



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org



AFPF – Maison Nationale des Eleveurs – 149 rue de Bercy – 75595 Paris Cedex 12

Tel. : +33.(0)1.40.04.52.00 – Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Française pour la Production Fourragère

Le modèle « Moorepark - Saint-Gilles Grass Growth » (MoSt GG) de prévision de croissance de l'herbe en conditions de pâturage

E. Ruelle¹, D. Hennesy¹, L. Delaby²

Dans les régions tempérées, grâce à son faible coût alimentaire, l'herbe pâturée est la solution la plus économique pour l'alimentation des bovins. Cependant sa gestion est complexe du fait de l'incertitude associée à la prévision de sa croissance. Intégré à des outils d'aide à la gestion du pâturage, le modèle de croissance d'herbe présenté ici va permettre d'anticiper et donc faciliter la gestion du pâturage.

RÉSUMÉ

Le modèle de croissance de l'herbe Moorepark Saint-Gilles Grass Growth (MoSt GG) est un modèle dynamique et mécaniste simulant principalement la croissance d'herbe et l'azote prélevé et lessivé. Le modèle est sensible au climat ainsi qu'à la fertilisation azotée et aux événements de défoliation (fauche ou pâturage). Le modèle a été utilisé pour simuler 10 années climatiques sous 4 niveaux de fertilisation azotée en conditions de pâturage. Ses résultats de croissance annuelle et de réponse à la fertilisation sont conformes à la réalité : avec notamment une réponse moyenne à la fertilisation qui diminue avec l'augmentation des apports et une bonne prise en compte des effets de la variabilité climatique. De plus, une relation étroite entre l'azote lessivé et les variables de pluviométrie automnale et du nombre de jours de pâturage annuel a été décrite.

SUMMARY

The Moorepark Saint-Gilles Grass Growth model (MoSt GG) predicts grass growth under grazing conditions

The Moorepark Saint-Gilles Grass Growth (MoSt GG) model is a dynamic and mechanistic model that simulates grass growth, grass nitrogen (N) content, and N leaching. It incorporates information on weather conditions, N fertilisation, and defoliation events (grazing or cutting), and it utilises a daily time step. The model was used to predict what would happen under grazing conditions over 10 weather years and 4 levels of N fertilisation. The model's results for annual growth and response to fertilisation matched previously obtained empirical observations. Notably, the response of the grass decreased as fertiliser level increased. The model did a good job of simulating the effects of climatic variability among years: overall grass growth was low in years with dry summers. Furthermore, the results revealed a relationship among N leaching, the annual number of grazing days, and autumn rainfall.

La croissance d'herbe est saisonnée, sensible aux conditions de milieux et difficile à prédire. En effet, les conditions climatiques, la nature et la fertilité du sol, la fertilisation azotée et la gestion du pâturage (hauteur d'entrée, de sortie ou chargement) vont avoir un effet sur sa croissance (KEANE et COLLINS, 2004 ; LEMAIRE et PFLIMLIN, 2007). De plus, ces effets ne sont pas linéaires et interagissent entre eux dans des relations complexes. Par exemple, la fertilisation azotée permet d'augmenter la quantité et la qualité du fourrage produit (DELABY, 2000 ; WHITEHEAD, 1995) mais sera moins efficace sur un sol déjà très riche en azote organique facilement minéralisable, ou

encore son application durant une période de sécheresse sera moins efficace mais aura des effets retard plus ou moins marqués selon la saison. D'autre part, l'azote appliqué est un intrant coûteux susceptible d'impacts environnementaux conséquents et peut ainsi induire des pertes financières comme des impacts environnementaux négatifs.

La modélisation de systèmes prairiaux n'est pas nouvelle et fait face à de nouveaux défis (KIPLING *et al.*, 2016). De précédents modèles de croissance d'herbe ont été développés pour quantifier les effets de changements de gestion

AUTEURS

1 : Teagasc, Animal & Grassland Research and Innovation Centre, Moorepark, Fermoy, Co. Cork (Irlande) ; elodie.ruelle@teagasc.ie

2 : INRA, AgroCampus Ouest, UMR Physiologie, Environnement, Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage, F-35590 Saint-Gilles (France)

MOTS CLÉS : Azote, croissance végétale, facteur climat, fertilisation, lessivage, modélisation, pâturage, prairie, prévision, sol.

KEY-WORDS : Climatic factor, fertilisation, forecast, grassland, grazing, herbage growth, leaching, modelling, nitrogen, soil.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Ruelle E., Hennesy D., Delaby L. (2018) : «Le modèle « Moorepark - Saint-Gilles Grass Growth » (MoSt GG) de prévision de croissance de l'herbe en conditions de pâturage», *Fourrages*, 236, 255-262.

agricole sur la croissance fourragère annuelle et saisonnière (BARRETT *et al.*, 2004 ; JOUVEN *et al.*, 2006 ; LAZZAROTTO *et al.*, 2009) ou pour prédire l'effet d'un changement climatique sur la croissance d'herbe (THORNLEY et CANNELL, 1997). Dans leur revue bibliographique, VAN OIJEN *et al.* (2108) ont conclu à la nécessité d'une diversité de modèles pour la prédiction de l'impact du changement climatique sur la relation entre production et biodiversité des systèmes herbagers suivant les buts des simulations (long terme, court terme, élaboration de lois).

Dans le passé, trois modèles existants (BRERETON *et al.*, 1996 ; JOHNSON et THORNLEY, 1983 ; JOUVEN *et al.*, 2006) ont été comparés pour simuler la croissance d'herbe en Irlande (HURTADO-URIA *et al.*, 2013), le modèle de JOUVEN *et al.* (2006) a été choisi comme étant le plus approprié. L'objectif de ce papier est la **présentation du modèle Moorepark Saint-Gilles Grass Growth** (MoSt GG, RUELLE *et al.*, 2018c). Ce modèle est **basé sur le modèle de croissance de l'herbe développé par JOUVEN *et al.* (2006)** et adapté par HURTADO-URIA (2013). Les fonctions de croissance potentielle, d'impact climatique et de gestion de la biomasse végétative, reproductive et verte, sont les mêmes que celles du modèle de JOUVEN *et al.* (2006) (*modulo* le changement de certains paramètres, RUELLE *et al.*, 2018c). Cependant, certains sous-modèles ont été affinés ou développés.

