

ANNEXE 1

Développement d'un modèle multi-agents spatialisé d'un troupeau de ruminants pâturant une prairie hétérogène (Rencontres Recherche Ruminants, 9, 2002, pp.69-72)

R. BAUMONT (1), B. DUMONT (1), P. CARRERE (2), L. PEROCHON (1), C. MAZEL (3), C. FORCE (3), S. PRACHE (1), F. LOUAULT (2), J.F. SOUSSANA (2), D. HILL (3), M. PETIT (1)

(1) INRA, Unité de Recherches sur les Herbivores, Theix, 63122 Saint-Genès Champanelle

(2) INRA, Unité d'Agronomie, 234 av du Brézet, 63039 Clermont-Ferrand cedex

(3) LIMOS – FRE CNRS 2239, ISIMA, Campus des Cézeaux, B.P. 125, 63175 Aubière Cedex

RÉSUMÉ – L'objectif du simulateur que nous présentons est de produire une représentation réaliste de l'utilisation d'une prairie hétérogène par un troupeau et de son évolution afin d'aider à la compréhension des relations animal-plantes dans des prairies complexes et de simuler l'impact de différentes modalités de pâturage. Le simulateur décrit une parcelle hétérogène à des échelles d'espace et de temps larges (jusqu'à 10 ha pendant plusieurs années), et intègre les processus biologiques relatifs au fonctionnement des communautés végétales et au comportement animal à des échelles plus fines (quelques mètres carrés, quelques minutes). Le système a été divisé en trois sous-modèles : la végétation, l'animal et le troupeau. Le sous-modèle « végétation » simule la répartition des communautés végétales sur la parcelle et l'évolution de la végétation au sein de cellules élémentaires de 0.1 m². Le sous-modèle « animal » intègre le fonctionnement interne de l'animal (ingestion, digestion) afin de simuler son comportement alimentaire, ses choix de proximité entre les cellules de végétation situées dans son champ visuel et son activité de défoliation sur ces cellules. Le sous-modèle « troupeau » intègre les interactions sociales entre les animaux et l'utilisation spatiale qu'ils font de la parcelle. Nous avons analysé chacun des sous-modèle et leurs interactions. Des prototypes de chaque sous-modèle ont été développés indépendamment et sont en phase de validation. Nous présentons les premiers résultats obtenus avec ces prototypes simulant la croissance de la végétation, l'ingestion et les choix de proximité des animaux et leur mémoire spatiale. Ceux-ci sont suffisamment satisfaisants pour permettre de passer à l'étape suivante qui consiste à connecter les sous-modèles et à tester le comportement du modèle complet.

Development of a spatial multi-agent model of a herd of ruminants grazing an heterogeneous grassland

R. BAUMONT (1), B. DUMONT (1), P. CARRÈRE (2), L. PÉROCHON (1), C. MAZEL (3), C. FORCE (3), S. PRACHE (1), F. LOUAULT (2), J.F. SOUSSANA (2), D. HILL (3), M. PETIT (1)

(1) INRA, Unité de Recherches sur les Herbivores, Theix, 63122 Saint-Genès Champanelle

SUMMARY – We present a spatial multi-agent model designed to help understanding the evolution of a perennial grassland ecosystem grazed by a herd of ruminants and to simulate the impact of different grazing management practices. This system deals with large and heterogeneous plots and long time scales (ten hectares over several years), and integrates the interactions at smaller scales of heterogeneity in the plant community (cells of 0.1 square meter) and animal behaviour (few minutes). It has been split into three sub-models: the vegetation, the animal and the herd. The vegetation sub-model represents plant community distribution within the plot, and simulates growth and evolution of grass in each cell. The animal sub-model integrates the physiological functions of an animal (ingestion, digestion) and its proximate feeding choices. The herd sub-model integrates social interactions between animals and their spatial utilization of the whole plot. We have analysed each sub-model and their interactions. Initial prototypes have been built independently for each sub-model and are at a validation step. We present the first results for the prototypes simulating vegetation growth, animal intake, proximate choices and spatial memory. They are satisfactory enough to allow starting the following step of this model development that is to connect the three sub-models and to test the behaviour of the whole system.

