

Modélisation de l'entretien du paysage par des herbivores en moyenne montagne : une approche multi-agents

David Hill, Sébastien Mechoud, André Campos, P. Coquillard, J. Gueugnot, Dominique Orth, Yves Michelin, Christophe Poix, Gérard L'Homme, Pascal Carrère, Michel Lafarge, Pierre Loiseau, Didier Micol, Jean-Paul Brun, Francis Decuq, Bertrand Dumont, Michel Petit, Martine Teuma

Les types d'espaces envisagés dans le cadre de cet article sont des zones de moyenne altitude, à dynamique végétale de reconquête forestière rapide. Un cas particulier sera traité : le site de Ternant dans le Puy de Dôme. La gestion de ces espaces constitue un enjeu paysager et écologique majeur pour les années à venir. Or, on assiste de plus en plus à un délaissement marqué des pâturages d'altitude de moyenne montagne par l'agriculture et l'élevage. Les éleveurs privilégient aujourd'hui des systèmes plus aisés à contrôler s'appuyant sur des terres plus faciles à exploiter au détriment des systèmes fourragers utilisant les prairies d'altitude. Dans ces parcelles, l'abandon de l'utilisation des ressources herbagères pour le pâturage d'herbivores est à l'origine d'un appauvrissement de la diversité écologique. La végétation est progressivement envahie par des espèces ligneuses et indésirables (genêts, callune, ronces, etc.). Ces types de végétation sont de plus de faible qualité fourragère et sont souvent plus pauvres sur le plan écologique que les pelouses d'altitude. L'installation progressive de ces landes hautes rend les parcelles difficiles à pénétrer et très sensibles au feu. L'état final d'enforestation conduit à la fermeture du milieu et à une diminution de la biodiversité. A terme, cette évolution se traduit par le déplacement des activités humaines hors de ces zones et par un déséquilibre au niveau du territoire national.

La gestion de la végétation et des paysages par les herbivores, et leur impact sur l'entretien des milieux ont déjà été étudiés pour certains milieux (pâturages d'altitude non colonisés par les ligneux hauts, landes pures). La complexité de ces systèmes écologiques est telle qu'elle nécessite une approche pluridisciplinaire. Le projet de recherche que nous présentons doit permettre :

- de construire un modèle de connaissance de l'environnement étudié grâce aux données issues d'expérimentations pluridisciplinaires,
- de mettre en œuvre un programme de simulation de l'entretien du paysage qui se déduit du modèle de connaissance précédent, afin que d'éventuelles prévisions puissent servir à l'optimisation de l'utilisation des ressources naturelles,
- de visualiser de manière très réaliste les résultats de simulation obtenus afin d'en observer les impacts sur le paysage.

Un programme de recherche pluridisciplinaire a donc été mis en place dès 1994 pour élaborer de nouveaux modes de gestion qui concilient production et entretien de l'espace en condition de sous chargement (peu d'animaux par hectare de surface). En confrontant les observations sur les dynamiques végétales à l'analyse du mouvement des animaux et de leur comportement dans les différents types de végétation, on espère mieux

*D. Hill, S. Mechoud,
A. Campos :
ISIMA
Campus des Cézeaux,
B.P 125,
63173 Aubière cedex*

*P. Coquillard,
J. Gueugnot :
LEVC
Université d'Auvergne,
B.P 38,
63001 Clermont-Ferrand
cedex*

*D. Orth, Y. Michelin,
Ch. Poix,
G. L'Homme :
ENITA
Clermont-Ferrand,
63370 Lempdes*

*P. Carrère,
M. Lafarge,
P. Loiseau :
INRA
Unité d'Agronomie,
234 Av. du Brézat,
63039 Clermont-Ferrand
cedex*

*D. Micol, J.P. Brun,
F. Decuq, B. Dumont,
M. Petit :
INRA,
Centre de Theix,
63122 St-Genès-
Champanelle*

*M. Teuma :
Parc Naturel Régional
des Volcans d'Auvergne
63970 Aydat*

comprendre les interactions herbe – animal à différentes échelles, de la touffe d'herbe à l'assemblage des faciès, afin de pouvoir produire des modèles de simulation de ces évolutions. C'est dans cet objectif qu'un Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) s'est formé autour du thème "Gestion de la végétation et Entretien des milieux par les Herbivores domestiques en moyenne montagne : approche expérimentale et modélisation". Ce GIS est composé de laboratoires de l'INRA, du Laboratoire inter-universitaire d'Informatique, de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs en Travaux Agricoles (ENITA), du Laboratoire d'écologie végétale et cellulaire de l'Université d'Auvergne, et du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. Cet article focalisera sur un site géographique particulier que nous allons présenter.

Le site étudié

L'expérimentation se déroule sur le site de Ternant, à proximité du Puy de Dôme. Par son altitude moyenne (environ 1000 m), la nature de ses sols et la diversité de sa végétation, elle est représentative de la plupart des situations rencontrées en moyenne montagne auvergnate. Cette ancienne estive ovine domine la ville de Clermont-Ferrand. Elle est gérée par un groupement d'estives et accueille des génisses durant tout l'été.

Pour tester l'hypothèse de complémentarité de l'action animale, l'estive a été divisée en deux (2 x 25 ha) : une moitié accueille un troupeau mono-spécifique constitué de bovins, et l'autre moitié un troupeau mixte constitué de bovins et de chevaux.

Pour suivre et enregistrer les localisations des animaux dans le terrain, certains d'entre-eux (photos 1 et 2) sont équipés d'un récepteur satellite GPS (Global Positioning System). Le récepteur

enregistre la position de l'animal toutes les 5 secondes. Pour déterminer l'activité de pâturage des animaux, ils sont également équipés de colliers Ethosys qui enregistrent toutes les 5 minutes le nombre de secondes où l'animal est actif, en particulier son activité de pâturage. Les animaux ainsi équipés sont peu nombreux (3 animaux par parcelle), et changent chaque jour, ce qui a constitué une contrainte pour l'établissement de statistiques fiables. L'intérêt majeur des techniques présentées consiste à rapprocher les données de localisation et les données d'activité afin d'essayer de déterminer les endroits où les animaux s'alimentent, ainsi que les temps passés aux différentes activités (repos, déplacement, etc.).

Les données récoltées sont stockées à l'INRA dans une base de données. Un premier travail de filtrage est alors nécessaire, les balises GPS pouvant parfois envoyer des localisations erronées. Les données de 1996 et 1997 ont un volume de plus de 300 méga-octets.

