

Simulation Multi-Agents de l'entretien du paysage par des herbivores en moyenne montagne

S. Mechoud (a), D.R.C. Hill (a), A. Campos (a), D. Orth (b), P. Carrere (c), D. Micol (d), C. Poix (b), Y. Michelin (b), P. Coquillard (e) et B. Dumont (d)

- a. ISIMA Campus des Cézeaux, B.P. 125, 63173 Aubière Cedex
- b. ENITA Clermont-Ferrand, 63370 Lempdes
- c. INRA Unité d'Agronomie, 234 Av. du Brézat, 63039 Clermont-Ferrand Cedex
- d. INRA Centre de Clermont-Ferrand/Theix, 63122 St-Genès-Champanelle
- e. LEVC Université d'Auvergne, B.P. 38, 63001 Clermont-Ferrand Cedex

E-mail : mechoud@sp.isima.fr, david.hill@sp.isima.fr, andre@sp.isima.fr, orth@gentianne.enitac.fr, carrere@clermont.inra.fr, micol@clermont.inra.fr, poix@gentianne.enitac.fr, michelin@gentianne.enitac.fr, coquillard@u-clermont1.fr & dumont@clermont.inra.fr

Résumé

L'abandon de l'utilisation des ressources herbagères pour le pâturage d'herbivores risque d'entraîner un appauvrissement de la diversité écologique. 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 la cadre d'un Groupement d'intérêt Scientifique, a 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). Cet article s'inscrit dans une démarche d'acquisition de méthodes afin d'expérimenter des techniques de gestion de pâturage mixte de bovins et de chevaux selon une hypothèse de complémentarité entre ces deux espèces d'herbivores. La partie informatique présentée vise à simuler les dynamiques animales, végétales et paysagères futures pour proposer des protocoles de gestion aptes à répondre à ces nouvelles demandes. Pour suivre et enregistrer les localisations des animaux dans 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. 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 UML et la version actuelle du logiciel est implémentée en Java.

Mots-clés : Simulation, Multi-Agents, Entretien du paysage, Herbivores, Moyenne montagne.

1. Introduction

Les types d'espaces qui sont 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, notamment pour prendre en compte d'éventuels changements climatiques rapides. 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 d'élevage plus faciles à contrôler s'appuyant sur des terres plus faciles à exploiter au détriment des systèmes fourrager 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

indésirables et ligneuses (genêts, calune, 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 rendent 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 à 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 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 pouvoir visualiser de manière très réaliste les résultats obtenus afin de pouvoir observer les impacts sur le paysage.

Un programme de recherche pluridisciplinaire [Michelin et al. 98] 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 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 Régional des Volcans d'Auvergne. Cet article focalisera sur un site géographique particulier que nous allons présenter.

2. Le système 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 humide. 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. Ce site est une plate-forme commune d'expérimentation pour le programme du GIS, et s'inscrit dans une démarche d'acquisition de méthodes afin d'expérimenter des techniques de gestion de pâturage mixte de bovins et de chevaux selon une hypothèse de complémentarité entre ces deux espèces d'herbivores. La partie informatique présentée vise à simuler les dynamiques animales, végétales et paysagères pour mieux comprendre les fonctionnements complexes de ce type de système et pour proposer des protocoles de gestion aptes à répondre à ces nouvelles demandes.

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 uniquement 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 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 [Micol 97] 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 jours. 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 ACCESS. Un premier travail de filtrage des données est alors nécessaire, les balises GPS pouvant parfois envoyer des localisations "fantaisistes". Les données de 1996 et 1997 ont un volume de plus de 300 méga-octets.