INTRODUCTION

Dans les écosystèmes prairiaux pâturés par des herbivores domestiques, les relations entre les animaux et la végétation déterminent d'une part la durabilité de la prairie en tant que ressource pour les animaux et d'autre part ses autres fonctions : réservoir de biodiversité, fonction d'habitat, etc. Les relations animal-plantes constituent à tous les niveaux d'échelle considérés des systèmes complexes. La représentation simplifiée dans un modèle de ces relations devrait améliorer la compréhension de leur fonctionnement. L'objectif du simulateur que nous

présentons est de produire une représentation réaliste de l'utilisation d'une parcelle hétérogène par un troupeau et de son évolution. Le simulateur prend en compte une parcelle hétérogène à des échelles d'espace et de temps larges (jusqu'à 10 ha pendant plusieurs années), mais aussi les processus biologiques aux échelles plus fines de la dynamique de végétation et du comportement sélectif des animaux (quelques mètres carrés, quelques minutes). Il nécessite d'agréger des connaissances sur le comportement, la nutrition des herbivores, la croissance et la dynamique de la végétation et sur les interactions herbe-animal à différentes échelles spatiales. Nous présentons ici la structure du simulateur et des éléments de validation de chacun de ses sous-modèles.

1. ANALYSE ET STRUCTURE DU MODELE

Pour représenter les interactions entre animaux, la variabilité de leur comportement et l'évolution spatiale de la végétation, nous avons choisi une approche multi-agent (Coquillard et Hill, 1997). Le simulateur est conçu comme un multi-modèle comportant trois sous-modèles : végétation, animal et troupeau.

1.1. LE SOUS-MODELE DE LA VEGETATION

L'unité de base de la végétation est une cellule hexagonale sur laquelle toutes les fonctions, dont la défoliation, sont appliquées de façon homogène. La taille de la cellule est un paramètre du modèle (actuellement 0.1 m², ce qui correspond environ à la taille d'une station alimentaire chez le mouton) qui peut être modifié selon l'espèce animale considérée. Dans chaque cellule la végétation épigée est décrite par quatre compartiments : gaines et feuilles vertes (végétatif vert), gaines et feuilles sèches (végétatif sec), tiges et épis verts (reproducteur vert), tiges et épis secs (reproducteur sec). Chaque compartiment est décrit par des variables d'état (biomasse et hauteur) et des variables qualitatives (teneur en parois végétales (NDF) et digestibilité du NDF). Les interactions entre les compartiments sont simulées à partir de 6 fonctions qui calculent les flux de biomasses (Carrère *et al*, 2002): une fonction de croissance, une fonction de maturation (développement reproducteur), deux fonctions de sénescence des compartiments végétatifs et reproducteurs respectivement, et deux fonctions de disparition des tissus morts (Figure 1). A l'échelle de la parcelle, la répartition spatiale de la végétation est gérée par un fichier « carte », qui détermine la position des différents faciès de végétation. Chaque faciès est défini par 25 paramètres qui permettent d'initialiser les cellules qui le composent. Des cellules adjacentes appartenant à un même faciès de végétation sont virtuellement regroupées pour définir des sites alimentaires.

