0133		-0,0013
QHO ⁻¹													
HHE				-0,29				0,42					
Complémentation													
C	1,48		1,64	-0,12					-0,48	1,04	0,95		0,76
C ²									-0,037				
C*QHO	-0,039		-0,048										
C*HHE				0,13									

To : Tournant ; Co : Continu ; MOIT et MOIH (MSIH) : MO ingérée totale et MO (MS) ingérée d'herbe (kg/vache/jour) ; PV poids vif (100 kg) ; PLpre production laitière au début de l'expérience (kg/vache/jour) ; PL production laitière observée pendant l'essai (kg/vache/jour) ; PLpic production laitière maximale au pic de lactation (kg/vache/jour) ; SL stade de lactation (en semaines après vêlage) ; Hauteur calcul : hauteur à laquelle la biomasse et la quantité offerte sont calculées (cm) ; DMO digestibilité de la MO de l'herbe offerte ; SO surface offerte (m²/vache/jour) ; BIOM biomasse (t MS/ha) ; QHO quantité d'herbe offerte (kg MS/vache/jour) ; HHE hauteur herbomètre en entrée de parcelle (cm) ; C concentré ingéré (kg MS/vache/jour). Dans le tableau, à partir de la ligne 'Origine', les valeurs indiquées sont les coefficients de régression des différentes variables pour chacune des équations de prévision.

rapidement sur un tableur à partir d'une simple équation. Cependant, ces modèles sont limités par la taille et la gamme de variation de la base de données utilisée, par le nombre de facteurs explicatifs enregistrés pendant les essais, et par les facteurs effectivement pris en compte dans la régression. De ce fait, ils sont peu évolutifs. L'effet des facteurs est souvent considéré comme linéaire, et de nombreuses interactions entre facteurs ne sont pas prises en compte. La précision des prévisions dans les situations extrêmes est alors limitée par la trop simple approche mathématique de ces modèles. Les relations linéaires dans les systèmes biologiques sont rarement réalistes dans une large gamme de variation des variables étudiées.

1.2 / Modèles mécanistes

Les modèles mécanistes permettent de prévoir l'ingestion à partir d'une série d'équations imbriquées qui décrivent les principaux mécanismes impliqués dans la régulation de l'ingestion. Ces équations peuvent provenir de différentes sources de connaissances, parfois reposer uniquement sur des concepts théoriques. Comme les mécanismes régulant l'ingestion sont nombreux et qu'ils peuvent être considérés à différentes échelles de temps, la structure de ces modèles est extrêmement variable. Certains sont basés sur les processus de défoliation à court terme et sur un calcul dynamique du poids des prises alimentaires (bouchées), du temps passé par bouchée et de la durée journalière de pâturage, ceci en fonction de l'évolution de la structure du couvert végétal (Demment et Greenwood 1988, Woodward 1997, Smallegange *et al* 2002, Baumont *et al* 2004). D'autres modèles considèrent que la prairie est constituée de différents pools de qualité homogène, et que les animaux pâturent successivement ces différents pools au cours du processus de défoliation, depuis le pool de meilleure qualité jusqu'à celui de qualité la plus faible (Sibbald *et al* 1979, Freer *et al* 1997). Enfin, de nombreux modèles considèrent une réponse globale de l'animal aux variations de structure du couvert végétal ou de la disponibilité en herbe à l'échelle de la journée (Johnson et Parsons 1985, Herrero *et al* 2000, Delaby *et al* 2001b, Cros *et al* 2003, Heard *et al* 2004, Delagarde *et al* 2004). Dans nombre de ces modèles, l'ingestion au pâturage est calculée relativement à l'ingestion volontaire à l'auge. Celle-ci est alors déterminée dans une première étape de calcul, souvent à partir de modèles pré-

existants développés pour l'alimentation à base de fourrages conservés.

Les avantages d'une approche mécaniste sont nombreux. Ces modèles sont potentiellement génériques, c'est-à-dire adaptables à de nombreux types d'animaux, de prairies et de pratiques de gestion du pâturage. L'approche mathématique peut être plus complexe et intégrer des relations logarithmiques ou exponentielles, avec des limites asymptotiques des prévisions pour des situations extrêmes. Les variations de l'ingestion sous l'effet d'un facteur donné peuvent aussi être considérées en relatif à une situation non limitante pour ce facteur, ce qui permet de simuler assez simplement des interactions (Freer *et al* 1997, Delagarde *et al* 2004). Finalement, le choix des algorithmes de calcul ou de la succession des équations, de même que l'utilisation possible de calculs itératifs, peut permettre d'accroître sensiblement la robustesse du modèle, la bonne simulation des interactions et donc la précision des prévisions.

La plupart des modèles appelés mécanistes devraient cependant être considérés comme à la fois empiriques et mécanistes. De nombreuses équations, paramètres ou hypothèses dans les modèles mécanistes sont basés sur de l'expertise ou des données partielles de la littérature, et peuvent à ce titre être considérées comme empiriques. De plus, un modèle réellement mécaniste devrait impliquer que toutes les relations composant le modèle sont des relations de cause à effet, ce qui est peu probable et dans tous les cas difficile à prouver. A titre d'exemple, la quantité de lait produite peut être interprétée comme résultant de la quantité de nutriments ingérés et devrait être dans ce cas considérée comme une sortie d'un modèle de prévision de l'ingestion. Mais elle résulte également du potentiel génétique de l'animal, qui stimule sa motivation à ingérer et sa capacité d'ingestion, et peut alors être considérée comme une entrée d'un modèle de prévision de l'ingestion. De même, la durée journalière de pâturage est parfois décrite comme un des déterminants de l'ingestion journalière, et utilisée dans certains modèles comme variable d'entrée (ou variable intermédiaire calculée) pour prévoir l'ingestion. Mais la durée de pâturage peut aussi résulter de l'équilibre entre la motivation de l'animal à ingérer (capacité d'ingestion) et l'état de la structure du couvert végétal déterminant en partie la vitesse d'ingestion possible. Dans ce cas, la durée

d'ingestion journalière est la conséquence et non la cause de la quantité d'herbe ingérée et ne doit pas être utilisée comme variable explicative permettant de prévoir les variations d'ingestion. Décrire *comment* les vaches mangent et digèrent ne permet pas nécessairement de prévoir *combien* ces vaches vont effectivement manger (Kyriazakis 2003).

2 / Quelques modèles de prévision de l'ingestion des vaches laitières au pâturage

Les principales caractéristiques, les variables d'entrée et les variables de sortie de cinq modèles de prévision de l'ingestion des vaches laitières au pâturage sont présentées dans le tableau 2. Trois de ces modèles sont simples par rapport aux variables d'entrée requises et aux algorithmes de calcul (modèles d'ingestion de Sepatou, de Pâtur'IN et de Diet-Check). Deux de ces modèles sont plus complexes, avec davantage de variables d'entrée nécessaires, mais également une plus grande gamme possible d'utilisation du modèle (GrazFeed, GrazeIn). Ces cinq modèles estiment l'ingestion à l'échelle de la journée ou de la parcelle pâturée et sont inclus dans des outils informatiques d'aide à la gestion ou à l'alimentation des ruminants au pâturage.

2.1 / Sepatou

Sepatou est un simulateur de conduites du pâturage développé en France, adapté au pâturage tournant des vaches laitières (Cros *et al* 2003). Le sous modèle animal de prévision de l'ingestion est décrit complètement par Cros *et al* (2003). Il reprend dans une version simplifiée les principes du système des Unités d'Encombrement (UE) de l'INRA (1988), considérant d'une part la capacité d'ingestion des vaches, dépendant de la production au pic de lactation et du stade de lactation (après le pic), et d'autre part l'ingestibilité de l'herbe, dépendant de sa digestibilité. La valeur d'encombrement des concentrés et celle des fourrages complémentaires sont différentes mais fixes. Ce modèle de l'ingestion volontaire est ensuite adapté au pâturage, en considérant uniquement un effet linéaire de la quantité d'herbe offerte en dessous de 20 kg MS offerts par vache et par jour. Cette quantité d'herbe offerte est calculée à partir de la surface offerte et de la biomasse au ras du sol moins 800 kg MS/ha, l'hypothèse étant que cette der-

Tableau 2. Caractéristiques générales, variables d'entrée et de sortie de cinq modèles de prévision de l'ingestion d'herbe des vaches laitières au pâturage.
Légende : ● facteur pris en compte dans le modèle, (●) facteur partiellement pris en compte dans le modèle, - facteur non pris en compte dans le modèle.