Pour mémoire, le modèle proposé par JOUVEN *et al.* (2006) ne prend pas en compte les flux d'azote dans le sol, ce qui en limite sa réactivité. Un sous-modèle complet et original a donc été développé pour prendre en compte le cycle de l'azote et son influence sur la croissance et la qualité de l'herbe. De même, un sous-modèle qui décrit les flux d'eau dans le sol a été développé afin, notamment, de pouvoir simuler les pertes d'azote par lessivage. Un autre sous-modèle d'action a été ajouté au modèle de JOUVEN *et al.* (2006) : l'intégration de la pratique du pâturage et de ses conséquences. Comme indiqué par KIPLING *et al.* (2016), intégrer le pâturage est un défi et une priorité indispensable pour être capable de simuler avec précision les flux de l'azote des prairies.

Le développement du modèle MoSt GG a **deux objectifs principaux**. Le premier est la **simulation de divers scénarii tels**, par exemple, la **modélisation de l'impact du changement climatique sur la production d'herbe ou l'impact de différentes stratégies de fertilisation sur la production d'herbe et l'azote lessivé**. Le second objectif est la possibilité de **prédire la croissance d'herbe à l'échelle de l'exploitation, voire de la parcelle**, dans des fermes commerciales en utilisant les prévisions climatiques.

Dans ce texte, le modèle MoSt GG a été utilisé pour simuler la croissance d'herbe, le nombre de séquences de pâturage, le nombre de jours possibles de pâturage et l'azote lessivé au cours de 10 années climatiques successives (2006- 2015) observées sur le domaine INRA du Pin-au-Haras en Normandie (Orne), selon différentes modalités de fertilisation azotée annuelles (0, 100, 200 ou 300 kg d'azote minéral apporté par ha).

1. Présentation simplifiée du modèle

■ Vue d'ensemble du modèle

Le modèle a été développé en programmation objet en utilisant le langage C++. Il est composé de **deux principaux sous-modèles** :

- sol et azote (qui intègre : pool d'azote minéral et organique, immobilisation, minéralisation, réserve d'eau, lessivage) ;
- herbe (croissance, teneur en azote, sénescence et abscission).

L'interaction entre les flux d'azote et les flux d'eau permettent la croissance et donc les variations de biomasse (figure 1). Le pas de temps retenu est la journée et l'échelle est celle de la parcelle (représentée par sa surface, en ha). La parcelle est représentée comme une grille composée de cellules unitaires indépendantes de 2 m² permettant la simulation de l'hétérogénéité associée aux restitutions des déjections animales.

Chaque jour, la biomasse totale sur la parcelle varie selon la croissance et la sénescence du jour. La biomasse est répartie entre 4 possibilités selon qu'elle est verte ou morte et reproductive ou végétative. Par la suite, ces différentes biomasses sont cumulées pour aboutir à la biomasse totale quotidienne présentée dans ce texte. Comme dans la plupart des modèles, la croissance journalière est calculée principalement en fonction d'une croissance potentielle (fonction du rayonnement et de la biomasse) et de facteurs limitants décomposés entre des événements climatiques (température et rayonnement) et la disponibilité de l'azote minéral et de l'eau. La quantité d'azote disponible dépend de la période de l'année et de l'état du pool d'azote minéral du sol. Cette biomasse créée est ajoutée à la biomasse verte présente. S'ensuit le calcul de la biomasse sénescente (passage de la biomasse verte à la biomasse morte) et de l'abscission

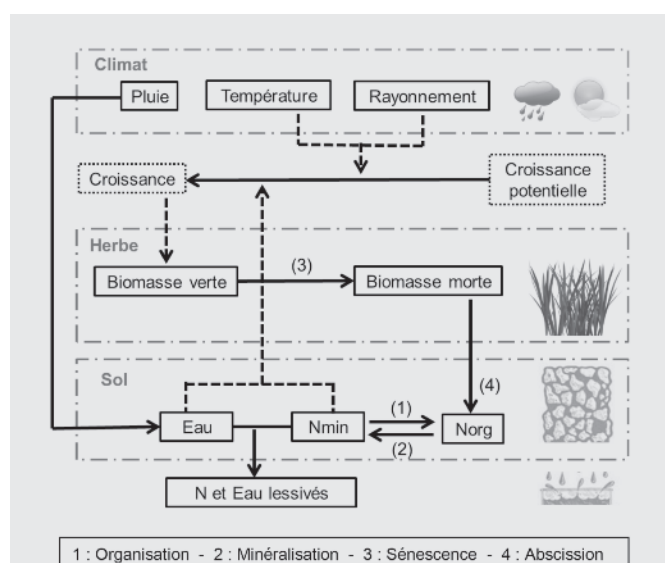


FIGURE 1 : Représentation schématique des principaux composants du modèle MoSt GG.

FIGURE 1 : Schematic representation of the MoSt GG model's main elements.

Entrées				Sorties		
Sol/Parcelle	Climat	Défoliation	Fertilisation	Sol	Herbe	Eau
Unique	Journalier	Pour chaque évènement	Pour chaque évènement	Journalier	Journalier	Journalier
N min (kg/ha)	Température minimale (°C)	Jour ^{1,2,3}	Jour	Pool d'azote minéral (kg N/ha)	Croissance (kg DM/ha)	Eau du sol
MO (%)	Température maximale (°C)	Type :	Type :	Pool d'azote organique (kg N/ha)	Biomasse (kg DM/ha)	Azote lessivé (kg N/ha)
Argile (%)	Température moyenne (°C)	Pâturage/Fauche ^{1,2,3,4,5}	Quantité totale d'azote appliqué (kg N/ha)		Hauteur d'herbe (cm)	
Sable (%)	Pluviométrie (mm)	Hauteur d'entrée (cm) ^{4,5}	Pourcentage d'azote minéral (si fertilisation organique)		% d'azote de l'herbe	
Surface (ha)	Rayonnement (J/cm ²)	Hauteur de sortie ou de fauche (cm) ^{1,2,3,4,5}				
Biomasse initiale (kg DM/ha)		Nombre de vaches ^{1,3,5}				
		Apports de suppléments ^{1,2,3,4,5}				

1 : Jour de la défoliation, durée de l'évènement de pâturage, hauteur de sortie et nombre d'animaux pâturant sont fixés par l'utilisateur → le modèle calcule l'ingestion d'herbe de l'animal (kg MS/animal/jour)
 2 : Jour de la défoliation, durée de l'évènement de pâturage et l'ingestion sont fixés par l'utilisateur → Le modèle calcule le nombre d'animaux pâturant
 3 : Jour de la défoliation, nombre d'animaux pâturant et l'ingestion sont fixés par l'utilisateur → Le modèle calcule la durée de l'évènement de pâturage
 4 : Hauteur d'entrée, durée de l'évènement de pâturage et l'ingestion sont fixées par l'utilisateur → Le modèle trouve le jour du début de l'évènement de défoliation et le nombre d'animaux pâturant
 5 : Hauteur d'entrée, nombre d'animaux pâturant et l'ingestion sont fixés par l'utilisateur → Le modèle trouve le jour du début de l'évènement de défoliation et la durée de l'évènement de pâturage

TABLEAU 1 : Variables d'entrée et de sortie du modèle MoSt GG.