Fig. 1 et 2 : Garance et Marguerite, équipés de leur balise GPS et de leur collier ETHOSYS

3. Apport de la modélisation et de la simulation

L'intérêt pour les techniques de simulation est grandissant, il se justifie essentiellement par les possibilités de prédictions qui leurs sont associées, parfois à tort car le plus grand gain que l'on puisse retirer d'un modèle reste à notre avis l'augmentation de la connaissance des scientifiques qui ont collaboré à sa construction. Mais ne supprimons pas l'aspect prédictif trop vite ; sans qu'il soit nécessaire de traverser une crise financière, les économies restent de rigueur et il semble naturel d'élaborer des modèles prédictifs, que ce soit pour la météo, les marchés boursiers, la construction d'un stade, d'un avion, d'une usine ou d'un carrefour autoroutier. Par nécessité économique, le principal intérêt de la simulation réside donc dans sa capacité d'aide à la décision. De ce fait, les besoins en simulation connaissent actuellement une forte croissance, et, les techniques à objets graphiques et la réalité virtuelle aidant, l'engouement est certain. Il convient alors de ne pas négliger les aspects vérification et validation des modèles, sans quoi, les utilisateurs de modèles instructifs mais faussement prédictifs seraient échaudés et refuseraient 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 de comportement d'une race 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 prouvés leur utilité (chaînes de Markov par exemple), les modèles de simulation aléatoire fournissent des aides importantes pour la compréhension des phénomènes

biologiques et écologiques, et sont notamment indispensables pour l'étude de processus transitoires. D'une manière générale, la simulation 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 biologique, 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 technique dite de simulation visuelle interactive qui fait usage de techniques orientée-objets [Bell et O'Keefe 87] [Hill 96] [Coquillard et Hill 97].

4. Présentation du modèle de simulation

Le modèle conceptuel de simulation que nous proposons a été formalisé avec UML [Fowler et Scott 97] [Muller 97] [Booch 96] [Lai 97], et le logiciel est implémenté en Java [Arnold et Gosling 96] [Nicolas et al. 98] [MicroApp 96] [Eckel 98] pour des 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 et Hill 98] [Fishwick et al. 98].

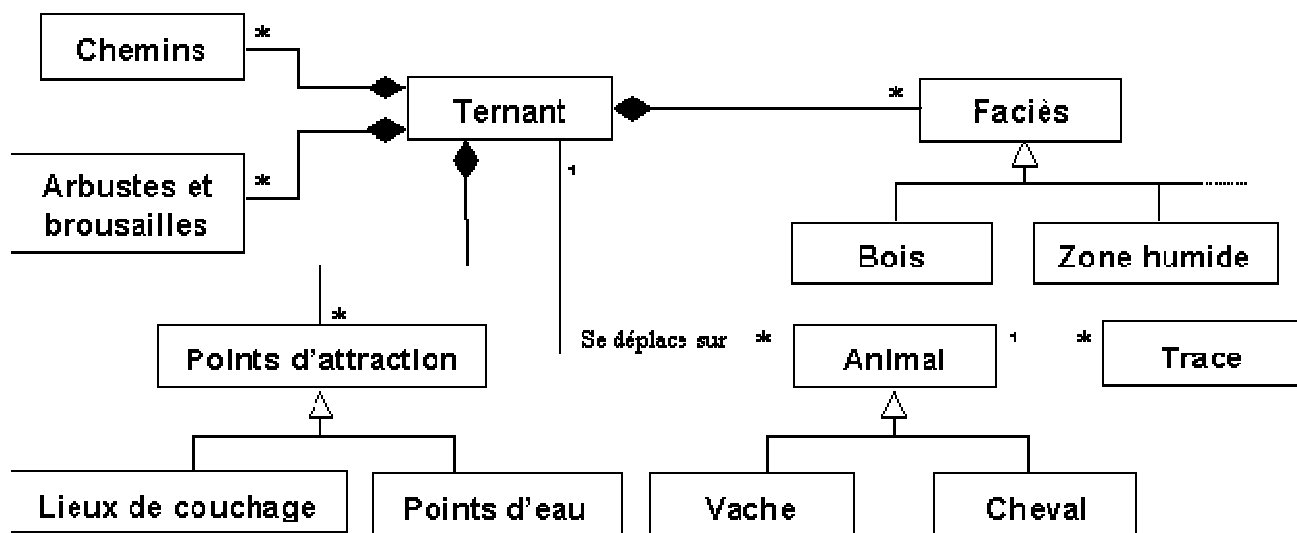


Fig. 3 : Diagramme des classes UML du modèle conceptuel de Ternant.