Modèle	GrazFeed	Sepatou	Pâtur'IN	DietCheck	Grazeln
Pays	Australie	France	France	Australie	France
Référence	Freer <i>et al</i> 1997	Cros <i>et al</i> 2000	Delaby <i>et al</i> 2001b	Heard <i>et al</i> 2004	Delagarde <i>et al</i> 2004
Type d'animaux	ruminants	VL	VL	VL	VL
Type de prairies	beaucoup	RGA-TB ^a	RGA-TB	quelques	beaucoup
Système de pâturage	To+Co ^b	To	To	To	To+Co
ANIMAUX					
Production laitière au pic	●	●	●	-	●
Poids vif	●	-	●	●	●
Note d'état corporel	●	-	-	-	●
Age	●	-	-	-	●
Stade de lactation	●	●	●	-	●
Stade de gestation	●	-	-	-	●
PRAIRIES					
Espèces	●	-	-	●	●
Digestibilité MO herbe offerte	●	●	-	-	●
Digestibilité MO herbe ingérée	●	●	-	-	-
Teneur en matières azotées	●	-	-	-	●
Biomasse par hectare	●	(●)	●	●	●
Structure verticale couvert	●	(●)	-	-	-
Proportion vert/mort	●	-	-	-	-
PÂTURAGE					
Quantité d'herbe offerte	●	●	●	●	●
Temps d'accès journalier	-	-	-	-	●
COMPLEMENTATION					
Dose concentré ingéré	●	●	●	●	●
Nature et valeur du concentré	●	-	-	-	●
Dose de fourrage ingéré	●	●	●	-	●
Nature et valeur du fourrage	●	-	-	-	●
INTERACTIONS					
Animal × Pâturage	●	-	●	-	●
Animal × Complém.	●	-	●	-	●
Pâturage × Complém.	●	●	●	●	●
Animal × Pâturage × Complém.	●	-	●	-	●
SORTIES DU MODELE					
Herbe ingérée	●	●	●	●	●
Production laitière	●	-	-	-	●
Variation de poids vif	●	-	-	-	-

^a RGA-TB : ray-grass anglais-trèfle blanc ; ^b To : tournant, Co : continu.

nière quantité n'est pas pâturable par des vaches laitières. La spécificité de ce modèle d'ingestion est que la digestibilité de l'herbe sélectionnée par les vaches est calculée pour chaque strate défoliée en considérant une répartition verticale théorique de la digestibilité de l'herbe. La digestibilité moyenne est ensuite calculée par intégrale depuis le sommet de la végétation jusqu'à la hauteur résiduelle en sortie de parcelle, qui dépend de la quantité d'herbe offerte par vache. Cependant, cette digestibilité moyenne de l'herbe sélectionnée est difficile à calculer à partir des équations publiées et l'ingestion prévue semble assez peu sensible à une variation de

digestibilité liée à celle de la quantité d'herbe offerte.

2.2 / Pâtur'IN

Pâtur'IN est un logiciel d'aide à la gestion tactique du pâturage tournant des vaches laitières développé en France (Delaby *et al* 2001b). Le sous modèle animal, sommairement décrit par Delaby *et al* (2001b), est basé sur une version simplifiée du système des Unités d'Encombrement (UE ; INRA 1988). La capacité d'ingestion des vaches dépend de la production au pic de lactation, du stade de lactation et du poids vif. La valeur d'encombrement de l'herbe pâturée, celle des concentrés

et celle des fourrages complémentaires sont fixées. L'ingestion relative au pâturage est calculée en proportion de l'ingestion volontaire à l'auge en prenant en compte les conditions de pâturage, essentiellement le degré de défoliation de la prairie. La spécificité de ce modèle est qu'il décrit les variations inter-journalières de l'ingestion en pâturage tournant avec des temps de séjour de plusieurs jours sur chaque parcelle. Chaque nouveau jour de pâturage dans une parcelle, l'effet négatif de la structure du couvert végétal sur l'ingestion est pris en compte au travers d'une fonction exponentielle basée sur le rapport entre la hauteur encore pâturable et la hauteur pâturable initiale en début de parcelle. La hauteur pâturable est calculée entre la hauteur initiale en entrée de parcelle et une hauteur résiduelle minimum, elle-même définie comme une proportion de la hauteur initiale. En pâturage rationné, avec une nouvelle bande d'herbe distribuée par jour, l'effet du taux de défoliation de la prairie sur l'ingestion est calculé chaque heure avec la même fonction exponentielle. Une fonction supplémentaire permet de limiter l'ingestion pour de très faibles ou de très fortes biomasses.

2.3 / Diet-Check

Diet-Check est un outil de calcul simple développé sous Excel pour aider les éleveurs australiens à estimer l'ingestion de nutriments des vaches laitières en pâturage rationné. Le modèle d'ingestion d'herbe est complètement décrit par Heard *et al* (2004). L'ingestion d'herbe journalière, exprimée par 100 kg de poids vif, est d'abord calculée pour des vaches non complémentées à partir de la quantité d'herbe offerte (par 100 kg de poids vif), de la hauteur d'herbe et de l'espèce principale pâturée. L'effet de la quantité d'herbe offerte au ras du sol sur l'ingestion est pris en compte par une fonction exponentielle, et l'effet de la hauteur d'herbe par une fonction linéaire et positive. Pour les vaches recevant des concentrés, l'ingestion d'herbe est estimée après calcul du taux de substitution herbe-concentrés. Celui-ci est une fonction linéaire de la quantité d'herbe ingérée par les vaches non complémentées, du niveau d'apport de concentrés, de la saison et de l'espèce végétale principale. L'ensemble des relations a été calibré sur de larges bases expérimentales australiennes. Dans le logiciel, la prévision de la quantité d'herbe ingérée permet alors de calculer les apports et les bilans en énergie et en protéines, de même que la

réponse marginale de la production laitière à un apport de concentré. Cette réponse marginale est fonction de la quantité d'herbe ingérée (des vaches non complémentées), de la note d'état corporel et de la saison.

2.4 / GrazFeed

GrazFeed est un logiciel australien commercialisé permettant de calculer l'ingestion d'herbe et la production des ruminants au pâturage. Ce logiciel fait partie d'un ensemble de logiciels d'aide à l'utilisation du pâturage (GrazPlan), aussi bien sur le plan technique que sur le plan économique. Le modèle détaillé d'ingestion d'herbe est décrit par Freer *et al* (1997). Il est conçu et fonctionne pour tout type de ruminants et de prairies. L'ingestion potentielle d'herbe est dans un premier temps calculée à partir du poids vif, de la production laitière au pic de lactation et du stade de lactation. L'ingestion relative au pâturage est dans un deuxième temps calculée en prenant en compte l'effet de la biomasse de matériel vert et de matériel mort dans la prairie, pour le pâturage continu et pour le pâturage tournant, de même que l'effet de la quantité d'herbe offerte en pâturage tournant. Une des spécificités de ce modèle est que la biomasse verte et la biomasse de matériel mort, renseignées obligatoirement par l'utilisateur, sont automatiquement divisées en six pools homogènes de qualité (digestibilité) différente. Au cours du processus de défoliation d'une parcelle, le modèle considère que les animaux sélectionnent successivement ces différents pools de végétation, de la plus élevée à la plus faible digestibilité. En pâturage rationné (une bande par jour), les calculs d'herbe ingérée, et donc d'herbe restant disponible à pâturer, sont réalisés cinq fois par jour pour tenir compte du fort taux de prélèvement d'herbe par les animaux. Ceci permet de prendre en compte l'effet de la quantité d'herbe offerte sur l'ingestion, mais les équations ne sont pas explicitées par Freer *et al* (1997). Un pâturage tournant avec plusieurs jours de temps de séjour n'est également pas facile à simuler avec le logiciel. Pour les animaux complémentés, le modèle considère que la quantité d'aliment complémentaire distribuée ne va pas forcément être ingérée en totalité, en raison d'un choix opéré par l'animal entre l'herbe pâturée et le complément distribué. La quantité d'aliment complémentaire réellement ingérée est d'abord calculée au travers d'une estimation de la motivation de l'animal à ingérer ce complément. Cette motivation est fonction de la digestibilité du complément, exprimée en proportion de la digestibilité du

pool de végétation en cours de défoliation. Plus le complément est digestible par rapport à l'herbe pâturée, plus il est ingéré. Le taux de substitution entre les compléments et l'herbe pâturée est calculé ensuite, et dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels la disponibilité en protéines dégradables dans le rumen et le stade de lactation pour les animaux en lactation. Pour les vaches laitières, GrazFeed estime également la production de lait et la variation de poids vif. La production de lait est estimée à partir de la production laitière potentielle, qui fixe une production maximale possible, et à partir des apports énergétiques et azotés calculés par le modèle d'ingestion, qui vont d'autant plus réduire la production potentielle qu'ils sont faibles. La production laitière potentielle est estimée à partir de la production de lait au pic de lactation, du stade de lactation et de la note d'état au vêlage. La variation de poids vif est calculée à partir de l'énergie disponible pour le gain de poids, celle-ci étant estimée par différence entre l'énergie ingérée et l'énergie utilisée pour la production de lait, l'entretien et la gestation.