La modélisation du site et des herbivores

■ Objectifs et intérêt de la simulation

L'intérêt pour les techniques de simulation est grandissant, il se justifie essentiellement par les possibilités de prédictions qui leur sont associées, parfois à tort car le plus grand gain que l'on puisse retirer d'un modèle reste l'augmentation des connaissances des scientifiques qui ont collaboré à sa construction. En effet, l'établissement d'un modèle entraîne d'une part la formalisation et le partage des connaissances des différents experts intervenant dans un projet pluridisciplinaire, et d'autre part, il entraîne la formalisation de nouvelles connaissances ou de connaissances jusqu'alors partielles. Cette dernière formalisation est perçue comme étant le résultat des diverses questions posées par les spécialistes de la simulation afin de bâtir un modèle en adéquation avec les objectifs fixés.

Elaborer des modèles "prédictifs" reste toujours un objectif, un des intérêts pratiques de la simulation résidant dans sa capacité d'aide à la décision. Il est par contre essentiel de ne pas négliger la vérification et la validation des modèles, sinon, les utilisateurs de modèles instructifs mais faussement prédictifs seraient alors déçus et refuseraient

Photos 1. et 2. – Garance et Marguerite, équipés de leur balise GPS et de leur collier ETHOSYS. ▼



à l'avenir l'utilisation de techniques pourtant prometteuses.

L'objectif de la modélisation que nous présentons est de simuler le fonctionnement de l'estive, afin de comprendre l'interaction entre l'évolution de la végétation et les déplacements et actions des animaux en pâture. Cette compréhension permettra ensuite de connaître les possibilités d'évolution de la végétation sur cette estive. Cela implique les sous-objectifs suivants :

- Comprendre les motivations des animaux (endroits pâturés, trajets, lieux de repos, etc.) ;
- Comprendre les influences du comportement d'une espèce animale sur une autre ;
- Mesurer les variations d'embroussaillage de la parcelle en fonction des taux de chargement ;
- Comprendre l'évolution des jeunes repousses d'arbres ;
- Mesurer l'offre fourragère (qualité et quantité de l'herbe).

Dans la majorité des cas, il est extrêmement difficile d'approcher le comportement de systèmes régis par plus de deux processus interconnectés dans le cadre classique d'études réductionnistes (étude séparée de chacun des processus). Plus particulièrement les phases transitoires (correspondant à la modification d'états stationnaires par perturbations, fonctionnement aux extrêmes, variations en continu des paramètres, etc.) échappent pour une large part à cette approche.

Bien que certains modèles mathématiques aient prouvé leur utilité (modèles à compartiments, chaînes de Markov, ...) leur champs d'application reste limité. D'autres catégories de modèles, notamment ceux utilisant la technique dite de "simulation aléatoire à événements discrets" fournissent depuis une dizaine d'années des aides importantes pour la compréhension des phénomènes biologiques et écologiques. Cette dernière technique étant "gourmande" en temps de calcul, en espace mémoire et en temps passé pour la mise au point, elle n'est utilisée que lorsque l'on ne dispose pas d'outils mathématiques plus performants. Cette technique de simulation aléatoire à événements discrets est notamment indispensable pour l'étude de processus transitoires se déroulant dans l'espace avec des interactions discrè-

tes à distance entre les processus. D'une manière générale, la simulation aléatoire à événements discrets présente les avantages suivants :

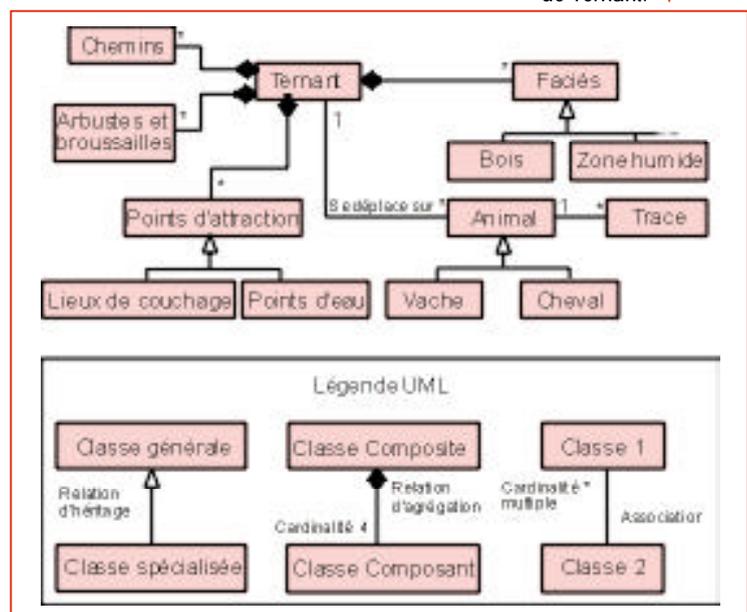
- Elle dispense d'une modélisation mathématique ardue et elle autorise, théoriquement, la simulation d'écosystèmes à très grand nombre d'acteurs aux comportements différents ;
- Elle permet de prendre en compte les aspects spatiaux des écosystèmes ;
- Elle permet de gérer, pour chaque individu, tous les paramètres que les biologistes entendent intégrer au modèle. Cette gestion des individus, et corrélativement des variations physiologiques de ceux-ci, permet, selon le libre choix de l'expérimentateur, d'affiner le modèle avec le degré de finesse souhaitable pour approcher au mieux la réalité.

Pour développer le simulateur, nous avons retenu une approche visuelle interactive tout en faisant usage de techniques de développement de logiciel dites orientées-objets (Hill D.R.C., 1996).

■ Présentation des choix de modélisation

Le modèle conceptuel de simulation que nous proposons a été formalisé avec la notation graphique du langage de modélisation unifié : UML (Muller P.A., 1997). Le logiciel est implémenté avec le langage de programmation Java pour des

Figure 1. - Diagramme des classes UML du modèle conceptuel de Ternant. ▼



raisons de portabilité. La deuxième raison du choix de Java réside dans sa capacité d'interfaçage avec le World Wide Web pour limiter les problèmes d'installation, de mise à jour du logiciel et enfin, faciliter la diffusion à d'autres utilisateurs (Campos A. et Hill D.R.C. 1998 ; Fishwick P. et al. 1998).

Le schéma conceptuel de la figure 1 est volontairement épuré, pour mieux souligner les grandes lignes de la simulation à venir. On distingue déjà le terrain de Ternant, constitué de différents faciès de végétation, de chemins et d'arbustes et broussailles (genêts, ronces, etc.). Ce terrain comporte des points d'attraction que sont les lieux de couchage des animaux et les abreuvoirs (Bailey D. W. et al., 1998). On trouve ensuite des animaux (vaches ou chevaux) qui pâturent sur ce terrain, se servant de ses différents composants (chemins, faciès, etc.) comme points de repère.

