

Développement d'un modèle multi-agents spatialisé d'un troupeau de ruminants pâturant une prairie hétérogène

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

(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

RESUME – L'objectif du simulateur que nous présentons est de produire une représentation réaliste de l'utilisation d'une prairie permanente 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). Pour représenter les interactions entre animaux, la variabilité de leur comportement et l'utilisation spatiale d'une végétation hétérogène, nous avons choisi une approche multi-agents spatialisée. Le système a été divisé en trois sous-modèles : la végétation, l'animal et l'utilisation spatiale de la parcelle. Le sous-modèle « végétation » simule la répartition des communautés végétales dans la prairie 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 « spatial » simule les déplacements des animaux à l'échelle de la parcelle. Pour cela, il intègre une modélisation de la manière dont chaque animal se représente la parcelle et les facteurs sociaux (cohésion, leadership) qui influencent son utilisation spatiale. Nous avons analysé chacun des sous-modèles 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). To represent the interactions between animals, the variability of their behaviour and the spatial utilisation of an heterogeneous grassland a spatial multi-agent approach has been chosen. The system is split into three sub-models: the vegetation, the animal and the spatial utilisation of the plot. 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 spatial sub-model simulates the spatial utilization of the whole plot by the animals. Therefore it integrates a representation for each animal of its spatial memory of the plot, and the social interactions between animals (attraction, leadership) that influence their spatial utilisation of the 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 un écosystème prairial pâturé 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 la dynamique du couvert végétal, qui influencera la diversité du milieu. A tous les niveaux d'échelle considérés l'écosystème pâturé constitue un système complexe. La représentation simplifiée dans un modèle des relations entre un troupeau et le couvert qu'il pâture devrait améliorer la compréhension de leur fonctionnement. L'objectif du simulateur est de produire une représentation réaliste de l'utilisation d'une prairie permanente hétérogène par un troupeau et de son évolution. Le simulateur prend en compte une parcelle, en tant qu'unité de gestion, 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. 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'utilisation spatiale d'une végétation hétérogène, nous avons choisi une approche multi-agents spatialisée (Coquillard et Hill, 1997). Le simulateur est conçu comme un multi-modèle comportant trois sous-modèles : végétation, animal et utilisation spatiale (Figure 1).

1.1. LE SOUS-MODÈLE DE LA VÉGÉTATION

Il simule le fonctionnement d'un couvert prairial pluri-spécifique, défini par des communautés végétales appelées faciès. Chaque faciès est défini par 25 paramètres qui spécifient entre autres, le seuil de démarrage de la végétation, sa précocité d'épiaison, sa digestibilité ou la vitesse d'abscission des tissus morts. 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 actuellement paramétrée à 0,1 m², ce qui correspond à la taille d'une station alimentaire chez le mouton. 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, un fichier « carte » gère la répartition spatiale de la végétation. Chaque cellule est associée à un faciès qui renseigne les valeurs de ses paramètres et les cellules adjacentes d'un même faciès sont virtuellement regroupées pour définir des sites alimentaires.

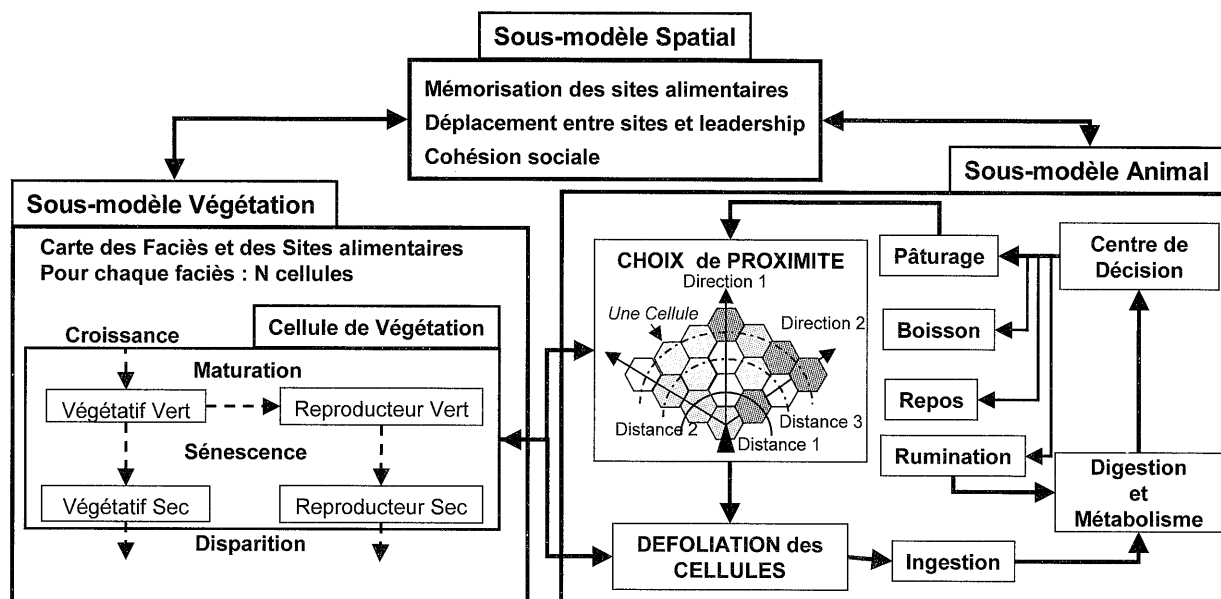
1.2. LE SOUS-MODÈLE DE L'ANIMAL

Il 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 Sauvant *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 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

Figure 1
Représentation simplifiée du simulateur avec les 3 sous-modèles qui le composent et leurs inter-connexions



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-MODÈLE DE L'UTILISATION SPATIALE

Il simule les déplacements des animaux à l'échelle de la parcelle. Pour cela, il intègre une modélisation de la manière dont chaque animal se représente la parcelle et les facteurs sociaux (cohésion, leadership) qui influencent son utilisation spatiale. La 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). 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 plusieurs jours, l'animal oublie 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 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 pâturée 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.