TABLE 1 : MoSt GG model inputs and outputs.

(retour de la biomasse morte sur le sol). Il est considéré qu'une partie de l'azote contenu dans la biomasse absconse rejoint le pool d'azote organique du sol.

Les pools d'azote organique et minéral du sol interagissent quotidiennement sous forme d'immobilisation et de minéralisation. Chaque jour, la pluie (s'il y en a) interagit avec le stock d'eau dans le sol ; l'interaction de l'eau dans le sol et de l'azote minéral disponible dans le pool génère l'azote lessivé. Les évènements de pâturage et de fertilisation vont influencer les pools d'azote minéral et organique de façon uniforme sur la parcelle pour les apports de fertilisants et de façon hétérogène pour les déjections émises au pâturage.

■ Entrées et sorties du modèle

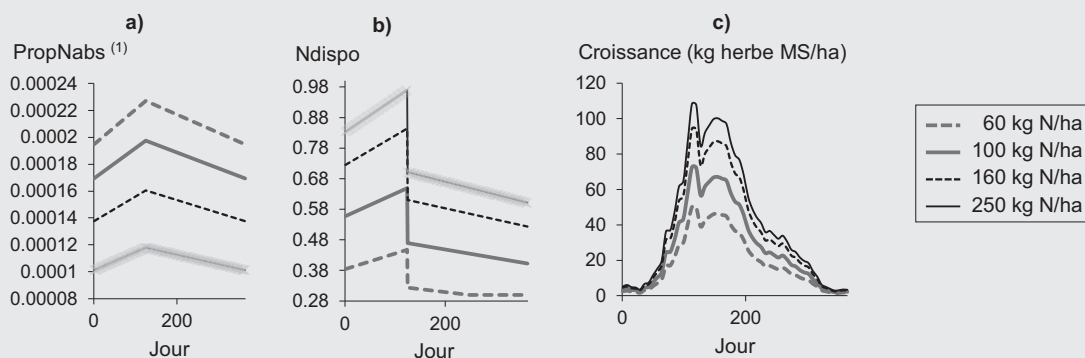
Les variables d'entrée et de sortie sont présentées en détail dans le tableau 1. Les différents types de données

nécessaires en entrée concernent le climat (température, pluie et radiation), la parcelle (type de sol, azote minéral et organique en début de simulation) et les règles de gestion de parcelle (pratiques de fertilisation, de pâturage et fauche).

Les sorties du modèle sont nombreuses et disponibles à différentes échelles : journalières, hebdomadaires ou annuelles, à l'échelle de 2 m² ou à l'échelle de la parcelle. Les principales sorties correspondent à la croissance de l'herbe, la biomasse présente, la teneur en azote de l'herbe, l'azote minéral et organique dans le sol, l'azote lessivé et le nombre de jours de pâturage réalisés.

■ Modèle de croissance et de biomasse

La variable d'entrée qui initie le sous-modèle de croissance est la biomasse au-dessus de 4 cm au 1^{er} jour de simulation. Le modèle simule la production de biomasse



1 : Proportion de N absorbé pour une biomasse de 1 300 kg MS au-dessus de 4 cm

FIGURE 2 : Paramètres influençant la croissance de l'herbe à 4 niveaux d'azote minéral dans le sol a) proportion d'azote absorbé (PropNabs), b) proportion d'azote disponible (Ndispo) et c) croissance de l'herbe (en utilisant la croissance potentielle et les paramètres de modulation climatique moyens des 10 années de simulation).

FIGURE 2 : Parameters affecting grass growth at the 4 N fertilisation levels: a) proportion of N absorbed (PropNabs), b) proportion of N available (Ndispo), and c) grass growth (based on potential growth and the means of the 10-years climate modulation parameters).

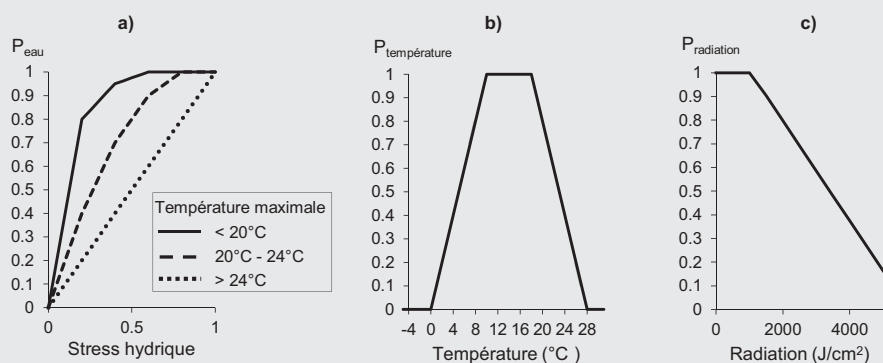


FIGURE 3 : Paramètres de modulation de la croissance représentés par 3 variables environnementales : a) disponibilité en eau, b) température moyenne journalière et c) radiation (adapté de JOUVEN *et al.*, 2006).

FIGURE 3 : Growth modulation parameters represented by 3 environmental variables: a) water availability, b) mean daily temperature, and c) solar radiation (after JOUVEN *et al.*, 2006).

végétative et reproductive ainsi que l'abscission et la sénescence en fonction des conditions climatiques. Le modèle de JOUVEN *et al.* (2006) a été adapté pour prendre en compte la nutrition azotée de la plante et ses effets sur la croissance de l'herbe, grâce à la gestion d'un double pool d'azote, minéral et organique dans le sol. Dans le modèle MoSt GG, **l'impact du pâturage sur les flux d'azote est également représenté**, notamment par l'effet des dépositions d'urine et de fèces aléatoires sur les parcelles. Même si la surface d'impact au sens de zone de dépôts des déjections est réduite, la surface d'influence des patchs d'urines et de fèces a été fixée à 2 m^2 . Pour prendre en compte cet aspect spécifique associé au pâturage, les parcelles sont représentées à l'échelle de 2 m^2 permettant de décrire des flux d'azote minéral et organique différents pour chacun de ces 2 m^2 et ayant pour conséquence une croissance d'herbe (et donc une biomasse) et un azote lessivé différencié par unité de 2 m^2 . L'ensemble est ensuite intégré à l'échelle de la surface de la parcelle au travers de la moyenne des données issues des différentes cellules indépendantes.