Les zones boisées (faciès "Bois") et les jeunes arbustes ont été volontairement séparés dans le modèle conceptuel. Une zone boisée est une zone dont on ne cherche pas à dénombrer les individus, alors que les arbustes sont identifiés. On peut donc suivre l'évolution de chaque arbuste en fonction de son environnement, alors que ce type de résultat est moins intéressant dans le cas de zones boisées, que l'on ne fera pas évoluer dans le modèle.

Les faciès de végétation et les chemins du terrain ont été cartographiés et simplifiés (figure 2). On ne retrouve donc que 8 faciès de végétation (hors zones boisées). Chaque faciès peut être composé de différentes espèces végétales, mais pour des raisons de simplification, on notera l'espèce do-

minante. La figure 2 est une vue de ces faciès, sur laquelle on a rapporté les clôtures du terrain, ainsi que les chemins.

Pour répondre aux différents besoins exprimés, le modèle doit pouvoir fonctionner suivant différentes échelles :

- 3 pas de temps (instantané, intra-annuel, inter-annuel) ;
- 3 échelles d'espaces (cellule, faciès, assemblage de faciès) ;
- 3 niveaux d'individus (animal, groupe d'animaux d'une espèce, troupeau).

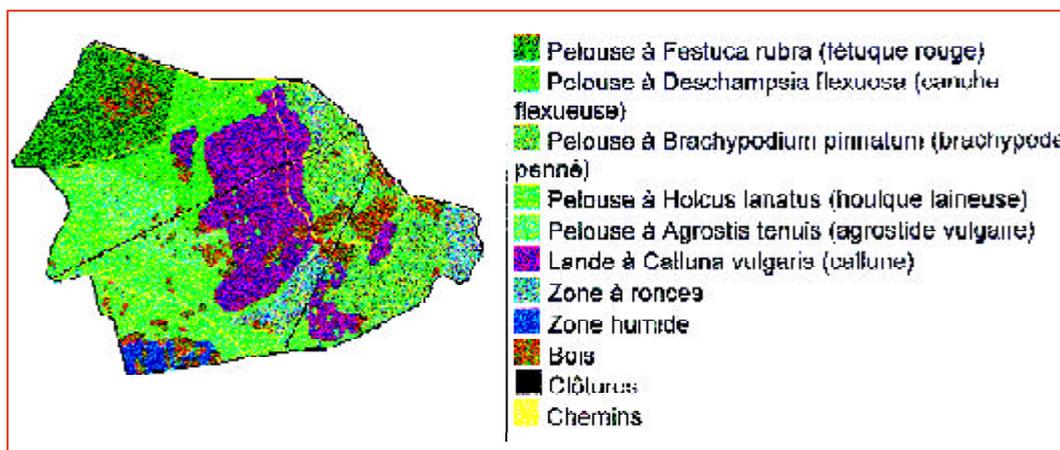
Pour respecter ces 3 échelles, le logiciel de simulation fonctionne suivant 2 modes différents. Même si chaque mode utilise un ensemble de données et des paramètres communs, ils se spécialisent tous en utilisant des paramètres et des fonctionnements spécifiques et en proposant des résultats propres.

Ces modes sont les suivants :

1^{er} mode : étudier les trajets GPS et activités ETHOSYS à des fins de compréhension et d'analyse. Ce mode permet de déterminer les lieux de passages des animaux, les lieux de pâture favoris, l'enchaînement et les temps consacrés aux différentes activités. Il permet donc d'affiner les règles comportementales utilisées dans le 2^{ème} mode de fonctionnement.

2^{ème} mode : simuler le "fonctionnement" d'animaux isolés ou en groupe, en semi temps-réel. Ce mode fournit les données comportementales des troupeaux, d'inter-actions entre les groupes d'animaux.

Figure 2. - Les faciès de végétation et les chemins sur l'estive de Ternant. ▶



Les différentes utilisations du modèle de simulation

■ Simulation par traces : Analyses des données GPS et ETHOSYS

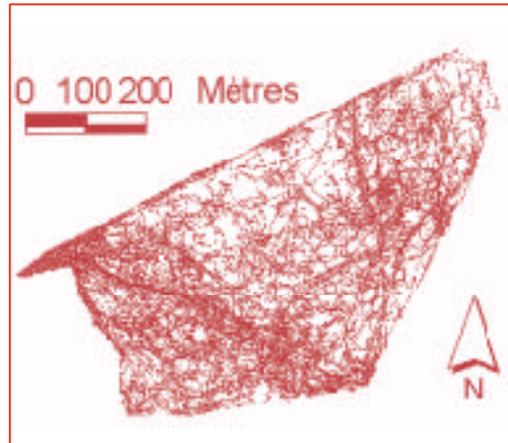
Le but de ce premier module du simulateur est d'analyser et de comprendre les données relevées sur le terrain, afin de pouvoir alimenter les autres modes de fonctionnement avec des données de comportement et de déplacement cohérentes.

Dans ce premier module, l'utilisateur peut "re-lire" l'intégralité des trajets d'animaux, simulés ou relevés par GPS et les dérouler de façon graphique en les superposant sur des cartes de représentation du terrain d'étude. Les cartes peuvent représenter la végétation du terrain, sa topographie ou seulement les contours et chemins.

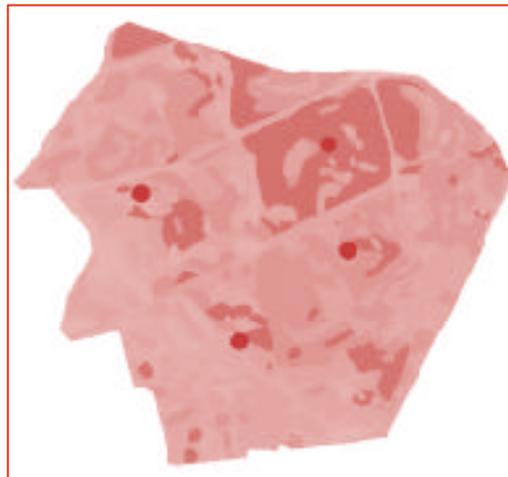
Cette relecture des trajets autorise un certain degré de validation des simulations en permettant d'essayer de comprendre le comportement des animaux, leurs lieux de fréquentation et donc de déterminer leurs motivations. La technique repose alors simplement sur ce que l'on appelle, en modélisation et en physique quantique, la simulation à base de traces. Le simulateur se comporte alors comme un magnétophone qui permet à l'utilisateur de visualiser l'évolution d'un trajet, de l'accélérer, de le ralentir et de le reproduire autant que nécessaire.