1.2. LE SOUS-MODELE DE L'ANIMAL

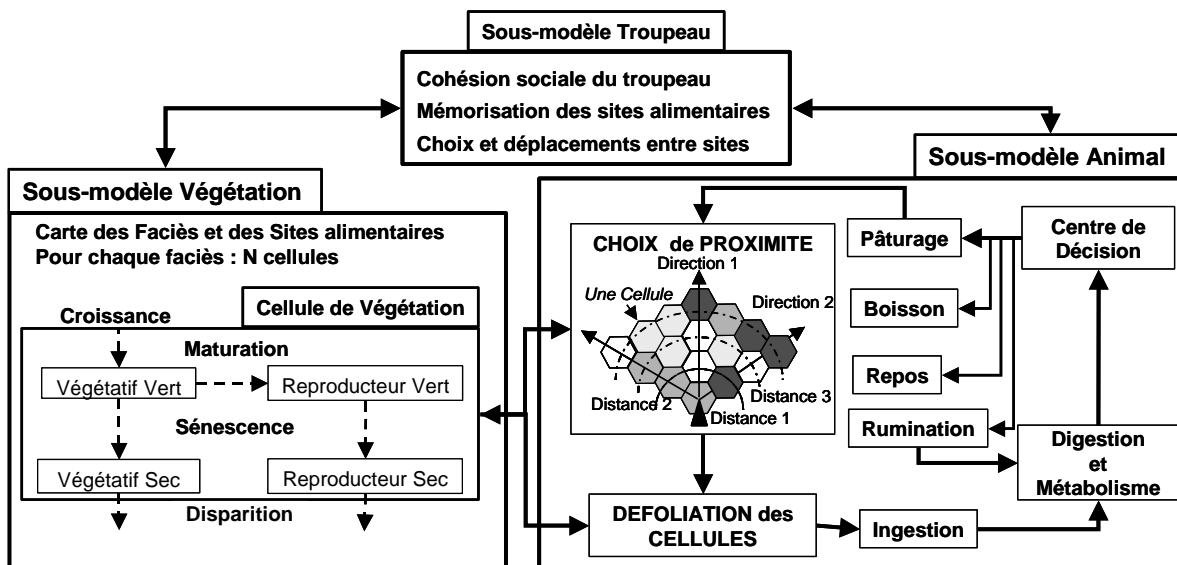
Le sous-modèle animal simule pour chaque animal du troupeau son comportement alimentaire, sous contrôle du fonctionnement interne de l'animal, ses choix entre les cellules de végétation proches, et l'impact qualitatif et quantitatif du prélèvement effectué (Figure 1).

Premièrement, le centre de décision choisit une activité entre ingérer, boire, ruminer et se reposer. L'activité d'ingestion dépend de fonctions de motivation et de rassasiement qui intègrent l'état digestif et énergétique de l'animal selon les règles proposées par Sauvans *et al* (1996). L'activité de boisson dépendra de la quantité ingérée et l'activité de rumination de la fibrosité du contenu digestif.

Deuxièmement, lorsque l'animal ingère, il choisit une cellule parmi les 15 situées dans un rayon de 3 cellules

Figure 1

Représentation simplifiée du simulateur avec les 3 sous-modèles qui le composent et leurs inter-connexions



dans son champ de vision. Ce choix intègre une représentation de la perception par l'animal de l'hétérogénéité de la végétation (Baumont *et al*, 2002). Chaque cellule est caractérisée par un index d'intérêt qui intègre la distance, la direction et la qualité (Figure 1). L'effet de la distance aux cellules est ajusté sur des mesures du nombre de pas effectués par des brebis entre deux stations alimentaires (Roguet *et al*, 1998). L'effet de la direction se base sur une préférence plus forte pour aller tout droit. Plus complexe, l'effet de la qualité de la végétation est modélisé en testant deux approches. La première s'appuie sur des tests de préférences réalisés sur des ovins et des bovins entre des couverts végétatifs et des couverts épiés (Dumont *et al*, 1995). Deux index de préférence, l'un qui dépend de l'abondance en matériel végétatif vert et l'autre du stade de maturité de la cellule sont alors combinés. La seconde approche se base sur la prévision de la vitesse d'ingestion permise par la cellule à partir de sa masse de limbes verts (Prache *et al*, 1998). On fait alors l'hypothèse que les animaux préfèrent les cellules dont la vitesse d'ingestion est la plus élevée.

Troisièmement, une fois le choix de la cellule effectué, le sous-modèle simule, quantitativement et qualitativement, le prélèvement effectué. La quantité prélevée est estimée à partir de la vitesse d'ingestion et du temps passé sur la cellule (Prache *et al*, 1998 ; Roguet *et al*, 1998). Une fonction de répartition du prélèvement entre les quatre compartiments de la cellule, basée sur des comparaisons entre la composition morphologique du couvert et celle de bols prélevés à l'œsophage (Jamieson et Hodgson, 1979), permet d'estimer la contribution respective des quatre compartiments au flux ingéré et de mettre à jour l'état de la cellule après chaque défoliation.