2.5 / GrazeIn

GrazeIn est un modèle de prévision de l'ingestion et de la production laitière des vaches au pâturage, développé comme l'un des moteurs du logiciel européen Grazemore, outil d'aide à la gestion du pâturage (Mayne *et al* 2004). Le modèle d'ingestion et de production est sommairement décrit par Delagarde *et al* (2004), et une description complète du modèle sera publiée prochainement (Faverdin *et al* et Delagarde *et al* non publié). Le modèle calcule dans une première étape l'ingestion volontaire d'herbe selon les principes du système des Unités d'Encombrement de l'INRA (1988), c'est-à-dire la capacité d'ingestion des vaches et l'ingestibilité des différents aliments de la ration. La capacité d'ingestion est fonction de la production laitière au pic de lactation, du poids vif, de la note d'état corporel, de l'âge, du stade de lactation et du stade de gestation. L'ingestibilité de l'herbe dépend de l'espèce principale pâturée, du cycle, de la digestibilité et de la teneur en protéines de l'herbe, selon les équations de PrévAlim du logiciel INRAtion (Baumont *et al* 1999). La valeur d'encombrement des concentrés est calculée à partir du taux de substitution herbe-concentrés, qui dépend principalement du bilan énergétique des vaches. Dans une seconde étape, le modèle calcule l'ingestion d'herbe relative au pâturage, en considérant

comme critères de la disponibilité en herbe la quantité d'herbe offerte au dessus de 2 cm pour le pâturage tournant et la hauteur d'herbe pour le pâturage continu. L'effet sur l'ingestion du temps d'accès journalier à la pâture est également pris en compte quel que soit le système de pâturage. Ces relations de type exponentiel décroissant ont été développées par une analyse exhaustive de la littérature. Pour le pâturage tournant, une des hypothèses du modèle est que la biomasse par hectare n'a pas d'effet sur l'ingestion lorsque des prairies de différentes biomasses sont comparées à même quantité d'herbe offerte au dessus de 2 cm, hauteur en deçà de laquelle l'herbe est jugée inaccessible (Delagarde *et al* 2001a). En raison de la répartition verticale non linéaire de la biomasse dans un couvert végétal, deux prairies de hauteurs différentes comparées à même quantité d'herbe offerte au ras du sol ne sont pas comparées à même quantité d'herbe offerte au dessus de 2 cm, et ne conduisent donc pas à la même quantité d'herbe ingérée. Les effets connus sur l'ingestion de la biomasse par hectare à même quantité d'herbe offerte au ras du sol sont donc simulés par GrazeIn de façon indirecte. Dans le modèle, plusieurs calculs itératifs permettent d'estimer l'ensemble des interactions entre les caractéristiques des vaches, de l'herbe, des conditions de pâturage et des compléments apportés. La production laitière moyenne du troupeau à l'échelle de la parcelle est ensuite estimée à partir de la production laitière potentielle et des apports azotés et énergétiques calculés par le modèle d'ingestion, selon une loi des rendements décroissants. La production laitière potentielle est estimée à partir du lait produit au pic de lactation et du stade de lactation, et représente la capacité sécrétrice de la mamelle. La disponibilité en énergie pour la production de lait par la mamelle dépend des apports permis par l'ingestion mais aussi de la gestion des réserves corporelles, elle-même fonction du stade de lactation et de la note d'état corporel. Bien que paramétré pour vaches laitières, ce modèle pourrait être adapté facilement aux autres types de ruminants.

3 / Prévoir les effets des conditions de pâturage et de la complémentation sur l'ingestion d'herbe

L'intérêt des modèles adaptés au pâturage est bien de prendre en compte

l'effet des conditions de pâturage et de la complémentation sur l'ingestion d'herbe. Les caractéristiques des animaux et la valeur nutritive de l'herbe sont des facteurs de régulation de l'ingestion qui ne sont pas spécifiques du pâturage, dont les effets sont décrits par ailleurs (INRA 1988), et qui ne seront donc pas étudiés ici. Ce chapitre va comparer les lois de réponse de l'ingestion aux conditions de pâturage et de complémentation pour différents modèles. Pour cela, des simulations ont été réalisées en fixant les caractéristiques du troupeau de vaches laitières (vaches multipares, 40 kg de lait au pic de lactation, 150 jours de lactation, 600 kg de poids vif), de la prairie (ray-grass anglais végétatif au troisième cycle, digestibilité MO de 0,80, teneur en MAT de 180 g/kg MS, biomasse de 4,2 t MS/ha au ras du sol, soit 2 t MS/ha > 4 cm) et de la saison (printemps). Plusieurs modèles n'ont pu être testés directement par manque d'information dans les publications. Certaines simulations ont pu être réalisées en utilisant le logiciel dans lequel le modèle était inclus (GrazFeed version 4.1.5.) ou grâce à l'aide des auteurs (Pâtur'IN).

Les conditions de pâturage qui favorisent une ingestion journalière élevée sont celles qui permettent à l'animal d'exprimer pleinement son potentiel d'ingestion. Pour cela, il faut que l'herbe soit « disponible » pour l'animal, c'est-à-dire facile à récolter (préhensible) et présente en quantité suffisante. Conceptuellement, il faut considérer deux situations de pâturage : celle où la surface accessible aux animaux n'est pas limitante, comme en pâturage continu, et celle où la surface accessible est limitée, comme en pâturage tournant ou rationné. Dans le premier cas, l'ingestion ne sera limitée que par l'état du couvert végétal, notamment sa biomasse (kg MS/ha), sa hauteur et sa composition morphologique, qui définissent sa préhensibilité (Prache et Peyraud 1997). En pâturage continu, la relation curvilinéaire entre la hauteur et l'ingestion est connue depuis longtemps (Penning *et al* 1991, Rook *et al* 1994), quoique rarement proposée sous forme d'équation généralisable (Herrero *et al* 1998). L'effet de la hauteur du couvert sur l'ingestion en pâturage continu est pris en compte dans les modèles GrazFeed et GrazIn, mais non présenté ici. Dans le second cas, quand la surface est limitée, l'animal défolie la prairie plus en profondeur, et la simple description de l'état initial du couvert végétal n'est pas suffisante pour estimer le degré de restriction de

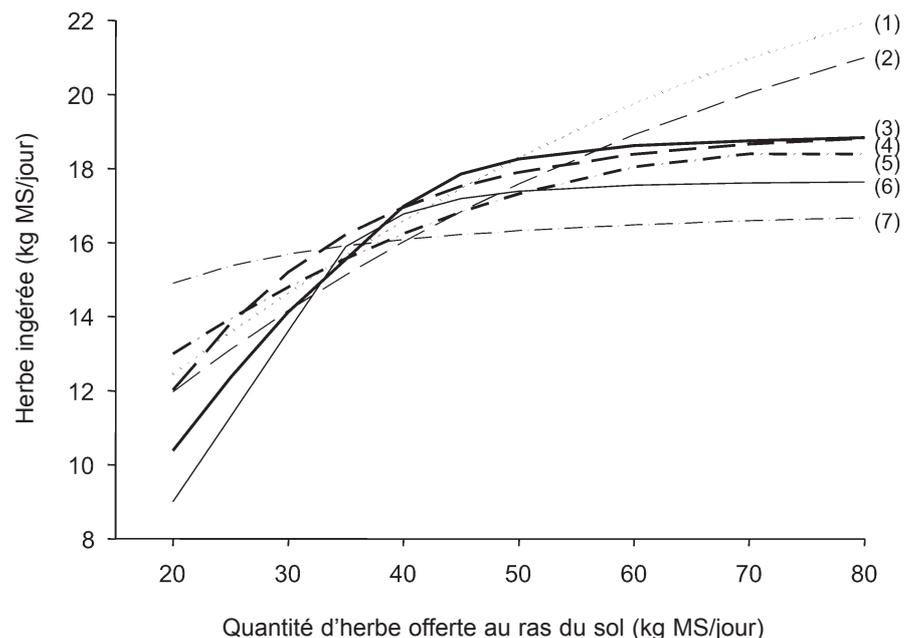
l'ingestion. En systèmes de pâturage tournant ou rationné, qui sont les plus pratiqués, l'effet de la structure de la végétation (hauteur, biomasse, proportion de limbes, etc) ne peut donc être raisonné indépendamment de celui de la surface offerte. La quantité d'herbe offerte moyenne par vache et par jour, calculée comme le produit de la biomasse par hectare et de la surface offerte constitue alors un indicateur synthétique plus approprié de la disponibilité en herbe. Les paragraphes suivants (3.1 à 3.3) font référence à la prévision de l'effet de la disponibilité en herbe sur l'ingestion en pâturage tournant (surface accessible aux animaux limitée).

3.1 / Quantité d'herbe offerte

Par définition, la quantité d'herbe offerte moyenne par vache et par jour varie, pour un état de végétation donné, avec la surface offerte. La relation entre la quantité d'herbe offerte et la quantité d'herbe ingérée par les vaches laitières en pâturage tournant ou rationné a été largement étudiée depuis longtemps, avec des équations initialement linéaires, puis curvilinéaires et plus récemment de type exponentiel décroissant. L'ingestion atteint logiquement une asymptote pour des quantités offertes élevées. Une sélection de sept équations obtenues sur vaches laitières et

décrivant l'accroissement curvilinéaire de l'ingestion avec la quantité d'herbe offerte au ras du sol est présentée à la figure 1. L'ingestion d'herbe augmente en moyenne de 0,20, 0,15 et 0,11 kg MS par kg MS d'herbe offerte en plus dans la gamme 20 à 30, 30 à 40 et 40 à 50 kg MS/vache/jour, respectivement. La quantité d'herbe ingérée prévue est assez similaire entre modèles pour une quantité d'herbe offerte moyenne de 35-40 kg MS/vache/jour, mais diffère assez fortement entre modèles pour les quantités d'herbe offertes faibles (< 30 kg MS/jour) et élevées (> 50 kg MS/jour). La plage de variation des prévisions d'herbe ingérée en fonction des modèles est ainsi proche de 6, 1, 4 et 6 kg MS/jour pour des quantités d'herbe offerte de 20, 40, 60 et 80 kg MS/jour, respectivement. Ces écarts de prévision entre modèles pour les quantités d'herbe offertes extrêmes ne semblent provenir que partiellement des différences de gammes étudiées dans les bases de données ayant servi à développer les équations. Ils semblent plutôt provenir de différences dans les réponses animales observées et de l'approche mathématique retenue, cette dernière déterminant souvent la courbure de la relation et donc la robustesse des prévisions pour les situations atypiques.