La croissance journalière est basée sur une croissance potentielle journalière (figure 2c), sur la disponibilité de l'azote dans le sol (NDispo, figures 2a et b) et sur des facteurs environnementaux (figure 3) :

$$\text{Croissance} = \text{Croissance potentielle} \times \text{NDispo} \times P_{\text{eau}} \times P_{\text{température}} \times P_{\text{radiation}}$$

avec NDispo, un coefficient de multiplication défini par la suite et associé à la disponibilité de l'azote minéral du sol (compris entre 0,3 et 1) et P_{eau} , $P_{\text{température}}$ et $P_{\text{radiation}}$, les paramètres environnementaux compris entre 0 et 1, qui modulent la fonction « Croissance potentielle » et dépendent respectivement de la disponibilité en eau dans le sol, de la température moyenne et des radiations solaires journalières (figure 3).

La croissance potentielle dépend des radiations solaires de la journée et de la biomasse présente au-dessus de 4 cm (JOUVEN *et al.*, 2006).

Croissance potentielle =

$$\frac{0.48 \times \text{radiation}}{100} \times 2.1 \times \left(1 - e^{-0.6 \times \frac{0.033 \times 0.68 \times \text{biomasse verte}}{10}} \right) \times 10$$

La disponibilité de l'azote dans le sol (NDispo) est un coefficient multiplicatif qui définit la part de la croissance potentielle qui peut être atteinte compte tenu de la quantité d'azote minéral disponible pour la plante dans le sol :

$$\text{NDispo} = \frac{\text{PropNabs} \times \text{Nmin}}{\text{Ndemande}}$$

Ce ratio correspond à la proportion (PropNabs) d'azote minéral du sol (Nmin) qui peut être absorbée par la plante (figure 2a) en regard de la demande en azote (Ndemande) de la plante pour produire 1 kg de MS. Ce dernier paramètre correspond à l'inverse de la courbe de dilution de l'azote des graminées (GASTAL et LEMAIRE, 2002 ; LEMAIRE *et al.*, 1984) laquelle traduit l'évolution de la teneur en azote de la biomasse présente lorsque cette dernière augmente sous l'effet de la croissance journalière (GASTAL et LEMAIRE, 2002). La demande de la plante pour produire 1 kg MS (Ndemande) dépend également de la date d'épiaison (donc du jour de l'année) avec une demande plus importante (en avril-mai, figure 2b) pour satisfaire la croissance tissulaire importante avant l'épiaison. Fixée au jour 125 dans ces simulations, la date d'épiaison est un paramètre d'entrée du modèle, donc variable selon les espèces et variétés. La capacité de la plante à prélever de l'azote du sol (PropNabs) dépend du jour de l'année, de la date d'épiaison et du pool d'azote minéral disponible dans le sol (figure 2a). La sénescence et l'abscission de la plante sont également prises en compte selon les équations proposées par JOUVEN *et al.* (2006). Ces calculs permettent la prédiction de la nouvelle biomasse produite dans chacun des quatre composants de la biomasse (vert végétatif, mort végétatif, vert reproductif, mort reproductif ; JOUVEN *et al.*, 2006) et permettent le calcul de la nouvelle teneur en azote de la plante. Enfin, l'hypothèse appliquée dans le modèle MoSt GG est que la teneur en azote de la plante sous 4 cm de hauteur correspond à 50 % du contenu azoté au-dessus de 4 cm (DELAGARDE *et al.*, 2000) et que la teneur de la partie morte de la plante est constante, fixée à $0,008 \text{ g N}/\text{kg MS}$.

■ Le sous-modèle Sol

Le sous-modèle Sol est initialisé par la granulométrie du sol, et notamment la composition en sable et argile, la teneur en matière organique du sol et la quantité d'azote

minéral au début de la simulation. La quantité d'eau contenue dans le sol est initialisée en début d'année au point de saturation.

Le sous-modèle Sol décrit les flux d'azote et d'eau dans le sol. Les processus de minéralisation et d'immobilisation sont quantifiés séparément dans le modèle et dépendent de la quantité d'azote (minéral ou organique) dans le sol, de la température moyenne de la journée, du type de sol et de la quantité d'eau dans le sol. La figure 4 décrit la minéralisation et l'immobilisation journalières en fonction de la quantité d'azote dans le sol pour 3 températures moyennes journalières différentes lorsque la quantité d'eau dans le sol est au point de flétrissement, à la capacité au champ et au point de saturation. Les processus de nitrification et dénitrification sont représentés selon les mêmes hypothèses.

Le sol est caractérisé par la capacité au champ, le point de flétrissement et la saturation. Ces valeurs sont calculées à partir de la composition du sol en termes de sable, d'argile et de quantité d'azote organique. Chaque jour, la quantité d'eau dans le sol est calculée comme la quantité d'eau de la veille à laquelle s'ajoutent les précipitations de la journée et est soustraite l'évaporation. Si la quantité calculée est supérieure à la saturation, l'eau ne peut plus s'infiltrer et 20% du surplus va rester sur la parcelle tandis que les 80% restants vont être considérés comme des écoulements. Si la quantité d'eau est plus faible que le point de flétrissement, la croissance de la plante est nulle. Si la quantité

d'eau est supérieure à la capacité au champ du sol, alors le phénomène de lessivage est enclenché.

■ Gestion et utilisation des prairies

En termes de gestion et valorisation des prairies, le modèle intègre **trois actions différentes : la fertilisation, la fauche et le pâturage**. La fertilisation azotée peut être appliquée sous forme minérale ou organique. La quantité épandue, le type (minéral ou organique) et la date de fertilisation sont à préciser. Au cours d'un apport de fertilisation azotée minérale, aucune perte n'est considérée et l'azote appliqué est ajouté au pool d'azote minéral de chacun des 2 m². En présence de fertilisation organique, selon la composition du fertilisant (teneur en azote minéral), l'azote est réparti entre les stocks minéraux et organiques du sol tandis qu'une partie est volatilisée selon un gradient qui varie avec les pratiques d'épandage.