Le schéma conceptuel ci-dessus est volontairement épuré, pour mieux voir 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 couchages des animaux et les abreuvoirs. Ces points sont fixes, ce qui explique qu'ils ne dépendent pas des animaux. On trouve ensuite des animaux (vaches ou chevaux) qui pâturent sur ce terrain, se servant de ses différents composants (chemins, faciès, etc.) comme de 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.

La végétation (faciès) du terrain (chemins) ont été cartographiés et simplifiés. On ne retrouve donc que 8 faciès différents de végétation (hors zones boisées). Chaque faciès peut être composé de différentes espèces végétales, mais pour des raisons de simplification, on ne notera que l'espèce prédominante. La figure suivante est une vue de ces faciès, sur laquelle on a rapporté les clôtures du terrain, ainsi que les chemins.

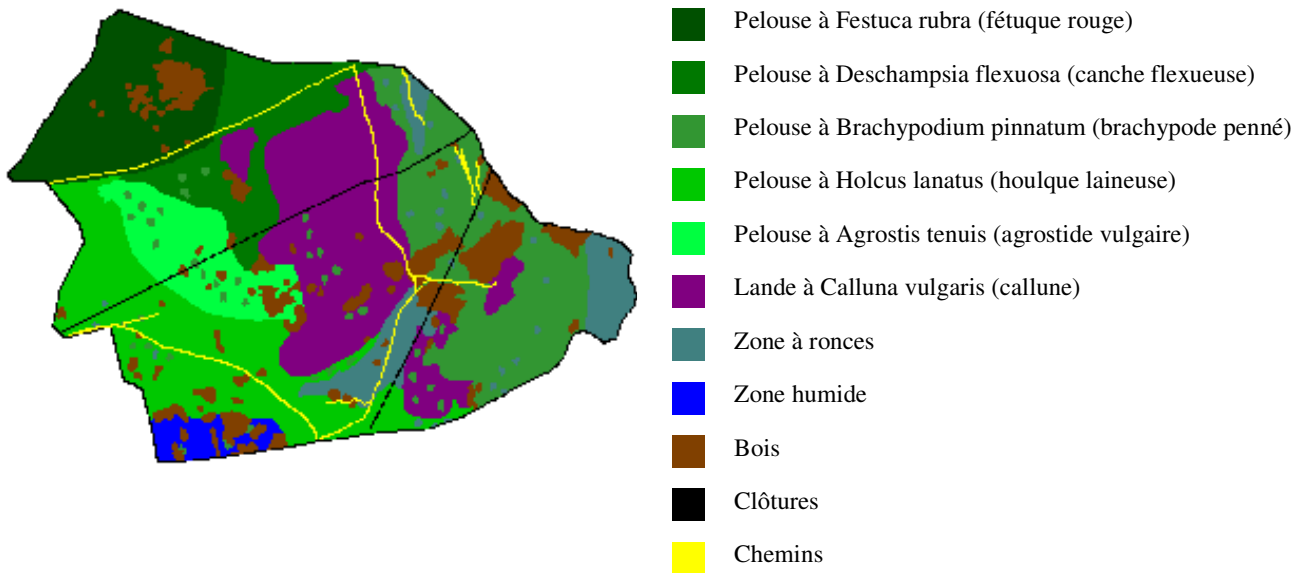


Fig. 4 : Les faciès de végétation et les chemins sur l'estive de Ternant

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 2 modes de fonctionnement seront précédés d'un 3^{ème}, destiné à l'analyse des données initiales.