L'utilisateur peut également demander la superposition de l'ensemble des traces pour établir une carte de fréquentation du site. Cette superposition peut se faire avec des critères plus restrictifs pour obtenir des cartes plus spécialisées (restriction sur la période, l'espèce étudiée, ...). Le programme d'analyse permet également de différencier les traces de simple déplacement de celles de pâturage, afin d'établir une carte de consommation. Les cartes obtenues permettent en outre de mettre en évidence :

- les trajets effectués et les points de passage fréquents,
- les zones de fort pâturage,
- les zones évitées,
- les zones d'attraction (lieux de couchage, abreuvoirs, etc.),
- les faciès de végétation préférés, en fonction de la période de l'année et de l'espèce étudiée,
- (vache, cheval ou vache "influencée" par la présence de chevaux).



◀ Figure 3. - Carte de fréquentation issue des données GPS de 1997.



◀ Figure 4. - Carte de consommation de végétaux en 1997.

La carte présentée figure 3 est issue du cumul des traces relevées par GPS en 1997 pour la parcelle sud. Sur ce type de carte, il est possible de distinguer plusieurs zones de forte fréquentation, ainsi que d'autres zones qui semblent être évitées. On note également que les animaux suivent souvent les mêmes trajets que l'on découvre concordants avec les chemins de l'estive. La comparaison d'une carte topographique avec la carte de fréquentation (figure 3) nous apporte des éléments supplémentaires. On note en effet que les zones de relief sont plutôt contournées que gravies, et que les zones les plus fréquentées sont les zones de plus basse altitude. L'analyse des relevés confirme et affine la connaissance des experts. D'une manière générale, les informations mesurées concrètement sur le terrain sont interprétées pour en extraire des modèles de règles de déplacement, de comportement et de défoliation corrects.

La carte de consommation (fig. 4) a été établie à

partir de relevés effectués sur le terrain. Les zones rouges représentent les mises en défends.

- Les 5 niveaux de relevés (de la couleur la plus sombre à la couleur la plus claire) correspondent aux :
- Traces de passages rapides (prélèvement < 20%)
 - Prélèvements faibles (de 20 à 40%)
 - Prélèvements moyens (de 40 à 55%)
 - Prélèvements importants (de 55 à 70%)
 - Prélèvements très importants (de 70 à 80%)

Cette carte de consommation nous apporte certaines confirmations du comportement et du déplacement des animaux. On remarque nettement que les zones les plus pâturées sont situées en basses altitudes et sur les trajets de pâturage qui suivent les chemins de l'estive. La zone de plus forte activité est évidemment celle des points d'eau. Ce type de constats semble trivial pour des experts, mais ils serviront efficacement quand il s'agira de valider le modèle informatique.

Une autre motivation importante des animaux est la qualité de l'herbe proposée. Cette qualité est quantifiée par une valeur pastorale (VP) calculée pour chaque faciès de végétation ; une valeur élevée indique une meilleure qualité. La VP sera considérée constante au cours du cycle annuel pour des raisons de simplicité.

Les taux d'abroustissement du tableau 1 indiquent la consommation des faciès végétaux par les ani-

maux. Les chiffres varient beaucoup d'une année à l'autre, car le chargement animal sur l'estive a été plus fort en 1997, ce qui entraîne des différences dans la sélection des espèces pâturées (Orth D. et al. 1998). On remarque cependant sur la carte de fréquentation et la carte de consommation, que les zones les plus pâturées correspondent aux faciès de plus forte valeur pastorale.

Il manque certaines informations complémentaires pour expliquer l'absence de fréquentation de zones a priori attractives pour les animaux. Certaines de ces zones ont été envahies par des genêts, dont nous ne possédons actuellement pas de cartographie précise, mais seulement des positions approximatives. Certains de ces genêts, de plus de 2 mètres de haut, constituent une barrière physique qui expliquerait l'abandon de ces zones par les animaux.

Nous pouvons encore extraire de ces traces d'autres informations indispensables à la modélisation correcte des déplacements des animaux. A l'aide d'un programme d'analyse, on peut déterminer les vitesses minimum, maximum et moyenne des animaux en fonction de leur espèce, de leur environnement (une vache est-elle au contact de chevaux ?) et de leur activité (pâturage, déplacement, etc.). On déterminera également des probabilités de changement de direction en fonction des mêmes critères.

Tableau 1. – Valeurs pastorales et taux d'abroustissement (%) des faciès végétaux en 1996 et 1997 (Orth D. et al., 1998) ▼

| Faciès de végétation | Valeurs pastorales | Taux d'abroustissement | | | | | | | |
|--|--------------------|------------------------|------|------|------|---------|------|------|------|
| | | VACHES | | | | MIXTE | | | |
| | | Juillet | | Aout | | Juillet | | Aout | |
| | | 1996 | 1997 | 1996 | 1997 | 1996 | 1997 | 1996 | 1997 |
| Pelouse à <i>Holcus lanatus</i> | 51 | 29 | 50 | 39 | 7 | 32 | 42 | 42 | 57 |
| Pelouse à <i>Agrostis tenuis</i> | 34 | 13 | 33 | 20 | 55 | 18 | 34 | 24 | 46 |
| Pelouse à <i>Festuca rubras</i> | 34 | - | - | - | - | 13 | 35 | 24 | 40 |
| Zone humide | 26 | 24 | 75 | 32 | 58 | - | - | - | - |
| Pelouse à <i>Deschampsia flexuosa</i> | 23 | - | - | - | - | 15 | 25 | 15 | 32 |
| Zone à ronciers | 19 | 20 | 34 | 19 | 47 | - | 48 | - | 49 |
| Lande à <i>Calluna vulgaris</i> | 11 | 8 | 25 | 15 | 36 | 7 | 24 | 7 | 29 |
| Pelouse à <i>Brachypodium pinnatum</i> | 5 | 7 | 39 | 21 | 48 | 15 | 29 | 18 | 36 |

■ Simulation multi-agents

Dans le deuxième module, nous avons retenu l'idée d'une simulation basée sur des agents. Dans cette approche, les vaches et les chevaux sont considérés comme des agents. Avec cette technique issue de l'Intelligence Artificielle Distribuée et des modèles individus-centrés (Huston M. et al. 1988 ; De Angelis D. et Gross L.J., 1992 ; Breckling B. et Müller F. 1994), il est possible de représenter des phénomènes environnementaux comme la conséquence d'interactions d'agents agissant en parallèle, chaque agent étant un objet actif (éventuellement réactif), autonome et intégré à un comportement social. Le lecteur intéressé par ces techniques pourra se reporter utilement à l'ouvrage de référence en langue française (Ferber J., 1995).