Les événements de fauche et de pâturage sont gérés en dynamique selon les différentes modalités présentées au tableau 1. Lors d'un événement de pâturage, la quantité d'azote restituée dans les urines et les fèces dépend de l'ingestion (herbe, concentré et fourrage complémentaire) des animaux et de la quantité d'azote contenu dans les différents aliments. **Chaque dépôt d'urine et de fèces est ensuite affecté aléatoirement à une des unités de 2 m² de la parcelle**. Pour chaque pissat, il est considéré que 85% de la quantité d'azote épandue rejoint le stock d'azote minéral des 2 m² correspondants et 15% se volatilise (SCHOLEFIELD *et al.*, 1991). Pour chaque bouse, 75% de son contenu en azote intègre le pool d'azote organique des 2 m² correspondants, 22% rejoint le pool d'azote minéral et 3% se volatilise (SCHOLEFIELD *et al.*, 1991).

■ Utilisation du modèle

Le modèle MoSt GG a été utilisé pour quantifier la croissance d'herbe, le nombre de séquences et de jours de pâturage et l'azote lessivé **au cours de 10 années climatiques successives (2006-2015) observées sur le domaine INRA du Pin-au-Haras en Normandie (Orne) selon différentes modalités de fertilisation azotée** annuelle (0, 100, 200 ou 300 kg N/ha). La pluviométrie moyenne annuelle observée durant ces 10 années a été de 723 mm (± 176). La saison de pâturage a été simulée sur des parcelles d'un hectare avec un troupeau de 18 vaches laitières qui reçoivent 3 kg de concentré par jour en plus de l'herbe pâturée. Les dates de pâturage ont été calées sur la production d'herbe du traitement (100 kg N/ha/an). Pour ce traitement, une séquence de pâturage est enclenchée dès que la hauteur d'entrée souhaitée est atteinte, entre 9 et 12 cm, variable selon les cycles. Le temps de séjour a été calculé par le modèle en considérant une ingestion de 16 kg MS d'herbe par vache et par jour. Les simulations concernant les fertilisations 0, 200 et 300 kg N/ha ont été réalisées avec un troupeau identique et aux mêmes dates d'entrée dans la parcelle. Le temps de séjour sur la parcelle est alors la variable d'ajustement afin d'aboutir dans tous les cas à une valorisation optimale de l'herbe offerte.

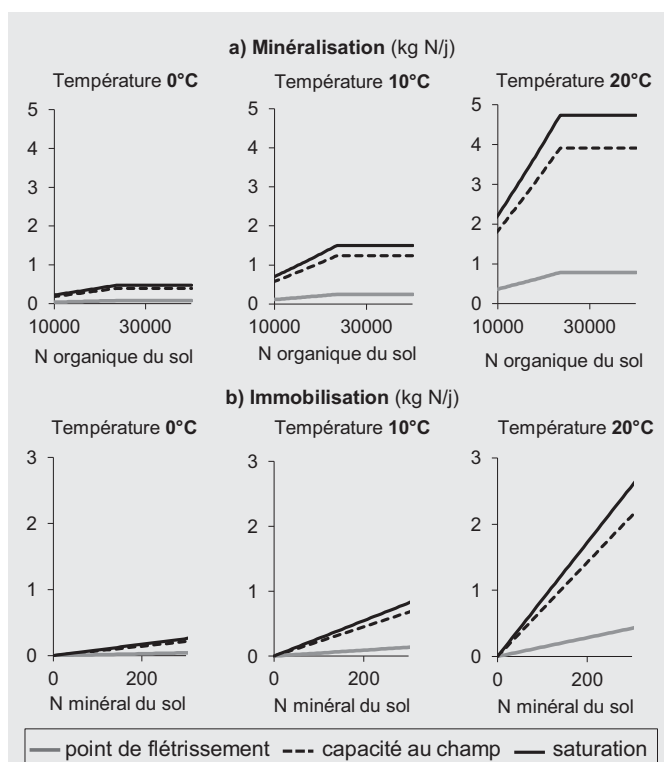


FIGURE 4 : Variation de la minéralisation et de l'immobilisation journalières en fonction de l'azote organique ou minéral du sol, de la température moyenne à différents niveaux d'eau dans le sol.

FIGURE 4 : Variation in daily N mineralisation and immobilisation depending on levels of organic or mineral N in the soil and the mean temperature at different levels of soil water content.

2. Résultats et analyses des simulations

■ Croissance, jours de pâturage et comparaison avec les données réelles

Les résultats sont présentés au tableau 2. La quantité d'azote lessivé décrite correspond à celle observée pendant la période automne-hiver (1^{er} octobre - 31 mars). La pluviométrie cumulée correspondant à cette période est en moyenne sur 10 ans de 409 mm (\pm 85).

La croissance annuelle cumulée des 10 années atteint en moyenne 6,5, 9,2, 11,3 et 12,6 t MS/ha pour les niveaux de fertilisation azotée de 0, 100, 200 et 300 respectivement (tableau 2).

Le premier jour de pâturage dans le modèle a varié entre le 22 mars et le 5 mai, en moyenne le 7 avril. Ces valeurs sont proches des valeurs réelles pour les mêmes années au Pin-au-Haras où la date de sortie a varié entre le 25 mars et le 10 avril. La date de mise à l'herbe légèrement plus tardive en moyenne dans le modèle est probablement associée au fait que, dans les simulations, seul un paddock

est simulé. Les valeurs simulées correspondent en fait plutôt à une date de milieu de 1^{er} cycle. Le nombre de jours de pâturage prédit par le modèle (variation en moyenne de 434 à 850 jours de pâturage/ha/an) est conforme aux données préalablement publiées par DELABY *et al.* (1997) pour les années 1992-1994 avec une variation de 456 à 689 jours de pâturage/ha/an pour une fertilisation de 0 à 320 kg N/ha bien qu'une surestimation semble être présente pour le haut niveau de fertilisation.

Le modèle a été capable de reproduire la forme de la courbe de croissance d'herbe connue (DELAGARDE *et al.*, 2018) (figure 5a). **La variabilité intra-annuelle est bien présente et bien décrite** (figure 5b) avec une croissance cumulée minimale de 4,7 t MS/ha en 2010 et maximale de 13,4 t MS/ha pour l'année 2014 pour le niveau de fertilisation de 100 kg N/ha. Ainsi, le modèle a été capable de s'adapter qualitativement aux différentes années climatiques avec une année 2010 composée d'un été très sec (total annuel des précipitations : 579 mm) donc défavorable à la croissance (VERTÈS et DECAU, 1992) et une année 2014 très humide (précipitations annuelles : 1003 mm) et donc très favorable à la croissance. Les variations intra-annuelles sont importantes, principalement au printemps et en été, en lien avec la présence ou l'absence d'une sécheresse ; les variations sont moins importantes en début ou fin d'année (automne). La relation entre la pluviométrie annuelle totale et la croissance cumulée sur l'année est présentée à la figure 6a. L'augmentation des précipitations annuelles permet comme attendu une augmentation sensible de la croissance d'herbe annuelle. La répartition de la pluie a également une importance bien décrite par le modèle : un été pluvieux et un hiver plutôt sec conduiront à une croissance annuelle plus importante qu'un été sec et un hiver très pluvieux bien que la pluviométrie totale annuelle soit identique.