Ces modes sont les suivants :

- 1^{er} mode : Etudier les trajets GPS et activités ETHOSYS [Micol 97] à des fins de compréhension et d'analyse. Ce mode permet de déterminer les lieux de passages des animaux, les lieux de pâtures favorisés, 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. Ces données sont ensuite utilisées dans le 3^{ème} mode de fonctionnement.
- 3^{ème} mode : Simuler l'impact de troupeaux sur l'estive à une échelle de temps plus large (inter-annuelle).

5. Les différentes utilisations du modèle de simulation

5.1. Analyses des données GPS et ETHOSYS (premier mode)

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 mode, l'utilisateur peut "relire" 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. Ces 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 couchages, abreuvoirs, etc.)
- les faciès de végétation préférés, en fonction de la période de l'année et de la race étudiée (vache, cheval ou vache "influencée" par la présence de chevaux).

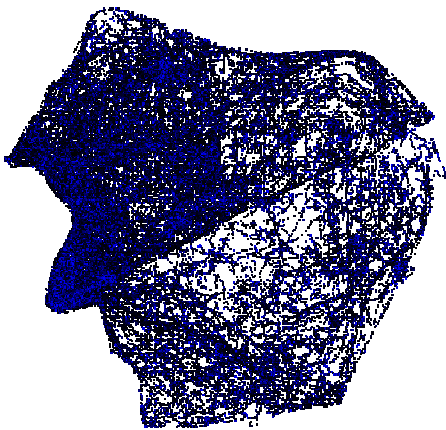


Fig. 5 : Carte de fréquentation issue des données GPS de 1997

La carte présentée ici est issue du cumul des traces relevées par GPS en 1997 pour les deux espèces. On distingue bien la séparation des 2 parcelles. La parcelle nord a été étudiée plus intensivement (les animaux ont été plus fréquemment équipés de balises GPS), ce qui explique la différence de densité de points.

On remarque aisément 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, après comparaison des 2 cartes, concorder avec les chemins de l'estive.

Ces informations déduites doivent ensuite être interprétées pour en extraire des règles de déplacement, de comportement et de défoliation correctes.

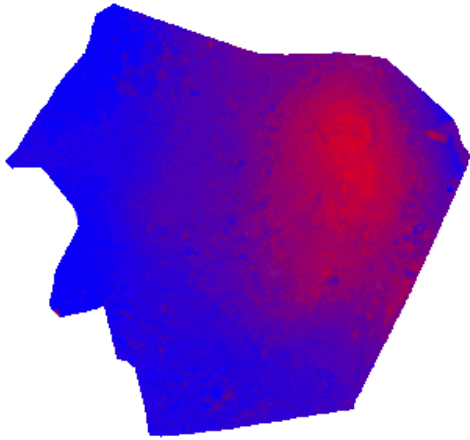
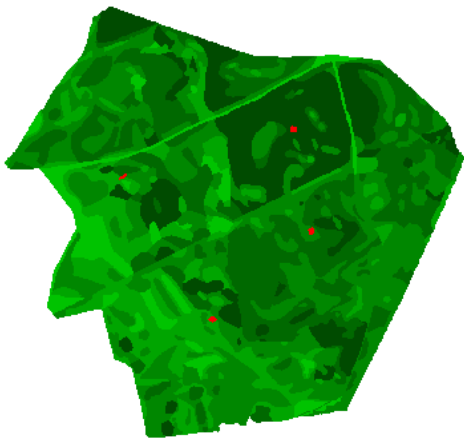


Fig. 6 : Topographie de l'estive

La carte topographique ci-contre nous apporte des éléments supplémentaires si on la compare avec la carte de fréquentation.

On note aisément que les zones de relief (en rouge) sont plutôt contournées que gravies, et que les zones les plus fréquentées sont les zones de plus basse altitude.