Figure 1. Effet simulé de la quantité d'herbe offerte sur la quantité d'herbe ingérée par les vaches laitières au pâturage. Les conditions des simulations sont décrites dans le texte.



Modèles : (1) Stockdale (2000), (2) Diet-Check (Heard *et al* 2004), (3) GrazFeed (Freer *et al* 1997), (4) GrazIn (Delagarde *et al* 2004), (5) Stockdale (1985), (6) Pâtur'IN (Delaby *et al* 2001b), (7) Peyraud *et al* (1996).

3.2 / Biomasse ou hauteur d'herbe

En pâturage tournant, comparer des prairies de biomasses par hectare différentes nécessite de faire varier la surface offerte de façon inversement proportionnelle à la variation de biomasse pour maintenir constante la quantité d'herbe offerte. Ce type d'études a été très peu réalisé comparativement aux études plus classiques sur l'effet de la quantité d'herbe offerte. Les revues récentes ou les compilations de données expérimentales suggèrent que l'ingestion est moins sensible à la biomasse qu'à la quantité d'herbe offerte (Delagarde *et al* 2001a, Heard *et al* 2004). Dans les régressions multiples existantes, l'effet de la biomasse sur l'ingestion est linéaire ou quadratique, avec une très grande variabilité des pentes observées (tableau 1). Cette grande variabilité s'explique en partie par le fait que la pente de la relation entre biomasse et ingestion au pâturage est très dépendante de la hauteur (0 ou 4-5 cm) à laquelle biomasse et quantité

d'herbe offerte sont calculées (Delagarde *et al* 2001a). En effet, les variations relatives de biomasse entre prairies de hauteurs différentes sont modifiées selon qu'on considère les biomasses au ras du sol, à 2 cm ou à 5 cm au dessus du sol, ce qui modifie les variations relatives de surface offerte et donc les écarts d'ingestion observés. Dans les modèles les plus complexes, l'effet de la biomasse sur l'ingestion est souvent pris en compte indirectement (voir description des modèles au chapitre 3). L'effet simulé de la biomasse sur l'ingestion pour quatre de ces modèles est montré à la figure 2. Globalement, tous les modèles prévoient un effet positif de la biomasse sur l'ingestion à même quantité d'herbe offerte au ras du sol, mais avec des pentes et des interactions avec la quantité d'herbe offerte très différentes selon les modèles. GrazFeed et GrazeIn simulent un effet exponentiel décroissant de la biomasse sur l'ingestion. Diet-Check prévoit un effet important et linéaire de la biomasse sur l'ingestion, quelle que soit la quantité d'herbe

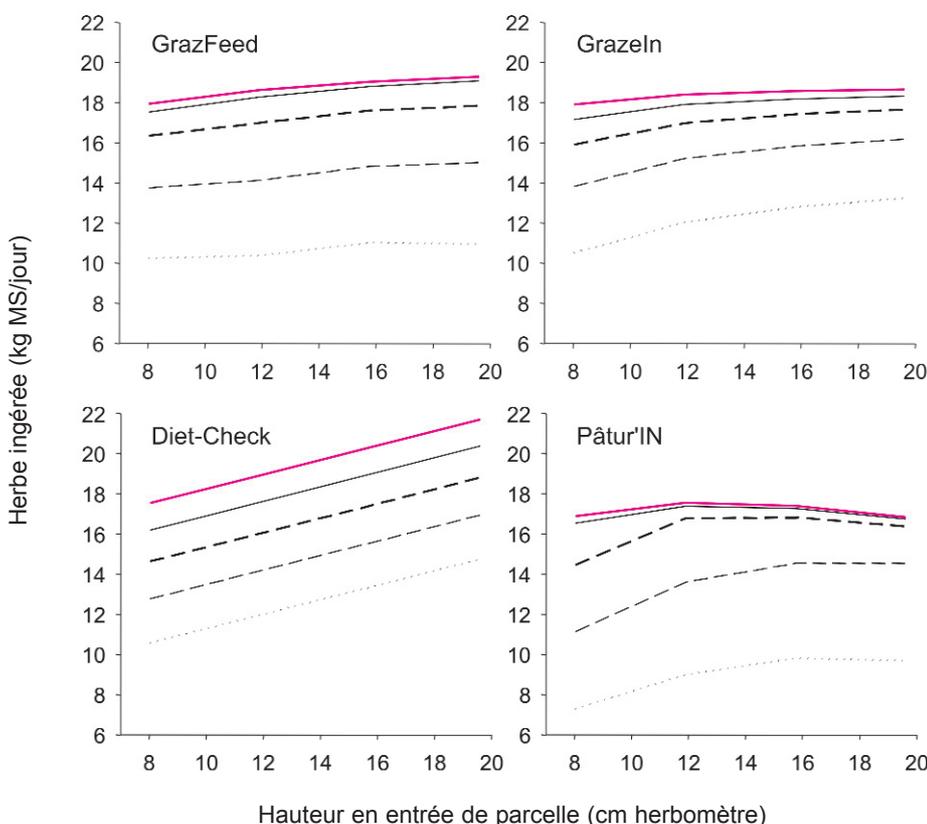
offerte. Pâtur'IN prévoit généralement une réduction d'ingestion pour les très faibles biomasses, sauf lorsque la quantité d'herbe offerte est très élevée.

Les différences d'approche des modèles et des résultats des simulations montrent bien que l'effet de la hauteur du couvert en entrée de parcelle sur l'ingestion des vaches en pâturage tournant n'est pas encore clairement établi. Il a cependant été montré, dans une large gamme de variation des hauteurs initiales et résiduelles (avant et après pâturage), que l'ingestion est très corrélée à la proportion totale de hauteur défoliée sur l'ensemble du temps de séjour, ce qui montre un effet prépondérant de la pression de pâturage (quantité d'herbe offerte) sur celui de la hauteur initiale du couvert (Delagarde *et al* 2001b).

3.3 / Structure de la prairie

Pour une biomasse par hectare donnée, la structure de la prairie peut être définie par sa densité (rapport biomasse/hauteur), par la répartition verticale de la biomasse dans les différentes strates du couvert, mais aussi par sa composition botanique et morphologique, comme la proportion de légumineuses, de feuilles, de limbes, de gaines, de folioles, de pétioles, de tiges et de tissus morts. L'influence de ces facteurs sur l'ingestion des ruminants au pâturage a été rarement quantifiée à l'échelle de la journée ou de la semaine, et non pris en compte dans la plupart des modèles de prévision de l'ingestion existants. Cependant, les modèles qui prennent déjà en compte les effets de la quantité d'herbe offerte, de la biomasse, des espèces végétales, de la digestibilité et de la teneur en protéines de l'herbe prennent en compte probablement de façon implicite certains aspects de la structure du couvert, notamment ceux inhérents à l'âge de repousses. GrazFeed est le modèle qui intègre le plus de variables descriptives de la structure du couvert végétal. Cependant, les simulations réalisées avec le logiciel GrazFeed montrent que l'ingestion estimée est peu sensible à des variations de densité du couvert pour une biomasse fixée. Ainsi, l'ingestion diminue de 0,1 à 0,2 kg MS par jour lorsque la densité du couvert au ras du sol augmente de 250 à 330 kg MS/ha/cm. L'ingestion d'herbe prévue est plus sensible à la proportion de matériel mort dans le couvert puisqu'elle diminue de 1 kg MS par jour lorsque la proportion de matériel mort au ras du sol augmente de 10 à 20 % de la biomasse totale, ceci à même digestibilité totale du couvert.

Figure 2. Effet simulé de la hauteur en entrée de parcelle, mesurée à l'herbomètre, sur la quantité d'herbe ingérée par les vaches laitières au pâturage, en fonction de la quantité d'herbe offerte exprimée au ras du sol. Les conditions des simulations sont décrites dans le texte.



Modèles : GrazFeed (Freer *et al* 1997), GrazeIn (Delagarde *et al* 2004), Diet-Check (Heard *et al* 2004), Pâtur'IN (Delaby *et al* 2001b). Des hauteurs de 8, 12, 16, 20 cm correspondent approximativement à des biomasses de 1, 2, 3 et 4 t MS/ha au dessus de 4 cm, et de 3,0, 4,2, 5,3 et 6,4 t MS/ha au ras du sol, respectivement. Quantité d'herbe offerte au ras du sol : 20, -- 30, - - 40, — 50 et — 60 kg MS/vache/jour.