Chaque agent simule le comportement d'une vache ou d'un cheval. Le nombre de ces agents est paramétrable, et, à partir de 2 agents, le programme simule le comportement grégaire des animaux. Chaque agent stimule les autres et interagit avec eux. Les agents agissent également sur le terrain dans lequel ils évoluent, broutant et piétinant la végétation. De ce fait, déplacer des entités virtuelles, changer leur comportement et modifier leur état peut être facilement effectué, toutes les données de simulation et les règles de comportement étant stockées dans des entités séparées. En plus des propriétés classiques des agents, telles que l'autonomie, le comportement social et la réactivité, certaines recherches considèrent qu'un agent doit être implémenté en utilisant une caractéristique propre à un être vivant : l'incertitude de son comportement et de sa perception. Dans notre cas, nous utilisons la logique floue suivant la technique décrite dans (Campos A. et Hill D.R.C., 1998).

Pour piloter ce mode de simulation, de nouveaux composants logiciels sont rajoutés dans le panneau de contrôle du logiciel (Figure 5). On peut modifier le nombre d'animaux en fonction de l'espèce au sein du troupeau. Deux boutons sont activables : l'un permet l'enregistrement des traces générées, et l'autre, le bouton *Analyse*, lance la procédure de construction de la carte de fréquentation, en fonction des simulations déjà exécutées.

La figure 6 montre une simulation multi-agents en cours d'exécution. Les 2 premières icônes en haut de la fenêtre permettent l'accès au 2 modes

Figure 5. – Zoom sur le panneau de contrôle de la simulation multi-agents. ▼

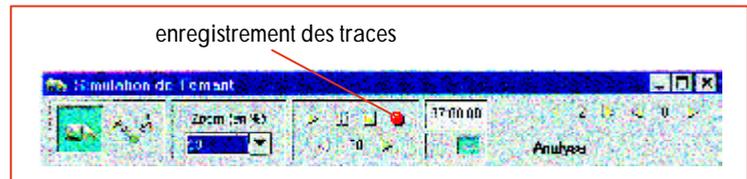
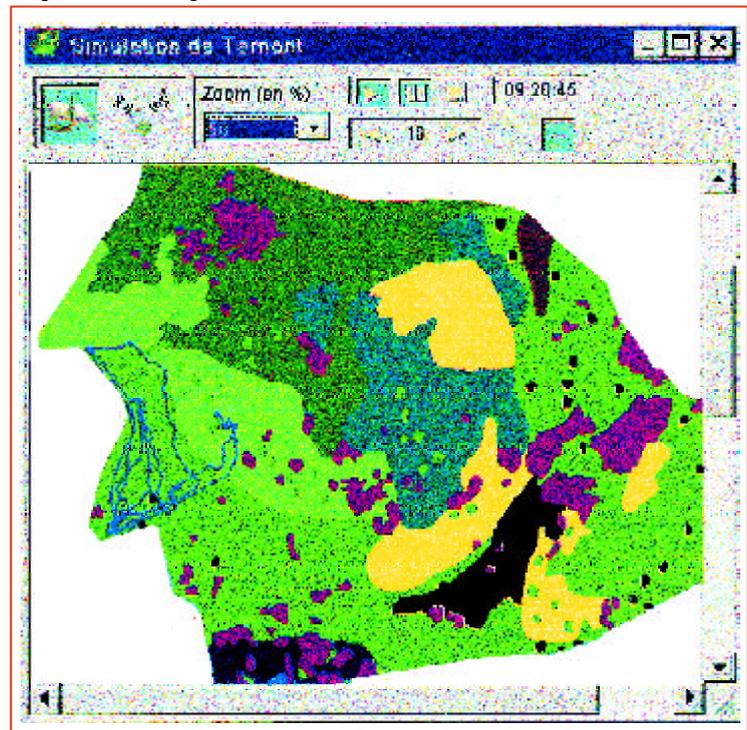


Figure 6. – Simulation multi-agents en cours d'exécution. (En réalité, il s'agit d'un affichage vidéo couleur). ▼



de fonctionnement actuellement implémentés (Simulation multi-agents et Suivi de traces GPS). Une portion du terrain peut être agrandie pour suivre le détail d'une trace. On peut également agir sur la vitesse d'exécution, suspendre et reprendre la simulation et sur les traces laissées par les animaux (trace complète visible, ou seulement animal visible). On peut également visualiser l'heure, le temps dans le simulateur ne s'écoulant évidemment pas à la même vitesse que pour nous. La simulation en cours sur cette figure porte sur 2 vaches, avec les faciès de végétation en fond d'écran, afin de visualiser les trajets d'un faciès à l'autre entre les repas.

L'intérêt principal du développement d'un modèle multi-agents réside dans la possibilité pour

les experts éthologues de tester leurs hypothèses théoriques. Ces hypothèses traduites par les informaticiens régissent le fonctionnement de la simulation, il est ainsi possible de calibrer et de valider partiellement la connaissance des experts en comparant le modèle avec la réalité observée car l'expérimentation prend en compte les données du terrain.

Nous l'avons déjà souligné, le principal intérêt d'une simulation est d'améliorer la connaissance des experts des différents domaines. L'élaboration et la spécification de règles de comportement pour les animaux sont parmi les principaux résultats ou retombées directes de la modélisation. Ces règles de comportement de la simulation multi-agents sont issues d'une part de réunions de travail avec des éthologues de l'INRA et des spécialistes de la végétation de l'ENITA et du LEVC, de l'ouvrage suivant : (Arnold G.W. et Dudzinski M.L., 1978) et d'autre part de l'analyse des traces GPS et ETHOSYS (cf. "Simulation par traces"). Elles peuvent également être parfois le fruit du simple bon sens. Il existe 3 grandes classes de règles : la dynamique de la végétation (croissance et sénescence, etc.), les règles de déplacement des animaux (Bailey D. W. et al., 1998) et les règles de consommation des animaux. Ces deux dernières classes sont étroitement liées, l'animal se déplaçant principalement pour se nourrir. De même, la croissance de la végétation sera fortement liée à la pression de pâture et au piétinement lié à la présence d'animaux. Dans ce mode de fonctionnement, on ne prendra pas en compte les règles de croissance de la végétation, le pas de temps de l'étude étant trop faible pour mesurer une variation significative.