Cette carte de consommation a été constituée par des relevés effectués sur le terrain.

Les zones rouges représentent les mises en défends.

Les 5 niveaux de relevé (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%)

Fig. 7 : Carte de consommation de végétaux en 1997.

La carte de consommation ci-dessus 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. On remarque également que les trajets de pâturage suivent les chemins de l'estive. La zone de plus forte activité est la zone des points d'eau.

Une autre motivation importante des animaux est la qualité de l'herbe proposée. Cette qualité est notée par une valeur pastorale attribuée à chaque faciès de végétation ; une valeur élevée indique une meilleure qualité. La VP sera considérée constante pour des raisons de simplification.

Faciès de végétation	Valeurs pastorales	Taux d'abrouissement			
		Vaches		Mixte	
		Juillet	Aout	Juillet	Aout
Pelouse à <i>Holcus lanatus</i>	51	29	39	32	42
Pelouse à <i>Agrostis tenuis</i>	34	13	20	18	24
Pelouse à <i>Festuca rubra</i>	34	-	-	13	24
Zone humide	26	24	32	-	-
Pelouse à <i>Deschampsia flexuosa</i>	23	-	-	15	15
Zone à ronciers	19	20	19	-	-
Lande à <i>Calluna vulgaris</i>	11	8	15	7	7
Pelouse à <i>Brachypodium pinnatum</i>	5	7	21	15	18

Fig. 8 : Valeurs pastorales et taux d'abrouissement (%) des faciès végétaux en 1996 [Orth et al. 98].

Faciès de végétation	Valeurs pastorales	Taux d'abrouissement			
		Vaches		Mixte	
		Juillet	Aout	Juillet	Aout
Pelouse à <i>Holcus lanatus</i>	51	50	7	42	57
Pelouse à <i>Agrostis tenuis</i>	34	33	55	34	46
Pelouse à <i>Festuca rubra</i>	34	-	-	35	40
Zone humide	26	75	58	-	-
Pelouse à <i>Deschampsia flexuosa</i>	23	-	-	25	32
Zone à ronciers	19	34	47	48	49
Lande à <i>Calluna vulgaris</i>	11	25	36	24	29
Pelouse à <i>Brachypodium pinnatum</i>	5	39	48	29	36

Fig.9 : Valeurs pastorales et taux d'abrouissement (%) des faciès végétaux en 1997.

Les taux d'abrouissement des tableaux ci-dessus indiquent la consommation des faciès végétaux par les animaux. 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 et al. 98]. 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 certaines zones à 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 font plus de 2 mètres de haut, ce qui explique 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 la vitesse minimum, maximum et moyenne des animaux en fonction de leur race, 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.

5.2. Simulation multi-agents (second mode)

Dans le deuxième module, nous avons retenu l'idée d'une simulation basée sur des agents. Avec cette technique issue de l'Intelligence Artificielle distribuée et des modèles individus-centrés [Huston et al. 88] [De Angelis et Gross 92] [Breckling et Müller 94], 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 intégrant un comportement social. Le lecteur intéressé par ces

techniques pourra se reporter utilement aux travaux suivants : [Gasser et Briot 92] [Drogoul 93] [Tu et Terzopoulos 94] [Ferber 95] [Bousquet et al. 96] [Uhrmacher 97] [Hill et al. 98].

Chaque agent simulera 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 leur comportement et de leur perception [Bates 94] [Shoham 93]. Dans notre cas, nous utilisons la logique floue suivant la technique décrite dans [Campos et Hill 98].