3.4 / Temps d'accès journalier à la pâture

En automne, en hiver et au début du printemps, notamment pendant les périodes de transition alimentaire, les vaches laitières ont fréquemment des durées d'accès journalières au pâturage restreintes, entre la traite du matin et la traite du soir par exemple. Dans la plupart des modèles existants, l'ingestion d'herbe est prévue pour un accès journalier complet au pâturage, c'est-à-dire environ 18 à 20 h/jour pour des vaches laitières traitées deux fois par jour. Buckmaster *et al* (1997) ont les premiers pris en compte l'effet du temps d'accès journalier à la pâture sur l'ingestion. L'équation linéaire simple à deux phases proposée considère que le temps d'accès n'est pas limitant pour l'ingestion au delà de 8 h par jour, et qu'il décroît linéairement et proportionnellement à ce temps d'accès en deçà de 8 h par jour (figure 3). Plus récemment, dans le modèle GrazeIn, Delagarde *et al* (2004) ont construit une relation exponentielle entre le temps d'accès et l'ingestion à partir d'une revue de la littérature (figure 3). Pour les temps d'accès courts (< 8 h/jour), cette relation est modulée par la hauteur du couvert, qui détermine la vitesse d'ingestion potentielle des vaches. En moyenne, lorsque le temps d'accès journalier à la pâture est de 12, 8, 6 et 4 h/jour, GrazeIn prévoit que les vaches ingèrent respectivement 94 %,

90 %, 84 % et 67 % de ce qu'elles ingèreraient avec un temps d'accès à la pâture non limité (20 h/jour). Le nombre de données expérimentales ayant servi à construire ces modèles est cependant limité. Mieux prévoir l'ingestion des ruminants avec des temps d'accès limités à la pâture nécessiterait davantage d'études, notamment si l'on considère les nombreuses interactions possibles avec les conditions de pâturage et les apports d'aliments complémentaires.

3.5 / Complémentation en concentrés

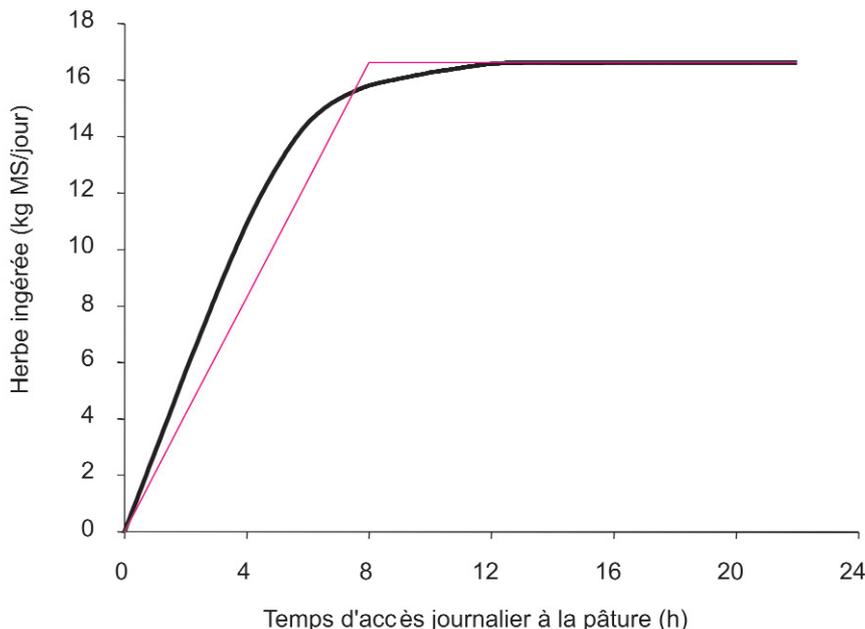
Pour les vaches laitières nourries à volonté avec des régimes conservés, le taux de substitution entre fourrages et concentrés, défini comme la quantité de fourrage ingéré en moins par kg de concentré ingéré en plus, dépend des besoins des animaux, de la qualité du fourrage et du concentré, et finalement du bilan énergétique des animaux (Faverdin *et al* 1991). Au pâturage, les mêmes concepts peuvent être appliqués, le bilan énergétique variant en plus avec les conditions de pâturage. Ainsi, le taux de substitution herbe/concentrés augmente lorsque la disponibilité en herbe s'accroît, passant de 0 pour une forte pression de pâturage à 0,6-0,8 pour une très faible pression de pâturage (Stockdale 2000, Peyraud et Delaby 2001). Une précision satisfaisante de la prévision du

taux de substitution au pâturage doit donc prendre en compte l'ensemble des interactions possibles entre les caractéristiques des animaux, de la prairie, des conditions de pâturage et des compléments apportés. Une approche empirique par simple régression multiple ne peut atteindre un tel objectif. Les réponses à un apport de concentré des vaches laitières en pâturage rationné prévues par quatre modèles sont montrées dans la figure 4. Ces quatre modèles montrent des tendances similaires, à savoir une augmentation du taux de substitution à la fois lorsque la quantité d'herbe offerte et la dose de concentré ingéré augmentent. Cependant, les valeurs absolues des taux de substitution sont assez différentes entre modèles. Globalement, les deux modèles européens PâtureIN et GrazeIn prévoient des taux de substitution plus faibles que les deux modèles australiens GrazeFeed et Diet-Check. Ces différences de prévision peuvent provenir en partie de celles des souches laitières utilisées. Horan *et al* (2005), avec des vaches de race Holstein, ont en effet montré que, dans les mêmes conditions de pâturage, le taux de substitution était plus élevé chez la souche néozélandaise que chez la souche européenne, conduisant à des réponses marginales de production laitière plus faibles.

3.6 / Complémentation en fourrages

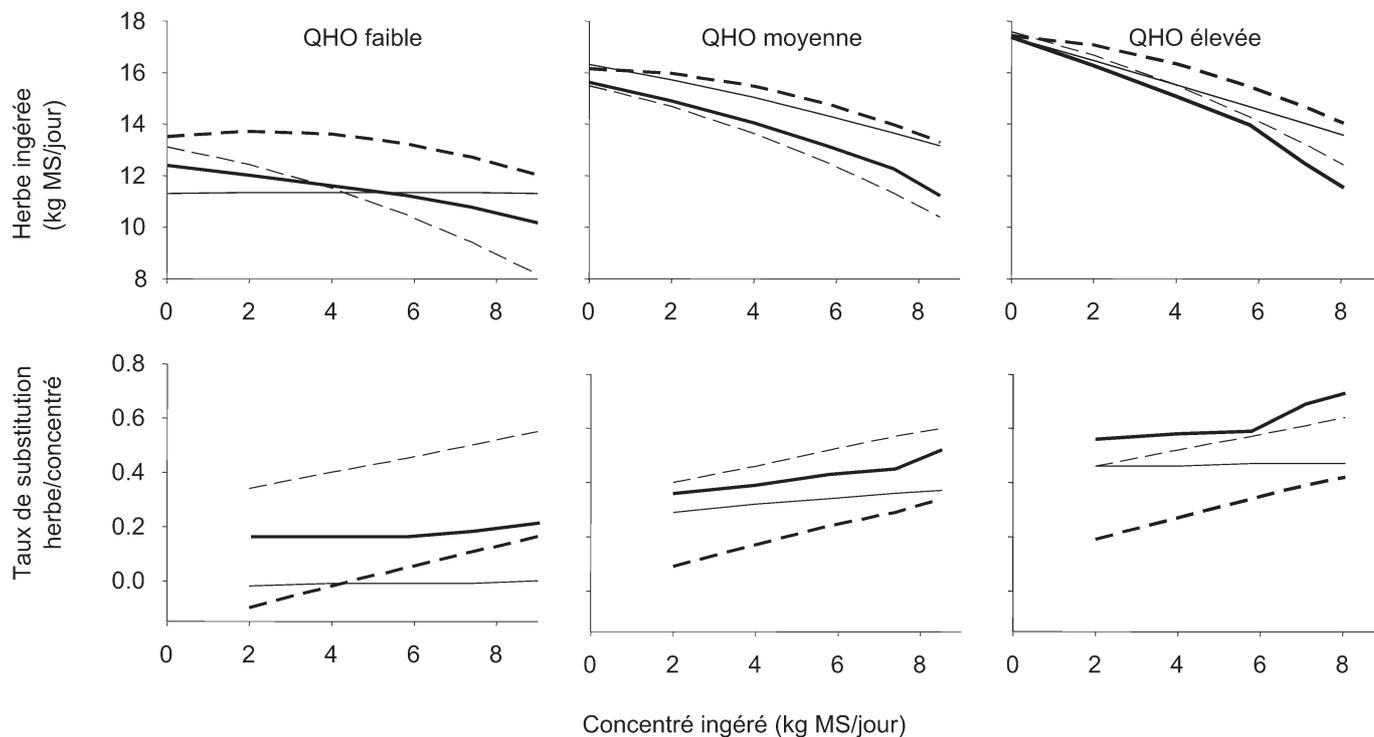
La complémentation en fourrages (foin, ensilage, enrubanné) des vaches laitières au pâturage a été beaucoup moins étudiée que la complémentation en concentrés. A titre d'exemple, aucune régression multiple de prévision de l'ingestion prenant en compte un apport de fourrage complémentaire n'a été publiée jusqu'à présent. La revue la plus complète sur la substitution herbe/fourrage complémentaire au pâturage est celle de Phillips (1988). Tous les modèles présentés au tableau 2 estiment la substitution herbe/fourrages des vaches laitières au pâturage, et prennent en compte les interactions possibles avec la disponibilité en herbe. Dans tous les cas, la substitution au pâturage est plus forte avec des fourrages complémentaires qu'avec des concentrés en raison de leur valeur d'encombrement plus élevée.