1.3. LE SOUS-MODELE DU TROUPEAU

Le sous-modèle troupeau simule les déplacements des animaux à l'échelle de la parcelle. Il intègre les effets de certains facteurs sociaux et une modélisation de la mémorisation par les animaux de leurs sites alimentaires préférés. Une fonction de cohésion fait qu'un animal ne va pas s'éloigner à plus d'une certaine distance (paramétrée dans le modèle) du troupeau. Pour atteindre un nouveau site alimentaire, un point d'eau ou encore une aire de repos, les animaux utilisent leur mémoire spatiale. Ces sites ou parties de sites intégrés par l'animal sont appelés sites mémoriels. Ils sont caractérisés par une localisation et, pour les sites alimentaires, par une valeur moyenne de qualité. Lorsqu'un animal pâture de manière récurrente des cellules de moindre valeur que celles exploitées au cours des derniers épisodes de pâturage, il éprouve le besoin de changer de site alimentaire et de se diriger vers un site stocké dans sa mémoire. Selon son degré de "leadership", il prend lui-même la décision de changer de site de pâturage ou il attend qu'un animal leader entraîne le troupeau. Il s'en suit un déplacement long vers le site qui présente le rapport valeur/distance le plus élevé, une règle de choix validée expérimentalement sur ovins (Dumont *et al*, 1998) et déjà utilisée dans d'autres modèles spatialisés d'utilisation de la ressource par des herbivores. Chaque animal ne peut stocker dans sa mémoire qu'un nombre limité de sites mémoriels. Lorsque sa mémoire est pleine et qu'il découvre un nouveau site alimentaire de bonne qualité, il oublie un site de moindre qualité parmi ceux qui ont été les moins fréquemment visités (Dumont et Hill, 2001). Lorsqu'un site n'a pas été visité depuis longtemps, l'animal oublie également peu à peu sa qualité nutritionnelle qui converge graduellement vers la qualité moyenne des sites récemment visités sur la parcelle. Pour se rapprocher du comportement de l'animal, il est nécessaire d'agréger dans la mémoire des sites proches et de qualités voisines ou au contraire d'identifier une différenciation qui s'est produite dans un site précédemment

Figure 2
Validation de la simulation de la quantité ingérée selon la qualité du couvert végétal

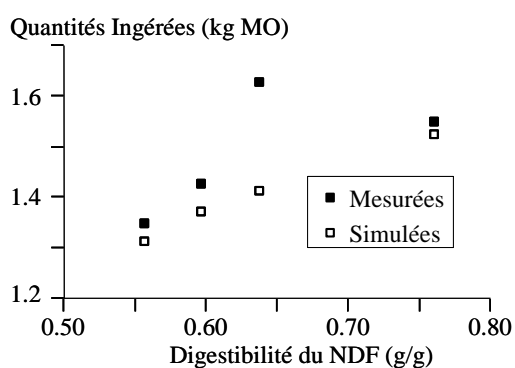
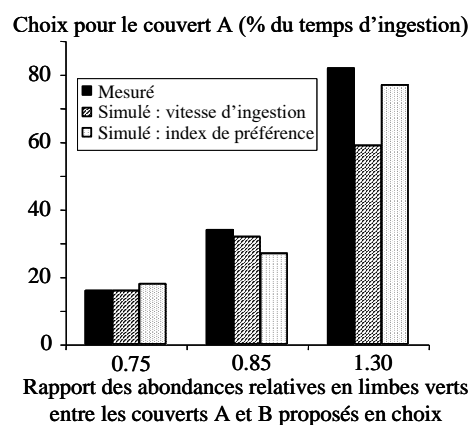


Figure 3
Validation de la simulation des choix de proximité



mémorisé. Pour rendre possible le processus d'agrégation / désagrégation des sites mémoriels nous avons

développé et testé deux méthodes de représentation des sites dans la mémoire : la première consiste à mémoriser pour chaque cellule visitée un ensemble de cellules autour de celle-ci (méthode des contours); la seconde

consiste à utiliser une carte simplifiée et prédéfinie de la parcelle (carte pixélisée) et à associer à chaque cellule pâturée la zone correspondante.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Comme il n'est pas possible de valider le comportement du modèle aux échelles les plus fines (choix de proximité, défoliation) pour la parcelle entière, le découpage en sous-modèles et le développement de prototypes indépendants s'est avéré nécessaire (Fowler et Scott, 1997). Les prototypes sont testés indépendamment, avant d'être connectés. Tous les programmes sont développés en C++ sur une plate-forme Linux.