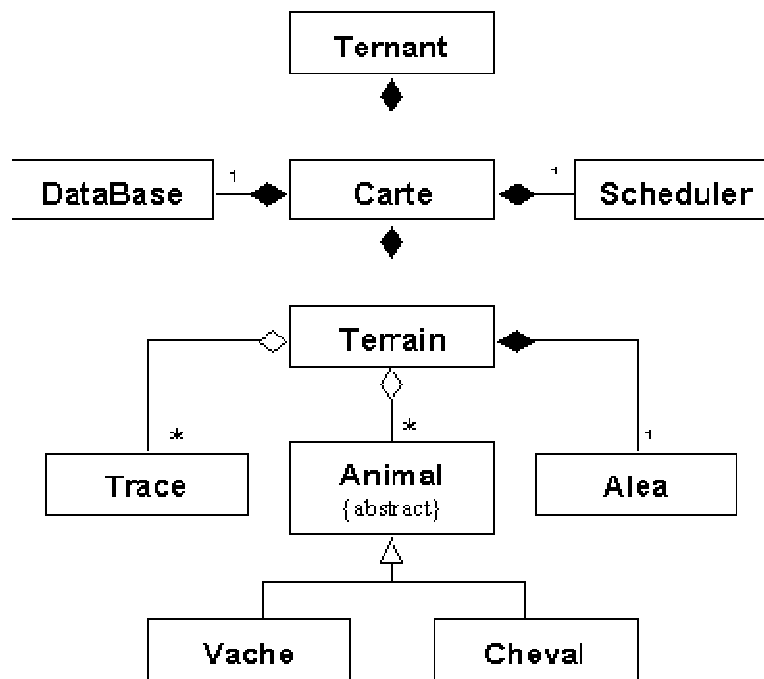


Fig. 10 : Diagramme UML des classes implémentées dans le modèle.

Le diagramme de classes ci-dessus présente les classes implémentées dans le logiciel pour le 2^{ème} mode. On notera l'apparition de classes " techniques " (DataBase, Scheduler, etc.) car nous sommes ici au niveau de la proposition d'une solution. La classe DataBase permet l'accès aux données Access pour lire et enregistrer des traces d'animaux, ou lire des paramètres. Le parallélisme de l'activité des animaux est implémenté à l'aide des threads de Java, la classe Scheduler gérant l'ordonnancement des différents animaux.

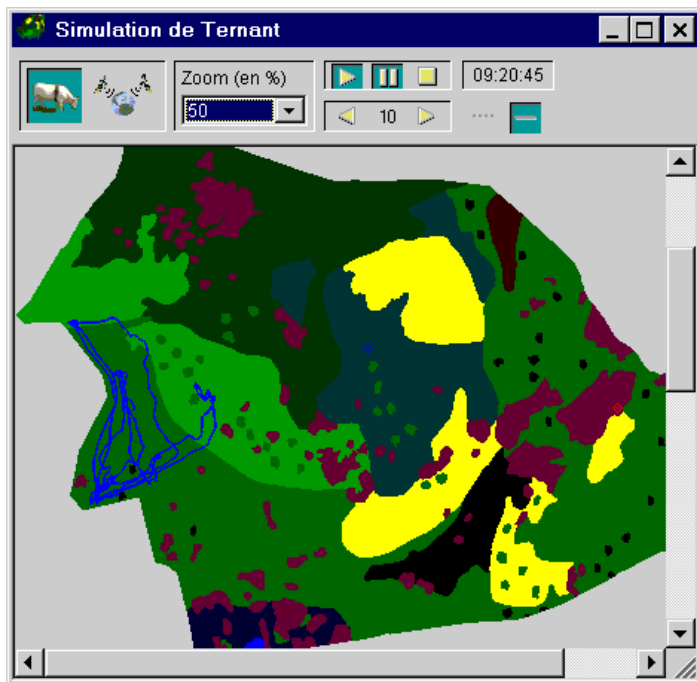


Fig. 11 : Simulation multi-agents en cours d'exécution.