Figure 3. Effet simulé du temps d'accès journalier à la pâture sur la quantité d'herbe ingérée par les vaches laitières au pâturage. Les conditions des simulations sont décrites dans le texte.



Modèles : — GrazeIn (Delagarde *et al* 2004), — Buckmaster *et al* (1997).

Figure 4. Effet simulé du niveau d'apport de concentré (kg MS/jour) sur la quantité d'herbe ingérée (kg MS/jour) et le taux de substitution herbe/concentré (sur la base de la MS) pour les vaches laitières au pâturage. Les conditions des simulations sont décrites dans le texte. Les simulations sont réalisées pour des quantités d'herbe offertes faible, moyenne et élevée (QHO: 25, 37 et 50 kg MS/jour au ras du sol, respectivement).



Modèles : -- Diet-Check (Heard *et al* 2004), - - Grazeln (Delagarde *et al* 2004), — Pâtur'IN (Delaby *et al* 2001b), ▬ GrazFeed (Freer *et al* 1997).

3.7 / Climat

L'influence des conditions climatiques sur l'ingestion au pâturage est très difficile à estimer puisque le climat n'est pas un facteur isolable «toutes choses égales par ailleurs». Seules les conditions extrêmes combinées de pluie, de vent ou de température semblent avoir un effet marqué sur l'ingestion (Rémond et Vermorel 1982, Faverdin 1992). Parmi les modèles ou logiciels développés pour le pâturage, seul Grazfeed prend en compte l'effet du climat sur l'ingestion. Dans ce modèle, l'ingestion diminue lorsque la température moyenne journalière augmente, mais uniquement au dessus de 25° C et lorsque la température minimale est supérieure à 22° C. La réduction d'ingestion est alors environ de 0,25 kg MS/jour par degré *Celsius* supplémentaire, soit environ - 6 %, - 14 % et - 25 % d'ingestion pour des températures moyennes de 30, 35 et 40° C, respectivement. De telles conditions sont rarement observées dans les zones herbagères françaises ou européennes, et suggèrent donc une faible influence du climat sur l'ingestion en dehors des régions méridionales en été. Dans le modèle Grazfeed, ni la pluie ni le vent n'affectent l'ingestion.

4 / Précision des modèles de prévision de l'ingestion au pâturage

Les auteurs des modèles présentés ci-dessus ont très rarement évalué la précision des prévisions de leurs modèles, encore moins tenté de comparer leurs performances avec celles des modèles pré-existants. Nous proposons ici une comparaison statistique globale de la précision de quelques régressions multiples et de quelques modèles publiés. Des bases de données provenant de la station de recherches de Moorepark (TEAGASC, Irlande) et de l'UMR Production du Lait de Saint-Gilles (INRA, France) ont été utilisées afin de comparer les valeurs prévues par les différents modèles aux valeurs observées expérimentalement pour des vaches laitières au pâturage.

Dans les expérimentations, la quantité d'herbe ingérée individuelle a été mesurée par la méthode des alcanes au TEAGASC et par la méthode basée sur l'estimation de la quantité de fèces et de la digestibilité de l'herbe ingérée à l'INRA. Les caractéristiques individuelles et l'ingestion de chaque vache ont été moyennées par troupeau et par

parcelle pâturée. Les simulations réalisées avec les différents modèles ont été réalisées sur ces données moyennes troupeau/parcelle. La base de données du TEAGASC comporte 20 essais réalisés de 1988 à 2000, représentant 190 troupeaux au pâturage avec une moyenne de 15 vaches par troupeau. La base de données de l'INRA comporte 11 essais réalisés de 1988 à 2000, représentant 114 troupeaux au pâturage avec une moyenne de 6 vaches par troupeau (tableau 3). La précision des prévisions a été appréciée par une comparaison des valeurs d'ingestion observées et prévues, au travers du calcul de l'Erreur Moyenne de Prévision (EMP) et des proportions du carré moyen de l'erreur de prévision expliquées par le biais sur la moyenne et par le biais sur la pente (Rook *et al* 1990). Une EMP relative de 0,15, exprimée en proportion de la valeur moyenne observée, signifie que le modèle est globalement capable de prévoir la quantité d'herbe ingérée avec une erreur moyenne de 15 %.

4.1 / Modèles comparés

Quatre modèles et cinq régressions multiples prenant au moins en compte quelques caractéristiques animales et les conditions de pâturage ont été sélectionnés.

Tableau 3. Description de la base de données comprenant 304 troupeaux expérimentaux de vaches laitières au pâturage (190 pour TEAGASC, Irlande et 114 pour INRA, France) utilisée pour comparer la précision des prévisions de la quantité d'herbe ingérée par différents modèles ou régressions multiples.

Variables	Moyenne (n = 304)	etr	Min	Max	TEAGASC (n = 190)	INRA (n = 114)
Ingestion mesurée (kg MS)						
Herbe	15,9	2,09	9,9	22,0	15,6	16,2
Concentré	0,9	1,23	0,0	5,4	0,9	0,8
Total	16,7	2,28	10,4	23,4	16,6	17,0
Production laitière (kg)	21,7	5,51	8,9	41,8	22,4	20,6
Lait au pic de lactation (kg)	33,7	5,73	21,0	46,7	31,1	38,1
Stade de lactation (semaines)	24,2	7,80	3,8	39,9	21,3	29,0
Poids vif (kg)	565	39,9	487	677	549	592
Digestibilité MO herbe	0,80	0,035	0,72	0,87	0,82	0,78
Teneur MAT herbe (g/kg MS)	184	36,9	86	277	200	156
Biomasse (t MS/ha)						
> 4 cm	2,5	0,85	0,6	5,7	2,3	2,8
Au ras du sol ^a	4,9	1,14	3,1	9,1	4,4	5,8
Surface offerte (m ² /vache/jour)	93	38,8	21	246	111	64
Quantité d'herbe offerte (kg MS/vache/jour)						
> 4 cm	21,3	8,58	6,6	61,2	24,5	15,8
Au ras du sol ^a	43,2	14,91	16,5	105,4	48,6	34,4

^a mesurée ou estimée.

tionnés pour cette comparaison (tableau 4). Quelques modèles comme GrazFeed n'ont pu être testés en raison d'un manque d'informations dans la publication (Freer *et al* 1997). Pour les régressions multiples de Stockdale (1985) et Peyraud *et al* (1996) développées à partir de vaches non complémentées, un taux de substitution moyen de 0,4 a été considéré, permettant de prévoir aussi l'ingestion des vaches de la base de données recevant du concentré. Pour le modèle Sepatou (Cros *et al* 2003), la digestibilité MO de l'herbe offerte (> 4-5 cm) a été utilisée comme entrée du modèle car la digestibilité MO de l'herbe ingérée n'a pu être estimée simplement. La biomasse et la quantité d'herbe offerte sont mesurées au dessus de 4 cm au TEAGASC et au dessus de 5 cm à l'INRA. Comme de nombreuses régressions multiples et plusieurs modèles sont calibrés au ras du sol, la biomasse et la quantité d'herbe offerte ont été recalculées au ras du sol avant de réaliser les simulations.

4.2 / Résultats

Le biais moyen entre l'ingestion d'herbe journalière observée et prévue a varié de - 1,3 à 1,1 kg MS/jour selon les modèles, en considérant l'ensemble des 304 troupeaux expérimentaux (tableau 4). Quand il existe, ce biais moyen est globalement observé sur les deux bases de données TEAGASC et INRA. L'erreur moyenne de prévision a varié selon les modèles de 1,44 à 3,82 kg MS/jour, soit de 10 à 25 %, pour une moyenne de 15 %. Cette gamme de

précision est proche de celle observée par Keady *et al* (2004) qui ont évalué cinq modèles d'ingestion pour vaches laitières alimentées à l'ensilage d'herbe (erreur moyenne de 10 à 20 % selon les modèles). Rook *et al* (1990) ont également rapporté des erreurs moyennes comprises entre 8 et 26 % pour différents modèles d'ingestion de vaches à viande alimentées à l'ensilage d'herbe.

A partir de nos simulations, la précision la plus faible (EMP 29 %) a été observée pour la régression multiple de Caird et Holmes (1986) dans la base TEAGASC. La précision la plus élevée (EMP 8 %) a été observée pour la régression multiple de O'Donovan *et al* (non publié, voir tableau 1) dans la base TEAGASC. Cependant, dans ce dernier cas, les mêmes données ont été utilisées pour développer la régression, à l'échelle de chaque vache, et pour la tester, à l'échelle du troupeau. Cette régression permet d'estimer également avec une bonne précision l'ingestion d'herbe dans la base INRA. L'importance de la base de données TEAGASC ayant permis de développer cette régression permet sans doute d'expliquer sa bonne capacité à prévoir correctement l'ingestion (tableau 1). Parmi les modèles plus complexes, les prévisions de GrazeIn semblent les plus précises dans les deux bases de données (EMP de 10 et 12 %), probablement parce que le nombre de facteurs pris en compte et le nombre d'interactions entre facteurs simulés sont plus nombreux que dans les autres modèles ou régressions multiples. Les modèles plus

simples sont moins précis (EMP de 12 à 20 %) mais peuvent être utilisés plus facilement.