L'influence du climat (température, vent, pluie) n'est pas encore introduite dans le modèle. Il est cependant reconnu qu'elle influence fortement le comportement des animaux (Arnold G.W. et Dudzinski M.L. 1978). Par exemple, en cas de températures élevées, les animaux auront tendance à se déplacer du côté de l'estive susceptible de recevoir un peu de vent. Cette amélioration est prévue dans une version ultérieure du logiciel de simulation.

Il est souvent intéressant de faire varier certains paramètres du modèle entre 2 expériences, pour mesurer ou vérifier leur influence dans l'expérience. Pour des raisons de commodité, ces para-

mètres sont actuellement regroupés dans une table de la base de données. Les principaux paramètres sont :

- le nombre de vaches par parcelle,
- le nombre de chevaux par parcelle,
- les distances, par espèce, minimum et maximum à partir de laquelle un animal ressent le besoin de s'éloigner ou de se rapprocher d'un de ses congénères.

Il est prévu de pouvoir regrouper et stocker ces paramètres sous un même numéro de version d'expérience, afin de pouvoir refaire différentes simulations avec le même contexte, et ce pour comparer les résultats obtenus par les différentes répliques.

Les principaux résultats générés par chaque simulation sont sous forme de traces identiques aux traces GPS et sont conservés dans une table nommée "Résultats" de la base de données relationnelle gérée pour ce projet. Ces données pourront ensuite être traitées de la même manière que les traces relevées par le GPS, et servir, en les cumulant sur une période donnée, à constituer des cartes de fréquentation et de consommation utiles pour la validation du modèle. En effet, ces cartes calculées permettent, par comparaison avec celles déjà existantes ou obtenues dans le 1^{er} module du simulateur, de vérifier la cohérence de fonctionnement de ce mode de simulation. On repérera aisément les similitudes (fréquentation des zones, chemins suivis, pression de pâture, prise en compte du relief, etc.), ou absence de similitudes dans le cas de règles inadaptées ou trop incomplètes, entre les cartes issues des données réelles et les cartes obtenues par simulation. Les résultats obtenus par ce module peuvent donc subir une validation visuelle relativement complète.

Vérification et validation du modèle

Avant même de coder dans un langage de programmation le modèle conceptuel que nous avons présenté, il est essentiel d'essayer de valider les choix effectués lors de sa conception auprès des experts du domaine. Dans notre contexte, ceci ne peut se faire qu'avec une collaboration pluridisciplinaire. Lorsque le modèle conceptuel est codé dans un langage de programmation,

il faut ensuite vérifier ce code avant de pouvoir passer à la nouvelle étape de validation des résultats du modèle.

Il nous semble important, dès lors que le simulateur est fonctionnel et que la possibilité d'afficher les premiers résultats de simulation est acquise, d'aborder la phase de *vérification* interne de l'ensemble des modules intervenant (simulateur et modules périphériques réalisés). Il s'agit d'une phase cruciale, car elle concerne la vérification de la cohérence interne du logiciel. Il y a bien peu de chances de réaliser un programme complexe de plusieurs milliers de lignes sans qu'il n'y subsiste quelques erreurs de programmation, de logique, ou des incohérences avec le système réel. C'est une phase longue et difficile. Le programme doit être relu en détail par plusieurs personnes et analysé si possible en liaison avec l'expert du domaine, qui devrait, autant que faire se peut, être capable de lire et d'effectuer une analyse critique du simulateur. Insistons sur le fait suivant, qui peut paraître anodin, mais que l'expérience révèle crucial : dans tous les cas il est souhaitable que l'écologue possède de sérieuses connaissances en programmation, et que l'informaticien fasse l'effort de bien s'imprégner du domaine de l'écologie et de l'écosystème à l'étude. Il ressort de ces quelques remarques que tout travail de simulation ambitieux en écologie est le fruit d'un travail d'équipe.

S'étant assuré d'un minimum de cohérence interne du logiciel, on peut alors aborder la phase suivante qui consiste en la vérification de la fiabilité du programme. Cela revient à pousser de façon combinatoire les différentes variables d'entrée (variables de forçage) dans leurs valeurs extrêmes. Aucun comportement aberrant ne doit apparaître. Bien entendu, cette phase est à même de filtrer à nouveau des erreurs ayant survécu à la phase précédente (divisions par zéro pouvant soudainement apparaître, débordements en virgule flottante (overflow), etc.), mais aussi de produire des résultats inacceptables en raison même de leur incohérence. Là encore l'intervention de l'écologue est importante pour l'examen de ces résultats.

La fiabilité logicielle acquise, il faut encore examiner la robustesse du modèle. Ceci signifie, qu'en général, il n'est pas bon signe pour un modèle d'être très sensible à d'infimes variations des va-

riables de forçage. Les variables doivent pouvoir être modifiées sensiblement sans que le comportement global du système en soit affecté qualitativement. De brusques variations correspondant à des seuils critiques sont normales ; encore faut-il que l'examen du système réel lui-même puisse en apporter des éléments d'explication. En cas de doute, il faudra réexaminer l'ensemble du modèle au point de vue technique (programmation).

La phase suivante, dite de calibration, consiste à examiner le comportement du modèle et à vérifier que le modèle en simulation se comporte de la manière qui est attendue. Les premiers essais se déroulent, généralement, au moyen de valeurs de paramétrage soit tirées de la littérature soit estimées par les experts du domaine en attendant que la phase d'échantillonnage en cours soit complètement terminée. Ces valeurs provisoires permettent d'explorer le comportement du modèle. Les résultats fournis par la simulation ne doivent pas différer de façon trop importante du système réel. Les comportements des deux systèmes doivent présenter de fortes analogies. De très fortes divergences peuvent mener à une remise en cause profonde du modèle : des facteurs importants peuvent avoir été négligés, des approximations et des simplifications abusivement opérées. Cette remise en cause, accompagnée d'un remaniement profond allant de l'analyse du domaine (intervention de l'expert) aux sous-modèles (équations et autres), devra être suivie à nouveau des phases de vérification et d'examen de la robustesse du logiciel. Les modifications devront aboutir à un modèle se comportant de façon *acceptable et explicable*. Il est à noter qu'un modèle calibré, même au moyen d'un jeu de données de qualité, ne constitue pas un modèle validé.