Conformément à la **loi des rendements décroissants** (ENRIQUEZ-HIDALGO *et al.*, 2016 ; LOISEAU, 1989), la réponse à la fertilisation moyenne sur les 10 ans diminue avec l'augmentation de la quantité d'azote appliqué : elle passe de 28 kg MS/ha, entre les fertilisations 0 et 100, à 13 kg MS/ha, entre 200 et 300 kg N/ha. Ces résultats sont conformes aux résultats expérimentaux précédemment

Fertilisation (kg N/ha/an)	Croissance d'herbe cumulée (t MS/ha/an)	Teneur en azote de l'herbe ¹ (%)	Nb de jours de pâturage (vache/ha/an)	N lessivé ² (kg N/ha)
0	6,5 (3,2-9,8)	2,24 (1,99-2,64)	429 (180-702)	26 (5-50)
100	9,2 (4,7-13,4)	2,78 (2,49-3,18)	622 (288-954)	28 (3-62)
200	11,3 (6,1-16,3)	3,21 (2,89-3,63)	761 (378-1,134)	33 (2-77)
300	12,6 (7,0-18,5)	3,58 (3,23-4,00)	844 (414-1,278)	40 (0-102)

1 : L'azote de l'herbe fournie aux vaches

2 : L'azote lessivé est l'azote perdu entre le 1^{er} octobre et le 31 mars

TABLEAU 2 : Effet du niveau de fertilisation azotée sur les principales variables simulées par le modèle (moyenne des 10 ans, valeurs minimale et maximale).

TABLE 2 : Effect of N fertilisation level on the model's main response variables (mean over 10 years, minimum and maximum values).

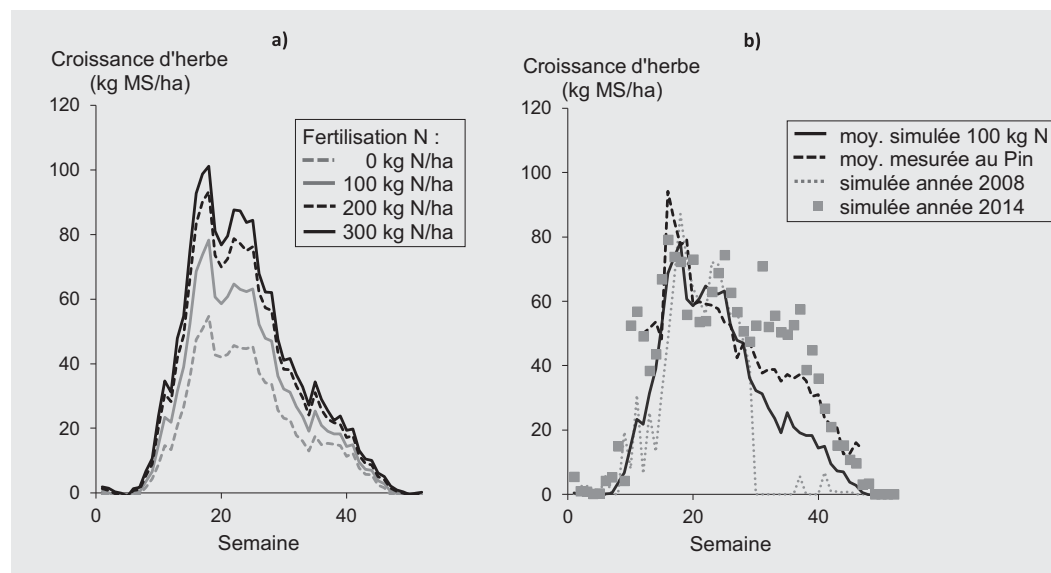


FIGURE 5 : Croissance hebdomadaire a) en fonction du niveau de fertilisation (moyenne des 10 années de simulation) b) comparée aux croissances mesurées au Pin et simulées pour 2008 et 2014, pour une même fertilisation de 100 kg N/ha.

FIGURE 5 : Weekly growth a) as a function of N fertilisation level (means of the 10-years simulation) and b) compared to observed growth at Pin-au-Haras (simulations for 2008 and 2014, fertilisation level : 100 kg N/ha).

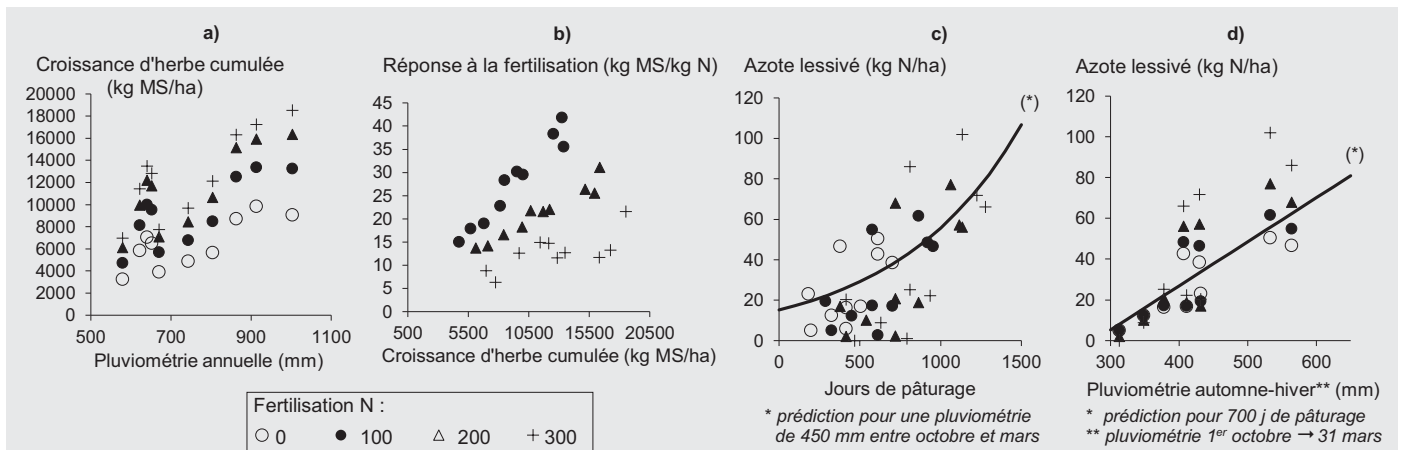


FIGURE 6 : Relations observées entre différentes sorties de la simulation selon le niveau de fertilisation.