Afin de repérer les sources possibles du biais sur l'ingestion (valeur prévue moins valeur observée), celui-ci a été relié à chacune des principales variables d'entrée du modèle. Peu de corrélations significatives entre le biais et les variables d'entrée ont été observées. Les plus significatives ($R^2 > 0,30$) ont toujours concerné la quantité d'herbe offerte, le biais lui étant négativement corrélé pour le modèle de Caird et Holmes (1986) et positivement corrélé pour les modèles de Stockdale (2000) et Heard *et al* (2004). La relation quadratique entre herbe offerte et herbe ingérée proposée par Caird et Holmes (1986) sous-estime clairement l'ingestion d'herbe pour les quantités d'herbe offertes élevées. A l'inverse, la faible courbure de la relation entre herbe offerte et herbe ingérée des modèles de Stockdale (2000) et de Heard *et al* (2004) surestime probablement l'ingestion pour les quantités d'herbe offertes élevées (figure 1). Dans la base de données globale, en ne considérant que les troupeaux recevant en moyenne moins de 60 kg MS/vache/jour au ras du sol (n = 272), la précision des trois modèles cités ci-dessus est significativement améliorée (EMP de 18 %, 16 % et 14 % pour les modèles de Caird et Holmes (1986), Stockdale (2000) et Heard *et al* (2004), respectivement).

Tableau 4. Analyse statistique de la précision de différents modèles ou régressions multiples permettant de prévoir la quantité d'herbe ingérée par les vaches laitières au pâturage. Les bases de données comportent 190 et 114 troupeaux expérimentaux pour le TEAGASC et l'INRA, respectivement.

Base de données	Régression ou modèle	Herbe ingérée prévue (kg MS)	Biais moyen (prévu-observé)	R ^{2a}	CMEP ^b	Proportion de CMEP			EMP ^c	
						biais %	pente %	erreur %	kg MS	%
TEAGASC (n=190)	(1)	16,3	0,6	0,31	3,40	12	2	86	1,84	12
	(2)	16,3	0,7	0,01	19,77	2	77	21	4,45	29
	(3)	15,3	-0,4	0,39	3,95	4	32	64	1,99	13
	(4)	16,9	1,2	0,23	6,76	23	30	47	2,60	17
	(5)	15,4	-0,2	0,68	1,38	3	0	97	1,18	08
	(6)	17,0	1,4	0,17	5,46	37	0	63	2,34	15
	(7)	15,2	-0,5	0,30	3,13	7	0	93	1,77	12
	(8)	16,2	0,5	0,23	5,23	5	33	62	2,29	15
	(9)	15,8	0,2	0,48	2,21	1	1	98	1,49	10
INRA (n=114)	(1)	16,5	0,3	0,22	4,58	2	24	74	2,14	14
	(2)	15,7	-0,5	0,17	5,86	4	34	62	2,42	15
	(3)	14,9	-1,3	0,25	5,51	31	9	60	2,35	15
	(4)	17,2	1,0	0,19	9,27	10	52	38	3,04	19
	(5)	16,3	0,1	0,28	3,22	0	3	97	1,79	12
	(6)	16,9	0,6	0,14	4,16	9	1	90	2,04	13
	(7)	13,6	-2,6	0,32	10,54	65	7	28	3,25	20
	(8)	16,3	0,1	0,21	6,95	0	50	50	2,64	17
	(9)	15,5	-0,8	0,39	3,38	18	3	79	1,84	12
GLOBAL (n=304)	(1)	16,4	0,5	0,26	3,84	7	10	83	1,96	13
	(2)	16,1	0,2	0,03	14,56	0	71	29	3,82	25
	(3)	15,1	-0,7	0,32	4,53	12	23	65	2,13	14
	(4)	17,0	1,1	0,21	7,70	17	39	44	2,78	18
	(5)	15,7	-0,1	0,53	2,07	1	1	98	1,44	10
	(6)	17,0	1,1	0,14	4,97	25	0	75	2,23	15
	(7)	14,6	-1,3	0,18	5,91	27	13	60	2,43	16
	(8)	16,2	0,4	0,22	5,87	2	42	58	2,43	16
	(9)	15,7	-0,2	0,41	2,65	1	2	97	1,63	11

^a R² : coefficient de détermination de la régression entre valeurs observées et prévues ; ^b CMEP: carré moyen de l'erreur de prévision ; ^c EMP: erreur moyenne de prévision.

Régressions multiples : (1) Stockdale 1985, (2) Caird et Holmes 1986, (3) Peyraud *et al* 1996, (4) Stockdale 2000, (5) O'Donovan *et al* non publié. Modèles : (6) Sepatou (Cros *et al* 2003), (7) Pâtur'IN (Delaby *et al* 2001b), (8) Diet-Check (Heard *et al* 2004), (9) Grazeln (Delagarde *et al* 2004).

Conclusion

Cette revue a montré que les modèles de prévision de l'ingestion et des performances des vaches laitières au pâturage sont encore peu nombreux, particulièrement si l'on exclut les modèles empiriques simples. Dans les modèles existants, les différents moyens choisis pour prendre en compte les conditions de pâturage et la disponibilité en herbe conduisent encore à de grandes variations de la quantité d'herbe ingérée prévue dans les situations extrêmes de pâturage. Cependant, les modèles et régressions multiples que nous avons étudiés ont montré généralement des

précisions des prévisions comparables à celles des modèles d'alimentation des vaches en régime conservé, à savoir une erreur moyenne de prévision comprise entre 10 et 20 % selon les modèles.

D'un point de vue pratique, les futurs modèles devront prévoir l'ingestion et les performances dans une large gamme de conditions d'alimentation et de pâturage, si possible avec des variables simples qui puissent être recueillies en fermes. De plus, davantage d'efforts que par le passé devront être réalisés pour évaluer les performances de ces modèles, à la fois en terme de robustesse dans les situations

atypiques de pâturage et en terme de précision des prévisions par comparaison avec des jeux de données indépendants. Dans la plupart des modèles existants, la prévision des performances (production de lait, variation du poids et de l'état corporel) est encore rarement associée à celle de l'ingestion, ce qui constitue une limite à leur utilisation sur le terrain.

Aujourd'hui, même les modèles les plus complexes sont statiques, l'ingestion et les performances étant calculées à partir d'une description instantanée des conditions d'alimentation et de pâturage. Le challenge pour les futurs modèles sera donc aussi de prévoir la

dynamique d'ingestion au cours du cycle de production des animaux, en considérant notamment les effets résiduels des stratégies alimentaires antérieures. Le développement de nouveaux modèles de prévision de l'ingestion et des performances devrait également toujours être raisonné simultanément à celui d'outils informatiques permettant une utilisation et une diffusion plus aisée de ces modèles.

Remerciements

Le Dr. G. Stakelum est très chaleureusement remercié pour l'important travail de compilation de la base de données expérimentales sur l'ingestion des vaches laitières au pâturage de la station expérimentale de Moorepark (TEAGASC, Irlande). Le Dr. Janna Heard est également remerciée pour les

clarifications concernant le modèle d'ingestion au pâturage de Diet-Check. Un grand remerciement à Luc Delaby pour avoir fourni les équations du modèle d'ingestion d'herbe du logiciel Pâtur'IN, à Pauline Defrance et aux deux relecteurs de la revue pour leurs remarques sur le texte.