2.1. LA DYNAMIQUE DE VEGETATION

Le choix de la surface des cellules de la végétation est un compromis entre des contraintes biologiques et de modélisation. Cette taille doit être suffisamment petite pour pouvoir faire l'hypothèse que l'animal ne va y créer d'hétérogénéité spatiale, mais pas trop petite pour pouvoir représenter une parcelle de grande taille avec un nombre cellule gérable par un ordinateur. Le sous-modèle végétation est actuellement opérationnel et vérifié. L'analyse de sensibilité nécessaire à sa validation a été réalisée à partir d'un fichier de paramètres standard, calibrés à partir du suivi de l'évolution d'un dactyle pâturé par des ovins, et complété par des données de la littérature (Carrère *et al*, 2002). Les premières simulations produisent des valeurs cohérentes de biomasse : 2.5 t MS.ha⁻¹ en sortie d'hiver jusqu'à un maximum de 6 t MS.ha⁻¹.

2.2. LES QUANTITES INGEREES PAR L'ANIMAL

Nous avons testé la réponse des quantités ingérées aux principales caractéristiques de la végétation sur un couvert homogène, où toutes les cellules sont identiques. Lorsqu'on simule des stades de végétation en faisant varier la teneur en NDF du couvert, sa digestibilité et sa composition morphologique, le modèle prévoit une quantité ingérée de 1.85 kg de MS pour un couvert abondant au stade feuillu pâturé par une brebis à l'entretien de 60 kg et de 1.34 kg de MS au stade floraison. Les quantités ingérées prévues par le modèle sont cohérentes avec les mesures effectuées sur un couvert de dactyle exploité d'avril à septembre par des brebis (Garcia *et al*, 2002 ; Figure 2). Le modèle de contrôle de l'ingestion développé par Sauvant *et al* (1996) peut donc être adapté à une situation de pâturage.

2.3. LES CHOIX DE PROXIMITE

Nous avons comparé les simulations du modèle aux résultats de tests de 30 minutes dans lesquels des brebis ont eu le choix entre deux couverts pâturés à des fréquences et intensités de pâturage contrastées, caractérisés par différentes abondances relatives en limbes verts dans le matériel végétatif (Garcia *et al*, non publié). Les choix prévus par le modèle, à partir des estimations de la vitesse d'ingestion permise par le couvert ou bien à partir des index de préférences, sont cohérents avec le comportement des animaux qui préfèrent les couverts présentant la plus forte abondance en limbes dans le matériel végétatif (Figure 3). De nouveaux tests de validation sont prévus, en particulier pour considérer des durées plus longues d'exploitation des couverts.

Figure 4

Sites mémoriels générés à partir d'un même couvert végétal (A) par la méthode des contours (B) et celle de la carte pixélisée (C)



Les grisés représentent des sites alimentaires de différentes qualités

2.4. LA MEMOIRE SPATIALE

Les deux méthodes de création des sites mémoriels (contours et carte pixélisée) donnent des résultats visuels comparables sur une parcelle de petite taille comportant de nombreux sites végétaux. Dans les deux cas la carte des sites mémoriels, i.e. la représentation qu'un animal a de la "géographie" du couvert, converge vers la carte des sites alimentaires présents dans la parcelle (Figure 4). Le choix définitif de la méthode dépendra de sa rapidité, de sa facilité de maintenance et de sa fidélité avec la carte de la parcelle, lorsque les deux méthodes auront été testées sur différents types de couverts.