FIGURE 6 : Relationships among different model outputs depending on fertilisation level.

publiés (ENRIQUEZ-HIDALGO *et al.*, 2016 ; O'DONOVAN *et al.*, 2004). Une relation positive entre la réponse à la fertilisation par rapport au niveau respectivement inférieur et la croissance d'herbe est décrite sur la figure 6b.

■ Lien entre jours de pâturage, pluviométrie et azote lessivé

L'azote lessivé pendant l'hiver-automne augmente avec les niveaux de fertilisation et varie en moyenne de 32 jusqu'à 54 kg N/ha pour les niveaux de fertilisation 0 et 300 kg N/ha. Ces variations et valeurs moyennes sont similaires aux données publiées par ailleurs (SIMON *et al.*, 1997). Les figures 6c et 6d présentent la relation entre le nombre de jours de pâturage annuel, l'azote lessivé et la pluie pendant l'hiver-automne. L'azote lessivé augmente selon une loi exponentielle croissante avec le nombre de jours de pâturage par an (figure 6c) comme l'ont décrit VERTÈS *et al.* (2008). Dans le même temps, l'azote lessivé augmente selon une loi de réponse similaire avec la pluviométrie en automne-hiver (figure 6d). Les valeurs les plus importantes d'azote lessivé correspondent à une combinaison de pluie importante en automne-hiver et à un important nombre de jours de pâturage réalisés durant l'année. **Une relation, qui combine ces deux facteurs essentiels au lessivage hivernal, a ainsi pu être développée** entre l'azote total lessivé pendant l'automne et l'hiver, la pluviométrie de la même période et le nombre de jour de pâturage total réalisé pendant l'année :

$$\text{Azote lessivé (kg N/ha)} = (1.17 + 0.087 \times (ahP - 289)) \times e^{0.0013 \times JP}$$

avec ahP, la pluviométrie entre le 1^{er} octobre et le 31 mars et JP, le nombre de jours de pâturage réalisés durant l'année (RUELLE *et al.*, 2018d). Cette relation explique ainsi 93% de la variation de l'azote lessivé décrite par le modèle.

■ Utilisation présente et future du modèle MoSt GG

Le modèle MoSt GG peut être utilisé dans sa forme actuelle **par des chercheurs**. Il a ainsi été intégré au modèle

Pasture Based Herd Dynamic Milk (PBHDM) (RUELLE *et al.*, 2015 ; RUELLE *et al.*, 2016) qui est un modèle dynamique représentant la vie d'un troupeau laitier sous différents scénarios de pâturage. L'incorporation du modèle MoSt GG dans le PBHDM permet la simulation d'une croissance d'herbe différenciée pour chaque parcelle de la simulation, répondant ainsi aux différentes règles de gestion appliquées lors des simulations. Une des principales limites du modèle est de ne pas prendre en compte les différentes espèces de graminées ou l'impact de la présence de légumineuse. **Pour permettre une utilisation plus étendue du modèle, par exemple pour des agriculteurs ou conseillers, une interface graphique est en cours de développement.**

Le modèle a déjà été utilisé pour prédire l'impact du changement climatique sur la croissance de l'herbe en Irlande (RUELLE *et al.*, 2018a) ou intégré au modèle PBHDM (RUELLE *et al.*, 2015) afin de déterminer le chargement et la supplémentation en concentré financièrement optimaux pour une exploitation laitière irlandaise (RUELLE *et al.*, 2018b). Il est également utilisé chaque semaine en 2018 **pour prédire la croissance d'herbe de trois fermes irlandaises**. Les prévisions s'étendront à plus de 30 fermes commerciales en 2019. Dans les années à venir le MoSt GG doit être intégré à PastureBase Ireland (PBI, HANRAHAN *et al.*, 2017), un outil d'aide à la gestion du pâturage comprenant plus de 5 000 utilisateurs dont 2 000 actifs (effectuant plus de 30 entrées par an). L'intégration du MoSt GG dans PBI permettra la prévision, pour chaque éleveur utilisateur, de la croissance d'herbe chaque semaine. Dans un futur plus lointain, cela permettra aussi des conseils sur le timing des fertilisations ou sur l'apport ou non de concentré ou ensilage en supplément au pâturage afin de réguler les variations de disponibilités de l'herbe.

Conclusion

Le modèle MoSt GG est un modèle de croissance d'herbe prenant en compte le climat, la fertilisation azotée et la gestion du pâturage. La réponse à la fertilisation et la variation de croissance annuelle sont conformes aux données préalablement publiées et aux données expérimentales.

Le modèle va pouvoir être utilisé à des fins de recherche mais ses sorties peuvent également être utiles directement pour les éleveurs avec la prévision de la croissance d'herbe pour les semaines à venir. Cette prédiction facilitera l'anticipation de la gestion de l'herbe et du pâturage.