Nous arrivons enfin à la validation, les experts en modélisation savent très bien qu'il est impossible de valider un modèle dans l'absolu (Balci O. et Withner R.B., 1989). Ceci dit, un modèle doit être capable de reproduire au mieux la réalité. L'entrée des données initiales, puis la mise en œuvre des simulations, doivent fournir des résultats en adéquation avec les mesures effectuées sur le système réel. Si ce n'est pas le cas, le modèle est dit non valide, ce qui ne signifie pas qu'il soit non exploitable. Il faut alors réexaminer les équations et les données, procéder éventuellement à un supplément d'échantillonnage de l'écosystème, réexa-

miner la calibration des sous-modèles, etc. Les techniques statistiques (analyse de variance et de régression, tests divers...) sont là pour estimer la performance en matière de reproduction des résultats obtenus sur le système réel. Dans les modèles stochastiques et plus encore à événements discrets, s'adressant à des systèmes dans lesquels les individus se reproduisent lentement, la validation devient très difficile et parfois même objectivement impossible de façon directe. Elle ne peut être réalisée que par l'expert du domaine qui, en s'appuyant sur son expérience passée, et en raisonnant sur des situations analogues (stations ou populations) à celle du système modélisé, pourra effectuer un diagnostic. Un ensemble de techniques de validation pour la modélisation d'écosystèmes est présentée dans (Hill D.R.C. 1995). Certains types de résultats spatiaux et stochastiques seront validés par des méthodes particulières qui ne sont développées que depuis peu. C'est le cas par exemple de la position ou la répartition des individus dans l'espace qui doit faire l'objet d'une analyse spectrale (Coquillard P. et Hill D.R.C., 1997).

Parmi les techniques de vérification et de validation, l'utilisation de simulations interactives et même le rendu réaliste peuvent être envisagés. Grâce aux collaborations établies, un des objectifs initiaux concernant la visualisation réaliste des résultats a pu être partiellement atteint. La visualisation précise a permis de vérifier les modèles, les échelles et la cohérence des systèmes de coordonnées. Le modèle numérique du terrain de Ternant réalisé par l'ENITA a pu être visualisé avec des résolutions satisfaisantes (nécessitant cependant 800 Mo de mémoire vive pour un modèle 3D avec un maillage tous les 4m². Le calcul d'une image réaliste sur le terrain de Ternant avec des modèles numériques de vaches et de chevaux nécessite une heure de calcul sur les machines les plus puissantes de l'ISIMA (Silicon Octane et serveur IBM G40 avec 1Go de RAM) (Figures 7 à 8). Pour réaliser une animation d'une minute, plus de 1500 heures de calcul sont nécessaires. Les aspects de rendu réaliste concernent essentiellement la communication avec des décideurs non scientifiques et l'aspect paysager ; les experts préfèrent souvent des simulations interactives et des résultats statistiques plus exploitables pour une analyse scientifique.

Figure 7. - Maillage d'une vache en 3D. ▼

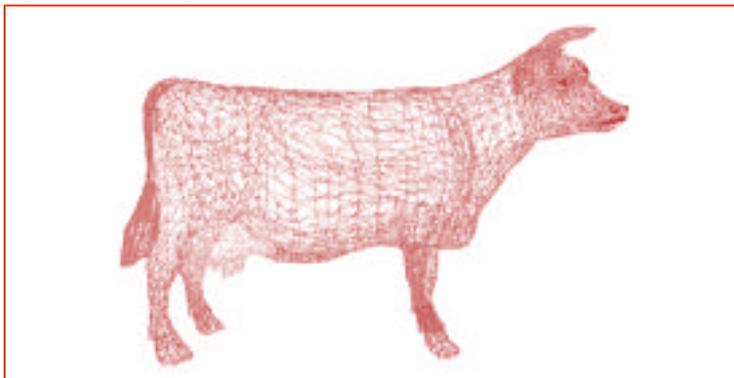


Figure 8. - Exemples d'images d'animaux calculées, sur une synthèse du terrain. ▼



Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes efforcés de décrire la conception et la réalisation d'un logiciel de simulation de l'entretien du paysage par des herbivores. La simulation utilise une approche dite multi-agents et l'expérimentation prend en compte des données réelles de terrain. Nous avons tout d'abord insisté sur la difficulté de la collecte et du tri des données servant de base aux règles de comportement de nos agents. Si l'on souhaite obtenir un comportement des agents semblable à celui de leurs modèles réels, cette étape reste fondamentale. Elle implique un travail d'équipe et des réunions de travail fréquentes. Sur ce projet ambitieux, la complexité du système écologique en présence a impliqué la participation de beaucoup de personnes de métiers différents (éthologues, agronomes, informaticiens, etc.). Ces personnes travaillant toutes sur des sites différents avec des activités et des centres d'intérêts différents, les réunions de travail ne pouvaient être employées uniquement que pour les aspects modélisation et validation du logiciel de simulation.

Il en résulte que le modèle proposé ne peut pas actuellement répondre à tous les besoins, notamment parce qu'ils ont été relativement ardues à spécifier. Toujours en raison de la diversité des intervenants, les sous-objectifs du modèle divergent entre les différentes disciplines, entraînant un surcoût d'efforts que ce soit pour les tentatives de validation des résultats préliminaires ou pour la valorisation de ces résultats. Malgré les problèmes liés à cette collaboration d'envergure, nous présentons un logiciel permettant à la fois de visualiser et comprendre les données initiales, et également de simuler le comportement individuel et grégaire des animaux grâce à une approche multi-agents.

Nous devons également préciser les limites de notre démarche. Dans la pratique, peu d'animaux ont été suivis par les systèmes GPS et ETHOSYS. Cette technique demande en effet une logistique très lourde pour un suivi complet du troupeau. Les données issues d'un tel suivi seraient également bien trop volumineuses pour être traitées, stockées et analysées aisément. Rappelons que les données GPS et ETHOSYS occupent aujourd'hui 300 Mo pour une saison de pâturage. Il ressort donc que les données utilisées pour l'étude du comportement animal, même si elles permettent d'avoir une base de renseignement solide, ne représentent pas la totalité de la réalité. De même, certaines parties du développement ont subi des limitations liées aux contraintes informatiques. Notamment, le développement a été initialisé en langage de programmation Java, avec l'idée de permettre l'exécution du simulateur à travers le World Wide Web. Nous nous sommes alors heurtés à deux sortes de problèmes : les volumes à transmettre (cartes, données GPS, écriture des traces générées, etc.) à travers le réseau sont trop importants pour permettre une exécution à distance. Le deuxième problème porte sur le langage

Java lui-même. Java est un langage semi-interprété, qui nécessite de s'exécuter dans une JVM (Java Virtual Machine). Or, nous atteignons aujourd'hui les limites de la gestion mémoire de la JVM actuelle, car nous sommes obligés de stocker différentes cartes qui comportent chacune 1 million de points. Sur ce point, un gros travail d'optimisation du volume de ces cartes a été entrepris.