CONCLUSION

En l'état, les sous-modèles de la végétation et de l'animal peuvent être couplés pour démarrer la validation de l'interaction herbe-animal. Cela nécessitera de paramétrer plusieurs fichiers facies pour tester le comportement animal dans différentes situations et en prévoir les conséquences sur la dynamique de la végétation. L'étape suivante consistera à compléter le sous-modèle troupeau par la prise en compte de la cohésion sociale et des activités de leadership. Nous pourrions alors aborder la validation du simulateur complet par rapport à des observations à l'échelle du troupeau. Le simulateur sera alors utilisé comme outil de recherche pour tester l'effet de différentes règles de comportement des animaux et de la conduite du troupeau. L'objectif final est de produire un outil de simulation permettant de visualiser l'impact de différentes modalités de gestion extensives des prairies. Celui-ci pourra servir de plate-forme de discussion entre chercheurs et gestionnaires.

Ce travail a été soutenu par l'AIP Pâturage et le FNADT. F. Guerry, L. Masson D. Crepelet, F. David et G. Martin ont participé au développement des prototypes.

- Baumont, R., Dumont, B. Carrère, P. Pérochon, L., Mazel, C. 2002.** In DURAND J.L., EMILE J.C, HUYGHE Ch., LEMAIRE G. (Eds.), Multi-Function Grasslands. AFPF, Versailles, 236-237.
- Carrère, P., Force, C., Soussana, J.F., Louault, F., Dumont, B., Baumont, R. 2002.** In DURAND J.L., EMILE J.C, HUYGHE Ch., LEMAIRE G. (Eds.), Multi-Function Grasslands. AFPF, Versailles, 282-283.
- Coquillard, P., Hill, D.R.C. 1997.** Modélisation et Simulation des Ecosystèmes, Paris, Masson, 273p.
- Dumont, B., Petit, M., Lassalas, J., Tournadre, H. 1995.** Renc. Rech. Ruminants, 2, 83-88.
- Dumont, B., Dutronc, A., Petit, M. 1998.** J. Anim. Sci., 76, 965-971.
- Dumont, B., Hill, D.R.C. 2001.** Ecol. Model., 141, 201-215
- Fowler, M., Scott, K. 1997.** UML Distilled, Reading Massachusetts, Addison-Wesley, 183p.
- Garcia, F., Carrère, P., Soussana, J.F., Baumont R. 2002.** J. Agric. Sci. (Camb), soumis.
- Jamieson, W.S., Hodgson, J. 1979.** Grass and Forage Sci., 34, 273-282
- Prache, S., Roguet, C., Petit, M. 1998.** Appl. Anim. Behav. Sci., 57, 91-108.
- Roguet, C., Prache, S., Petit, M. 1998.** Appl. Anim. Behav. Sci., 56, 187-201.
- Sauvant, D., Baumont, R., Faverdin, F. 1996.** J. Anim. Sci., 74, 2785-2802

ANNEXE 2

Equations du module animal

(d'après l'adaptation par Baumont du modèle d'ingestion de Sauvant et al., 1996)

Choix d'activité de l'animal

A chaque séquence, c'est-à-dire toutes les 20 min, l'animal réalise un choix d'activité qui est fonction de l'état des paramètres digestifs et métaboliques.

L'animal choisit de manger si le **seuil de décision pour manger** est positif, ce seuil étant randomisé et dépendant de la fonction de la satiété de l'animal (**FSAT**) et de la motivation à ingérer (**FMI**) selon les relations suivantes :

$$\text{Seuil de décision pour manger} = \text{RANDOM} (0.8*(\text{FMI} - \text{FSAT}), 1.2*(\text{FMI} - \text{FSAT})) + 0.5$$

$$\text{FMI} = \text{EC} * \text{DN}$$

$$\text{EC} = \max (\text{MER}*(\text{LW}^{0.75})/(\text{MER}*(\text{LW}^{0.75})+\text{EBC}) , 1)$$

DN = fonction (t) comprise entre 0 et 1, module la motivation selon l'effet jour/nuit