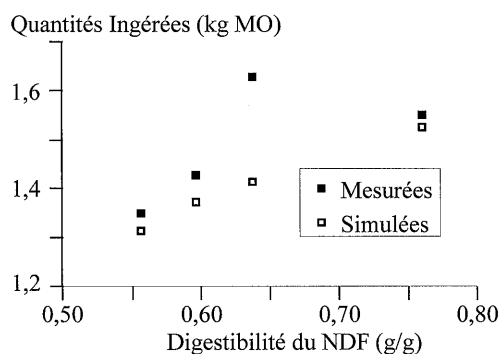
2.1. LA DYNAMIQUE DE VÉGÉTATION

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 pâture 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. A l'avenir, des règles d'évolution des paramètres des faciès en fonction de leur utilisation par les animaux seront introduites dans le modèle. Il s'agira de rendre compte de la dynamique de végétation différente entre des zones bien pâturées et des zones faiblement exploitées.

2.2. LES QUANTITÉS INGÉRÉES 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 ingestion de 1,85 kg de MS pour un couvert abondant au stade feuillu pâture 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 également comparables à celles mesurées sur un couvert de dactyle exploité entre avril et 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.

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



2.3. LES CHOIX DE PROXIMITÉ

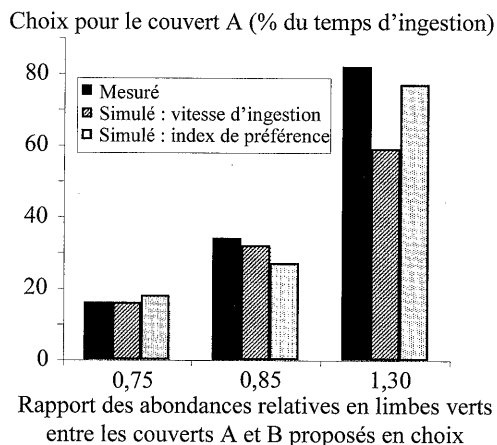
Nous avons comparé les simulations du modèle aux résultats de tests de 30 minutes dans lesquels des brebis ont eu le choix entre deux couverts pâturés selon différentes fréquences et intensités de pâturage, résultant en des abondances contrastées en limbes verts dans le matériel végétatif (Garcia *et al.*, non publié). Les choix prévus par le modèle 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.

2.4. LA MÉMOIRE 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 d'un animal ayant exploré en totalité la parcelle 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.

Figure 3
Validation de la simulation des choix de proximité



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 spatial par la prise en compte des facteurs sociaux. Le simulateur sera alors utilisé comme outil de

recherche pour tester i) l'effet des caractéristiques comportementales (sélectivité alimentaire, aptitude à se séparer du groupe, capacité mémorielle, etc.) et physiologiques des animaux, et ii) les modalités d'exploitation de la parcelle (rythme et durée des passages, taille et forme de la parcelle, utilisation des pôles d'attraction comme les points d'eau, etc.). A plus long terme, ce simulateur pourra servir dans la construction d'un outil d'aide à la décision pour la gestion de surfaces herbacées hétérogènes.

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., Loua ult, 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.

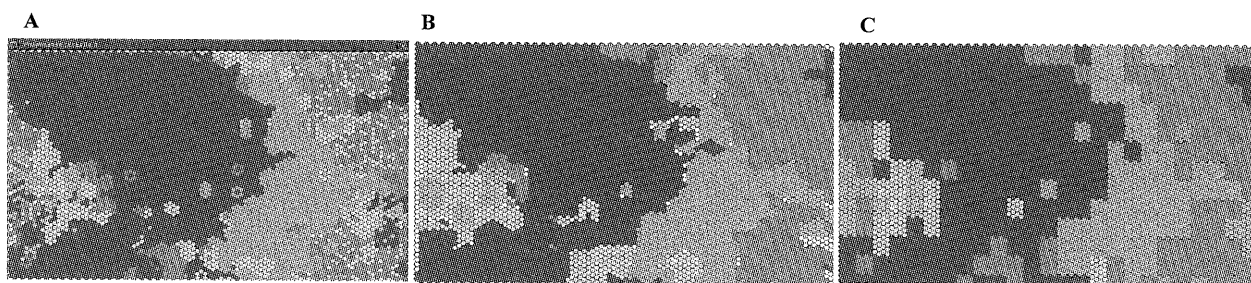
Garcia, F., Carrère, P., Soussana, J.F., Baumont R. 2002. J. Agric. Sci. (Camb), soumis.

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

Figure 4
Sites mémoriels générés à partir d'un même couvert végétal (A) par la méthode des contours (B) et celle de la carte pixelisée (C) pour un animal ayant exploré tout le couvert



Les grisés représentent des sites alimentaires de différentes qualités