Les évolutions futures pourraient concerner principalement la conception et le développement d'une simulation gérant le comportement global du troupeau. En effet, l'analyse des traces laissées par un ensemble d'individus pâturant ensemble dans la même simulation multi-agents permet de déduire des règles de déplacement d'un troupeau en fonction de ses paramètres (nombre d'individus, espèce, etc.), des règles de pâturage (pression de pâture moyenne par individu), ainsi que les interactions éventuelles liées à la présence d'un troupeau d'espèces différentes. L'action du troupeau sur la pâture est donc établie à partir de règles générales de déplacement et de statistiques de prélèvement ou de destruction de végétaux dans la parcelle. L'intérêt de cette nouvelle approche réside dans sa plus grande rapidité d'exécution, et donc dans sa capacité à dérouler la simulation sur un plus grand pas de temps (sur plusieurs mois, voir plusieurs années), ce qui a l'avantage de permettre l'intégration de l'évolution de la végétation. Une autre évolution d'envergure pourrait concerner la prise en compte du climat dans la détermination du comportement des animaux et des troupeaux. Enfin, pour permettre une visualisation réaliste de la simulation et des résultats, nous envisageons également un portage des visualisations en 3 dimensions qui utiliserait le VRML afin de diffuser les résultats sur le World-Wide Web. □

Résumé

L'abandon de l'utilisation des ressources herbagères par l'activité pastorale entraîne un appauvrissement de la diversité écologique et spécifique. A terme, cette évolution se traduit par le déplacement des activités humaines hors de ces zones et à un déséquilibre au niveau du territoire national. Un programme de recherche pluridisciplinaire, dans le cadre d'un Groupement d'intérêt Scientifique, a été mis en place dès 1994 pour élaborer de nouveaux modes de gestion qui concilient production agricole et entretien de l'espace en condition de sous chargement (peu d'animaux par unité de surface). Cet article s'inscrit dans une démarche d'acquisition de méthodes afin d'expérimenter des techniques de gestion de pâturage mixte bovins et chevaux selon une hypothèse de complémentarité entre ces deux espèces. La partie informatique présentée vise à simuler les dynamiques animales, végétales et paysagères futures et, à terme, proposer des protocoles de gestion aptes à répondre à ces nouvelles demandes. L'objectif de la modélisation que nous présentons est de simuler le fonctionnement de l'estive, afin de comprendre l'interaction entre l'évolution de la végétation, les déplacements et les actions des animaux en pâture. Un des modes de simulation utilise un système multi-agents. Le modèle conceptuel de la simulation est en cours de validation, il a été formalisé avec la notation graphique du langage de modélisation unifié (UML) et la version actuelle du logiciel est implémentée avec le langage de programmation Java. Pour suivre et enregistrer les localisations des animaux sur le terrain, ceux-ci sont équipés d'un récepteur satellite GPS (Global Positioning System). L'activité de pâturage des animaux est enregistrée par des colliers Ethosys.

Abstract

The surrender of herbaceous resources by the grazing activity results in an impoverishment of both ecological and specific diversity. On the long term, this trend imposes the localization of human activities far from these zones and a national imbalance. A multidisciplinary research program was set up in 1994 with the aim of elaborating new ways of management, which would contribute to maintain both the productivity and the opened landscapes within the condition of low grazing pressure. This paper exposes the methods we elaborated in order to test several management techniques of grasslands by mean of cattle and horses within the hypothesis of complementarity between these two species. The computer science part of this paper presents the results of simulations of future dynamic behaviors of the animals, vegetation and landscape, in order to propound some management protocols. The simulator is based on a multi-agent system. The conceptual model, formalized with Unified Modeling Language graphical notation is actually in validation phase and the implementation of the software was done in the Java programming language. The following of the animals in the field was done by means of GPS equipments and the animal activity was recorded by Ethosys equipments.

Bibliographie

- ARNOLD, G.W., DUDZINSKI, M.L., 1978. *Ethology of free-ranging domestic animals*, Elsevier.
- BAILEY, D.W., DUMONT, B., WALLIS DEVRIES, M.F., 1998. *Utilization of heterogeneous grasslands by domestic herbivores, theory to management*. Ann. Zootech., 47, p. 312-333.
- BALCI, O., WITHNER, R.B., 1989. *Guidelines for selecting and using simulation model verification techniques*. Winter Simulation Conference. p. 559-568.
- BRECKLING, B., MÜLLER, E., 1994. *Current trends in ecological modelling and the 8th ISEM conference on the state-of-the-art*, Ecological Modelling, vol. 75, p. 667-675.
- CAMPOS, A., HILL, D.R.C., 1998. *Web-based Simulation of Agent Behaviors*, SCS Western MultiConference on Computer Simulation, 1st International Conference on Web-Based Modeling & Simulation, San Diego CA, to be published.
- COQUILLARD, P., ET HILL, D.R.C., 1997. *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes*, Masson, Paris, p. 275.
- DE ANGELIS, D., GROSS, L. J., (EDS.), 1992. *Individual-based models and approaches in ecology : populations, communities, and ecosystems*, Chapman and Hall, New York.
- FERBER, J., 1995. *Les Systèmes Multi-Agents - vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris.
- FISHWICK, P., HILL, D.R.C., SMITH, R., EDITORS, 1998. "International Conference on Web-based Modeling and Simulation", SCS/ACM San Diego, Jan 11-14, p. 203.
- HILL, D.R.C., 1995. *Verification and Validation of Ecosystem Simulation Models*, In proceedings of the Summer Simulation Conference, July 24-26, Ottawa, Canada, p. 176-182.
- HILL, D.R.C., 1996. *Object-Oriented Analysis and Simulation*, Addison-Wesley.
- HILL, D.R.C., 1997. *Introduction à la Simulation par Objets*, L'objet / Hermes, Vol. 3, N° 1. p. 53-63.
- HUSTON, M., DE ANGELIS, D., POST, W., 1998. *New Computer Models Unify Ecological Theory*. Computer Simulation shows that many ecological patterns can be explained by interactions among individual organisms, BioScience vol. 38, no. 10, p. 682-691.
- MULLER, P.A., 1997. *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles.
- ORTH, D., CARRÈRE, P., LEFÈVRE, A., DUQUET, P., MICHELIN, Y., JOSIEN, E., LHOMME, G., 1998. *L'adjonction de chevaux aux bovins en conditions de sous-chargement modifie-t-elle l'utilisation de la ressource herbacée ?*, Fourrage, 153 : p. 125-138