EBC = bilan énergétique cumulé de la veille

MER = besoins énergétiques par unité de poids métabolique

$$\text{FSAT} = \text{RLS} * \exp(.1 * \text{EB}/\text{IER})$$

RLS = signal d'encombrement du rumen (= f(LW, volume du rumen))

EB = bilan énergétique instantané

IER = besoin instantané

Si l'animal ne mange pas, il peut choisir de ruminer et dans ce cas on définit une **probabilité de ruminer** fonction du taux de grandes particules dans le rumen (**PLPR**). Le simulateur tire aléatoirement une valeur entre 0 et 1 ; si la probabilité de ruminer est supérieure à cette valeur, l'animal rumine durant la séquence.

$$\text{Probabilité de ruminer} = 0.75/[1 + (0.15/\text{PLPR})^2]$$

Si l'animal ne mange pas et ne rumine pas, il se repose durant la séquence.

Choix de cellules de végétation

L'animal qui a choisi de manger va être confronté à une deuxième catégorie de choix, portant sur les cellules de végétation à défolier. L'animal choisit parmi les 15 cellules présentes dans son champ de vision, dans un rayon de 3 cellules ; ces cellules sont affectées de **probabilités de choix** en fonction de leur position (on fait l'hypothèse que l'animal préfère les cellules proches et en face de lui) et de leur qualité.

La qualité perçue par l'animal est définie selon deux **modèles de choix** ; le même modèle de choix est utilisé tout au long de la simulation. Le modèle de choix « Vitesse d'ingestion » définit la qualité perçue en fonction de la vitesse d'ingestion permise par la cellule : plus la vitesse est grande, plus la probabilité de choix sera importante. Le modèle de choix « Stade x Abondance VV » définit la qualité perçue comme une fonction du stade et de l'abondance en matériel vert du couvert.

L'animal effectue ensuite un tirage aléatoire parmi les **S** « meilleures cellules » (de plus forte probabilité de choix) de son champ de vision affectées des probabilités de choix. S définit le niveau de sélectivité de l'animal ; quand S augmente, la sélectivité diminue.

Défoliation d'une cellule de végétation

L'animal défolie la cellule choisie durant un temps TempsCell fonction de l'abondance en limbes verts (MLV) de la cellule, et en prélève une quantité Qlcell (g MS) modulée par son état de satiété :

$$\text{TempsCell (min)} = (6.8 + 4.3 * \text{MLV}) / 60$$

$$\text{QlCell} = \text{TempsCell} * \text{VIPermiseCell} / \text{FSAT}$$

VIPermiseCell = f(MLV, stade du couvert)

Le prélèvement de l'animal est réparti dans les quatre compartiments végétaux en fonction de leur abondance dans le couvert, mais en privilégiant le compartiment VV :

$$\text{Qlvv} = \text{Qlcell} * (1 + ((0.38 / (\text{VV}/\text{BM}))^5)^{-0.5})$$

IF $[(1 + ((0.38 / (\text{VV}/\text{BM}))^5)^{-0.5}) + (\text{RV}/\text{BM})] < 1$ THEN

$$\text{Qlrv} = \text{Qlcell} * \text{RV}/\text{BM}$$

$$\text{Qlvs} = [\text{Qlcell} - \text{Qlvv} - \text{Qlrv}] * \text{VS}/(\text{VS} + \text{RS})$$

$$\text{Qlrs} = [\text{Qlcell} - \text{Qlvv} - \text{Qlrv}] * \text{RS}/(\text{VS} + \text{RS})$$

ELSE

$$\text{Qlrv} = \text{Qlcell} - \text{Qlvv}$$

$$\text{Qlvs} = 0$$

$$\text{Qlrs} = 0$$

La qualité de l'ingéré est calculée en réalisant la moyenne de la qualité des compartiments végétaux pondérés par leur proportion dans l'ingéré.

Fonctions métaboliques et digestives

Le rumen contient des grandes et des petites particules, qui sont réparties en contenus cellulaires, parois digestibles et matières indigestibles, ces dernières étant calculées par différence. Les activités d'ingestion et de rumination sont à l'origine de flux entrants et/ou sortants dans ces compartiments. Le résultat de la digestion microbienne est la production d'acides gras volatils (VFA) qui sont l'énergie utilisée par l'animal.