Références

- Baumont R., Champciaux P., Agabriel J., Andrieu J., Auffère J., Michalet-Doreau B., Demarquilly C., 1999. Une démarche intégrée pour prévoir la valeur des aliments pour les ruminants : PrévAlim pour INRA. *INRA Prod. Anim.*, 12, 183-194.
- Baumont R., Cohen-Salmon D., Prache S., Sauvart D., 2004. A mechanistic model of intake and grazing behaviour in sheep integrating sward architecture and animal decisions. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 112, 5-28.
- Buckmaster D.R., Holden L.A., Muller L.D., Mohtar R.H., 1997. Modeling intake of grazing cows fed complementary feeds. In: Proc. 18th Int. Grassland Cong., Winnipeg, Canada, 2, 9.
- Caird L., Holmes W., 1986. The prediction of voluntary intake of grazing dairy cows. *J. Agric. Sci.*, 107, 43-54.
- Cherney D.J.R., Mertens D.R., 1998. Modelling grass utilization by dairy cattle. In: J.H. Cherney, D.J.R. Cherney (Eds) *Grass for dairy cattle*. CAB International, Wallingford, UK, 351-371.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie*, 23, 105-122.
- Delaby L., Peyraud J.L., Delagarde R., 2001a. Effect of the level of concentrate supplementation, herbage allowance and milk yield at turnout on the performance of dairy cows in mid lactation at grazing. *Anim. Sci.*, 73, 171-181.
- Delaby L., Peyraud J.L., Faverdin, P., 2001b. Pâtur'IN: le pâturage des vaches laitières assisté par ordinateur. *Fourrages*, 167, 385-398.
- Delaby L., Peyraud J.L., Delagarde R., 2003. Faut-il compléter les vaches laitières au pâturage. *INRA Prod. Anim.*, 16, 183-195.
- 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. Rum.*, 8, 209-212.
- Delagarde R., Faverdin P., Baratte C., Peyraud J.L., 2004. Prévoir l'ingestion et la production des vaches laitières : GrazelN, un modèle pour raisonner l'alimentation au pâturage. *Renc. Rech. Rum.*, 11, 295-298.
- Delagarde R., O'Donovan M., 2005. Modelling of herbage intake and milk production by grazing dairy cows. In: J.J. Murphy (ed),
- Utilisation of grazed grass in temperate animal systems. Proc. Satellite Workshop XXth International Grassland Cong., July 2005, Cork, Ireland. Wageningen Academic Publishers, the Netherlands, 89-104.
- Demment M.W., Greenwood G.B., 1988. Forage ingestion: effects of sward characteristics and body size. *J. Anim. Sci.*, 66, 2380-2392.
- Dove H., 1996. Constraints to the modelling of diet selection and intake in the grazing ruminant. *Aust. J. Agric. Res.*, 47, 257-275.
- Faverdin P., Dulphy J.P., Coulon J.B., Vérité R., Garel J.P., Rouel J., Marquis B., 1991. Substitution of roughage by concentrates for dairy cows. *Livest. Prod. Sci.*, 27, 137-156.
- Faverdin P., 1992. Alimentation des vaches laitières: comparaison des différentes méthodes de prédiction des quantités ingérées. *INRA Prod. Anim.*, 5, 271-282.
- Faverdin P., Baumont R., Ingvarsten K.L., 1995. Control and prediction of feed intake in ruminants. In: Proc. IVth Int. Symp. Nutr. Herbivores, Clermont-Ferrand, France, 95-120.
- Forbes J.M., 1995. Prediction of voluntary intake. In: J.M. Forbes (ed) *Voluntary food intake and diet selection in farm animals*. CAB International, Wallingford, UK, 384-415.
- 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.
- 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., Dent J.B., Fawcett R.H., 1998. The plant/animal interface in models of grazing systems. In: R.M. Peart, R.B. Curry (eds) *Agricultural systems modeling and simulation*. Marcel Dekker Inc., New York, USA, 495-542.
- 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.
- Horan B., Faverdin P., Delaby L., Buckley F., Rath M., Dillon P., 2005. The effect of strain of Holstein-friesian dairy cows on grass intake and milk production in various pasture based systems. *J. Dairy Sci.*, in press.
- Ingvarsten K.L., 1994. Models of voluntary food intake. *Livest. Prod. Sci.*, 39, 19-38.
- INRA, 1988. Alimentation des bovins, ovins et caprins. R. Jarrige (ed), INRA, Paris, France, 476 p.
- Johnson I.R., Parsons A.J., 1985. A theoretical analysis of grass growth under grazing. *J. Theor. Biol.*, 112, 345-367.
- Keady T.W.J., Mayne C.S., Kilpatrick D.J., 2004. An evaluation of five models commonly used to predict food intake of lactating dairy cattle. *Livest. Prod. Sci.*, 89, 129-128.
- Kyriazakis I., 2003. What are ruminant herbivores trying to achieve through their feeding behaviour and food intake? In: Proc. 6th Int. Symp. Nutr. Herbivores, Merida, México, 153-173.
- Maher J., Stakelum G., Rath M., 2003. Effect of daily herbage allowance on the performance of spring-calving dairy cows. *Irish J. Agric. Food Res.*, 42, 229-241.
- Mayne C.S., Rook A., Peyraud J.L., Cone J.W., Martinsson K., González-Rodríguez A., 2004. Improving the sustainability of milk production systems in Europe through increasing reliance on grazed pasture. *Grassland Sci. Europe*, 9, 584-586.
- McGilloway D.A., Mayne C.S., 1996. The importance of grass availability for the high genetic merit dairy cow. In: P.C. Garnsworthy, J. Wiseman, W. Haresign (eds), *Recent advances in animal nutrition*. University Press, Nottingham, UK, 135-169.
- Meijs J.A.C., Hoekstra J.A., 1984. Concentrate supplementation of grazing dairy cows. I. Effect of concentrate intake and herbage allowance on herbage intake. *Grass Forage Sci.*, 39, 59-66.
- 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.
- Peyraud J.L., Delaby L., 2001. Ideal concentrate feeds for grazing dairy cows - Responses to supplementation in interaction with grazing management and grass quality. In: P.C. Garnsworthy, J. Wiseman (eds), *Recent advances in animal nutrition*. University Press, Nottingham, UK, 203-220.
- Peyraud J.L., González-Rodríguez A., 2000. Relations between grass production, supplementation and intake in grazing dairy cows. *Grassland Sci. Europe*, 5, 269-282.

Peyraud J.L., Comerón E.A., Wade M.H., Lemaire G., 1996. The effect of daily herbage allowance, herbage mass and animal factors upon herbage intake by grazing dairy cows. *Ann. Zootech.*, 45, 201-217.

Phillips C.J.C., 1988. The use of conserved forage as a supplement for grazing dairy cows. *Grass Forage Sci.*, 43, 215-230.

Pittroff W., Kothmann M.M., 2001. Quantitative prediction of feed intake in ruminants. II. Conceptual and mathematical analysis of models for cattle. *Livest. Prod. Sci.*, 71, 151-169.

Poppi D.P., Hughes T.P., L'Huillier P.J., 1987. Intake of pasture by grazing ruminants. In: A.M. Nicol (ed), *Feeding livestock on pasture*. N. Z. Soc. Anim. Prod., Occas. Publ., 10, 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.

Rémond B., Vermorel M., 1982. Influence du climat et de la saison sur la production laitière au pâturage. In : *Actions du climat sur l'animal au pâturage*. INRA Editions, Paris, France, 115-129.

Rook A.J., Dhanoa M.S., Gill M., 1990. Prediction of the voluntary intake of grass silages by beef cattle. 3. Precision of alternative prediction models. *Anim. Prod.*, 50, 455-466.

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.

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.

Smallegange I.M., Brunsting A.M.H., 2002. Food supply and demand, a simulation model of

the functional response of grazing ruminants. *Ecol. Model.*, 149, 179-192.

Stakelum G., Dillon P., 2004. The effect of herbage mass and allowance on herbage intake, diet composition and ingestive behaviour of dairy cows. *Irish J. Agric. Food Res.*, 43, 17-30.

Stockdale C.R., 1985. Influence of some sward characteristics on the consumption of irrigated pastures grazed by lactating dairy cattle. *Grass Forage Sci.*, 40, 31-39.

Stockdale C.R., 2000. Levels of pasture substitution when concentrates are fed to grazing dairy cows in northern Victoria. *Austr. J. Exp. Agric.*, 40, 913-921.

Woodward S.J.R., 1997. Formulae for predicting animals' daily intake of pasture and grazing time from bite weight and composition. *Livest. Prod. Sci.*, 52, 1-10.

Résumé

La diversité des pratiques de gestion des prairies et de complémentation des vaches laitières au pâturage rend très difficile l'estimation de l'ingestion d'herbe par les animaux en fermes. Cet article a pour objectif principal de faire le point sur les modèles simples ou complexes de prévision de l'ingestion des vaches laitières au pâturage. Les modèles les plus complets prennent en compte à la fois les caractéristiques du troupeau, de la prairie pâturée, des conditions de pâturage et des compléments alimentaires apportés au troupeau. Les modèles récents, intégrés dans des outils d'aide à la gestion du pâturage (Pâtur'IN, Sepatou, Grazemore) ou dans des outils d'aide à l'alimentation des vaches au pâturage (GrazFeed, Diet-Check, INRAtion prochainement), sont ici décrits dans leurs principes. Des simulations réalisées à partir des modèles ou des logiciels disponibles permettent également de décrire et de comparer les principales lois de réponse de l'ingestion des vaches aux variations des conditions de pâturage et de complémentation. La précision des différents modèles existants est estimée par une approche statistique globale en comparant l'ingestion observée expérimentalement et celle prévue indépendamment par les modèles à l'échelle troupeau-parcelle (n = 304). L'erreur moyenne de prévision varie de 10 à 25 % selon les modèles, soit de 1,5 à 3,8 kg MS d'herbe ingérée par vache et par jour. Les écarts de précision entre modèles proviennent essentiellement de la façon dont les conditions de pâturage sont prises en compte, notamment pour les situations extrêmes de chargement. Par ailleurs, très peu de modèles permettent de prévoir les performances animales (lait produit, variation de poids) à partir de l'ingestion d'herbe.

Abstract

Modelling of daily herbage intake and milk production by grazing dairy cows

The wide range of grazing and feeding management of grazing dairy cows does not enable a simple and accurate estimate of their herbage intake. The purpose of this review is to describe the main predictive models of herbage intake by grazing dairy cows. The most recently published models take into account the characteristics of the herd, sward, and feeding and grazing conditions, and are included in decision support tools for grazing management (Pâtur'IN, Sepatou, Grazemore) or feeding management at grazing (GrazFeed, Diet-Check, INRAtion soon). The response of herbage intake to grazing conditions and supplementary feeding are simulated from several models. The accuracy of the existing models is studied from a global statistical approach comparing the actual herbage intake of experimental herds (n = 304) with the predicted values. The mean error of prediction ranges from 10 to 25 % according to the model, i.e. from 1.5 to 3.8 kg DM of herbage intake per cow per day. The low accuracy of the predictions is related first to the lack of robustness of the predictions for unusual grazing conditions. Moreover, few models enable to predict cow performance (milk production, body weight change) from the prediction of herbage and nutrient intake.

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.