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

5.2.1 Règles de comportement animal

Les règles de comportement de la simulation multi-agents sont issues 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 : [\[Arnold et Dudzinski 78\]](#) et de l'analyse des traces GPS et ETHOSYS (cf. 5.1). Elles peuvent également être le fruit du simple bon sens. Il existe 3 grandes classes de règles : la dynamique de la végétation (croissance et sénescences de la végétation, etc.), les règles de déplacement des animaux 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 utilisée dans le modèle. Il est cependant reconnu qu'il influence fortement le comportement des animaux [\[Arnold et Dudzinski 78\]](#). Par exemple, en cas de températures chaudes, 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.

5.2.2 Paramétrage du modèle

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 paramètres 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 race, 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.

5.2.3 Données issues de la simulation

On conservera les informations générées par chaque simulation (sous forme de traces identiques aux traces GPS) dans une table Résultats de la base de données. 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.

Ces cartes calculées permettent, par comparaison avec celles déjà existantes ou obtenues dans le 1^{er} module du simulateur, et si les traces la composant ont été créées avec des paramètres adaptés, de vérifier la cohérence de fonctionnement de ce mode. 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.

5.3. Simulation du troupeau (troisième mode)

Cette troisième partie du logiciel est encore en cours de conception, mais ses grandes lignes sont déjà fixées. Dans ce mode de fonctionnement, le programme utilise un pas de temps plus large (de l'ordre du mois) et simule la dynamique de la végétation (croissance et sénescence des plantes). La première classe de règle citée en 5.2.1 (Dynamique de la végétation) est donc appliquée. On ne se soucie plus des animaux isolés ; on considère le troupeau comme un ensemble ayant un comportement propre, qui se déplace sous la forme d'une amibe et influe sur la parcelle et sa végétation.

Le comportement global du troupeau est déduit des données issues du 2^{ème} mode de fonctionnement. L'analyse des traces laissées par un ensemble d'individus pâturant ensemble dans la même simulation, et non plus alors la simple agrégation de traces obtenues lors de plusieurs réplifications, permet de déduire des règles de déplacement d'un troupeau en fonction de ses paramètres (nombre d'individus, race, etc.), des règles de pâturage (pression de pâture moyenne par individu), ainsi que les inter-actions éventuelles liées à la présence d'un troupeau de race différente. 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 ce mode de fonctionnement par rapport au 2^{ème} mode 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. Un temps de simulation aussi grand n'est bien sûr pas envisageable si l'on étudie un ensemble de plusieurs individus différents. L'évolution de la végétation se fait de différentes manières (au niveau du simulateur) : augmentation de la biomasse (masse de matière sèche sur une surface donnée) pour chaque faciès, accroissement (ou régression) de la surface occupée par les ronces et ligneux, développement des jeunes arbustes, etc. Ce module intégrera donc des règles de croissance végétale, et donnera en sortie des informations sur l'évolution de la végétation, en prenant ou non en compte les actions des animaux. Ces évolutions pourront être ensuite comparées à ce qui se mesure sur le terrain.

5.4. 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 survécues 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 variables 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 [\[Balci 89\]](#). 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, réexaminer 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 [\[Hill 95\]](#). 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 [\[Hill et al. 96\]](#) [\[Coquillard et Hill 97\]](#).

Parmi les techniques de vérifications 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). Pour réaliser une animation

d'une minute, plus de 1500 heures de calcul sont nécessaires. Les aspects de rendu réalistes 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.

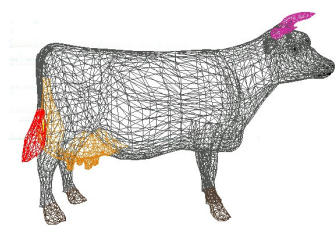


Fig. 12 : Maillage d'une vache en 3D

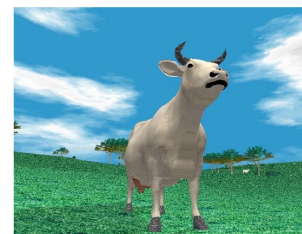
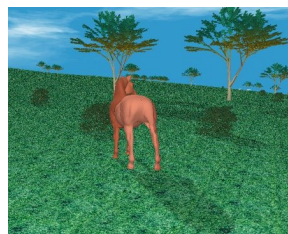
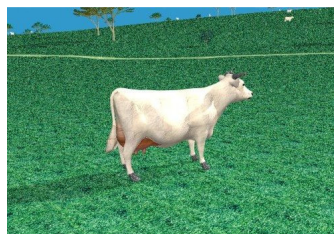