ANNEXE 3

Critères d'appréciation de l'ajustement des sorties du simulateur
aux données expérimentales (d'après Janssen et Heuberger, 1995)

Comparaison des valeurs moyennes : <i>L'ajustement est mesuré de manière approximative, sans tenir compte de la variabilité</i>		
Erreur moyenne	AE	$\bar{A} - \bar{O}$
Erreur moyenne normalisée	NAE	$(\bar{A} - \bar{O}) / \bar{O}$
Biais moyen fractionnel	FB	$(\bar{A} - \bar{O}) / 0.5 (\bar{A} + \bar{O})$
Biais moyen relatif	rB	$(\bar{A} - \bar{O}) / S_o$
Comparaison des distributions : <i>A n'utiliser que si les données peuvent être considérées comme des échantillons aléatoires d'une distribution représentative de leur variabilité</i>		
Variance fractionnelle	FV	$(S_A^2 - S_O^2) / 0.5(S_A^2 + S_O^2)$
Ratio de variance	VR	S_A^2 / S_O^2
Kolmogorov-Smirnov	KS	$\text{Max}_i ((A_i - \bar{O}) - (O_i - \bar{O}))$
Comparaison des valeurs prises 2 à 2 : <i>Comparaison au niveau individuel, qui tente d'exprimer la variabilité entre A_i et O_i</i>		
« Root Mean Square Error »	RMSE	$(\sum(A_i - O_i)^2 / N)^{0.5}$
RMSE normalisé	NRMSE	RMSE / \bar{O}
Indice d'agrément	IoA	$1 - [\sum(A_i - O_i)^2 / \sum(A_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2]$
<i>IoA peut être trompeur, car il indique 0=aucun agrément si A_i et O_i ont des signes différents.</i>		
Indice alternatif d'agrément	AloA	$1 - [\sum A_i - O_i / \sum(A_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})]$
Erreur absolue moyenne	MAE	$\sum A_i - O_i / N$
NMAE Normalisée	NMAE	MAE / \bar{O}
Erreur absolue maximale	Max AE	$\text{Max}_i (A_i - O_i)$
<i>Max AE est très sensible à la présence de points aberrants (« outliers »)</i>		
Erreur absolue médiane	Med AE	$\text{Med} (A_i - O_i)$
Quartile sup de l'erreur absolue	Sup AE	$4^\circ \text{quartile} (A_i - O_i)$
Autres mesures		
Taux de dispersion	RS	$\sum (O_i - \bar{O})^2 / \sum (A_i - \bar{O})^2$
<i>Représente la fraction de la dispersion observée due au modèle</i>		
Paramètres de régression	α, β, R^2	$O_i = \alpha + \beta A_i + \epsilon_i$
<i>Les paramètres de régression sont à interpréter avec prudence s'il existe une grande variabilité dans les résultats. Sinon, l'adéquation est d'autant meilleure que α, β et R^2 tendent respectivement vers 0, 1 et 1.</i>		

Avec $i=1 \dots N$, A_i et O_i les valeurs prédites et observées pour i ,
 \bar{A} et \bar{O} leurs moyennes, S_A et S_O leurs variances.

ANNEXE 4

Données de végétation « standard » construites à partir des données bibliographiques

COUVERT Végétatif « standard » (couvert type de mi-avril)

	VV	VS	RV	RS	Moyenne
Biomasse	180	130			310
NDF	550	650			590
DNDF	0.80	0.50			0.674

Vitesse d'ingestion permise = 5.535

Coeff. Stade = 1 / Coeff. Abondance VV = 0.9914

COUVERT Epié « standard » (couvert type de début juillet)

	VV	VS	RV	RS	Moyenne
Biomasse	320	255	195	65	835
NDF	600	700	700	800	670
DNDF	0.70	0.45	0.50	0.45	0.557

Vitesse d'ingestion permise = 4.616

Coeff. Stade = 0.3678 / Coeff. Abondance VV = 0.9886