Accepté pour publication,
le 17 décembre 2018

Remerciements : Les auteurs souhaitent remercier le financement Research Stimulus Fund 2011 attribué par le Department of Agriculture, Fisheries and Food (Project 11/S/132).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRETT P., LAIDLAW A., MAYNE C. (2004) : «An evaluation of selected perennial ryegrass growth models for development and integration into a pasture management decision support system», *The Journal of Agric. Sci.*, 142 (03), 327-334.
- BRERETON A., DANIELOV S., SCOTT D. (1996) : *Agrometeorology of grass and grasslands for middle latitudes*, Technical Note, 197, Geneva, World Meteorological Organisation.
- DELABY L. (2000) : «Effet de la fertilisation minérale azotée des prairies sur la valeur alimentaire de l'herbe et les performances des vaches laitières au pâturage», *Fourrages*, (164), 421-436.
- DELABY L., DECAU M., PEYRAUD J.L., ACCARIE P. (1997) : «AzoPât: une description quantifiée des flux annuels d'azote en prairie pâturée par les vaches laitières. I. Les flux associés à l'animal», *Fourrages*, 151, 297-311.
- 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 (1-2), 49-68.
- DELAGARDE R., ROBIC Y., LEURENT-COLETTE S., DELABY L. (2018) : «HerbValo - a method for calculating annual pasture utilisation by dairy cows at paddock level», *Sustainable meat and milk production from grasslands, Proc. 27th Gen. Meet. Euro. Grass. Fed.*, 17-21 June, Cork, Ireland, 968-970.
- ENRIQUEZ-HIDALGO D., GILLILAND T., HENNESSY D. (2016) : «Herbage and nitrogen yields, fixation and transfer by white clover to companion grasses in grazed swards under different rates of nitrogen fertilization», *Grass Forage Sci.*, 71, 559-574.
- GASTAL F., LEMAIRE G. (2002) : «N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective», *J. Exp. Bot.*, 53 (370), 789-799.
- HANRAHAN L., GEOGHEGAN A., O'DONOVAN M., GRIFFITH V., RUELLE E., WALLACE M., SHALLOO L. (2017) : «PastureBase Ireland: A grassland decision support system and national database», *Comput. Electron. Agric.*, 136, 193-201.
- HURTADO URIA C. (2013) : *Evaluation, adaptation and validation of a model to predict grass growth in Ireland*, Cork Institute of Technology, Bishopstown.
- HURTADO-URIA C., HENNESSY D., SHALLOO L., SCHULTE R., DELABY L., O'CONNOR D. (2013) : «Evaluation of three grass growth models to predict grass growth in Ireland», *The J. of Agric. Sci.*, 151 (1), 91-104.
- JOHNSON I., THORNLEY J. (1983) : «Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass», *Plant, Cell. Environ.*, 6 (9), 721-729.
- JOUVEN M., CARRERE P., BAUMONT R. (2006) : «Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description», *Grass Forage Sci.*, 61 (2), 112-124.
- KEANE T., COLLINS J. (2004) : *Climate Weather and Irish Agriculture*, AGMET, Dublin, Ireland, 395.
- KIPLING R. P., VIRKAJÄRVI P., BREITSAMETER L., CURNEL Y., DE SWAEF T., GUSTAVSSON A.M., HENNART S., HÖGLIND M., JÄRVENRANTA K., MINET J., NENDEL C., PERSSON T., PICON-COCHARD C., ROLINSKI S., SANDARS D. L., SCOLLAN N. D., SEBEK L., SEDDAU G., TOPP C. F. E., TWARDY S., VAN MIDDELKOOP J., WU L., BELLOCCHI G. (2016) : «Key challenges and priorities for modelling European grasslands under climate change», *Sci. Total Environ.*, 566-567, 851-864.
- LAZZAROTTO P., CALANCA P., FUHRER J. (2009) : «Dynamics of grass-clover mixtures - An analysis of the response to management with the PROductive GRASsland Simulator (PROGRASS)», *Ecol. Model.*, 220 (5), 703-724.
- LEMAIRE G., PFLIMLIN A. (2007) : «Les sécheresses passées et à venir: quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers», *Fourrages*, 190, 163-180.
- LEMAIRE G., SALETTE J., SIGOGNE M., TERRASSON J.P. (1984) : «Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu», *Agronomie*, 4 (5), 423-430.
- LOISEAU P. (1989) : «Modélisation de la réponse à la fertilisation minérale azotée des prairies permanentes. Influence de la fertilité acquise», *Fourrages*, 117, 3-16.
- O'DONOVAN M., DELABY L., STAKELUM G., DILLON P. (2004) : «Effect of Autumn/Spring Nitrogen Application Date and Level on Dry Matter Production and Nitrogen Efficiency in Perennial Ryegrass Swards», *Ir. J. Agri. Food. Res.*, 43 (1), 31-41.
- RUELLE E., SHALLOO L., WALLACE M., DELABY L. (2015) : «Development and evaluation of the pasture-based herd dynamic milk (PBHDM) model for dairy systems», *Eur. J. Agro.*, 71, 106-114.
- RUELLE E., DELABY L., WALLACE M., SHALLOO L. (2016) : «Development and evaluation of the herd dynamic milk model with focus on the individual cow component», *Animal*, 10 (12), 1986-1997.
- RUELLE E., DELABY L., HENNESSY D. (2018a) : «Impact of climate change on grass growth at two sites in Ireland», *Sustainable meat and milk production from grasslands, Proc. 27th Gen. Meet. Europ. Grass. Fed.*, 17-21 June, Cork, Ireland, 538-539.
- RUELLE E., DELABY L., WALLACE M., SHALLOO L. (2018b) : «Using models to establish the financially optimum strategy for Irish dairy farms», *J. Dairy Sci.*, 101 (1), 614-623.
- RUELLE E., HENNESSY D., DELABY L. (2018c) : «Development of the Moorepark St Gilles grass growth model (MoSt GG model): a predictive model for grass growth for pasture based systems», *Eur. J. Agro.*, 99, 80-91.
- RUELLE E., HENNESSY D., DELABY L. (2018d) : «Link between the number of grazing days and the mineral nitrogen fluxes in grazing systems», *Sustainable meat and milk production from grasslands, Proc. 27th Gen. Meet. Europ. Grass. Fed.*, 17-21 June, Cork, Ireland, 670-672.
- SCHOLEFIELD D., LOCKYER D., WHITEHEAD D., TYSON K. (1991) : «A model to predict transformations and losses of nitrogen in UK pastures grazed by beef cattle», *Plant Soil*, 132 (2), 165-177.
- SIMON J., VERTÈS F., M.L. DECAU, LE CORRE L. (1997) : «Les flux d'azote au pâturage. 1- Bilans à l'exploitation et lessivage du nitrate sous prairies», *Fourrages*, 151, 249-262.
- THORNLEY J., CANNELL M. (1997) : «Temperate grassland responses to climate change: an analysis using the Hurley pasture model», *Ann. Bot.*, 80 (2), 205-221.
- VAN OIJEN M., BELLOCCHI G., HÖGLIND M. (2108) : «Effects of Climate Change on Grassland Biodiversity and Productivity: The Need for a Diversity of Models», *Agronomy*, 8 (2), 14.
- VERTÈS F., DECAU M. (1992) : «Suivis d'azote minéral dans les sols : risque de lessivage de nitrate selon le couvert végétal», *Fourrages*, 129, 11-28.
- VERTÈS F., SIMON J.C., LAURENT F., BESNARD A. (2008) : «Prairies et qualité de l'eau. Evaluation des risques de lixiviation d'azote et optimisation des pratiques», *Fourrages*, 192, 423-440.
- WHITEHEAD D.C. (1995) : *Grassland nitrogen*, CAB international.