Fig. 13 à 15 : Exemples d'images d'animaux calculées, sur une synthèse du terrain.

6. Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes efforcés de décrire la conception et la réalisation d'un logiciel de simulation basé sur des techniques multi-agents. Nous avons tout d'abord insisté sur la difficulté de la collecte et du tri des informations 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 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 à cause 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 grégaires 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 importante pour faire 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 subies des limitations liées aux contraintes informatiques. Notamment, le développement a été initialisé en 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 concernent principalement la conception et le développement du dernier module du simulateur (Simulation de troupeaux sur un intervalle de temps important). Ce module incorporera non seulement le comportement des troupeaux d'animaux, mais également la dynamique de la végétation. Une autre évolution d'envergure prévue concerne la prise en compte du climat dans la détermination du comportement des animaux et des troupeaux. Pour permettre une visualisation réaliste de la simulation et des résultats, nous envisageons également une visualisation en 3 dimensions à base de VRML. Cette partie est actuellement à l'étude sur station Silicon Graphics.

Références

- [Arnold et Dudzinski 78] Arnold G.W., Dudzinski M.L., *Ethology of free-ranging domestic animals*, Elsevier, 1978.
- [Arnold et Gosling 96] K.Arnold, J.Gosling, *The Java Programming Language*, Addison-Wesley, 1996.
- [Balci 89] Balci O., Withner R.B., *Guidelines for selecting and using simulation model verification techniques*, Winter Simulation Conference. pp. 559-568, 1989.
- [Bates 94] Bates J., *The role of Emotion in Believable Agents*, Communications of the ACM, vol. 37, n° 7, pp. 125, 1994
- [Bell et O'Keefe 87] P.C.Bell, R.M.O'Keefe, *Visual Interactive Simulation : History, recent developments and major trends*, Simulation, vol.49, no 3, pp.109-116, 1987.
- [Booch 96] Booch G., *The Unified Modeling Language*, Unix Review, pp. 41-48, December 1996.
- [Bousquet et al. 96] Bousquet F., Duthoit Y., Proton H., Weber J., *Tragedy of the Commons, Game Theory and Spatial Simulation of Complex Systems*, in Ecological Economics, pp.1-8, may 1996.
- [Breckling et Müller 94] Breckling B., Müller F., *Current trends in ecological modelling and the 8th ISEM conference on of-the-art*, Ecological Modelling, vol. 75, pp. 667-675, 1994.
- [Campos et Hill 98] Campos A., Hill D., *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, January 1998.
- [Coquillard et Hill 97] Coquillard P., Hill D., *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes*, Masson, Paris, 1997.
- [De Angelis et Gross 92] De Angelis D., Gross L. J., (Eds.), *Individual-based models and approaches in ecology : population communities, and ecosystems*, Chapman and Hall, New York. 1992.
- [Doram 97] Doram J., *From Computer Simulation to Artificial Societies*, TRANSACTIONS of SCS, vol. 14, pp. 69-77, June 1997.
- [Drogoul 93] Drogoul A., *De la Simulation Multi-Agent à la Résolution Collective de Problèmes*, PhD. Thesis University of Paris VI, 1993.
- [Eckel 98] Eckel B., *Thinking in Java*, Prentice Hall, 1998.
- [Ferber 95] Ferber J., *Les Systèmes Multi-Agents - vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris 1995.
- [Fishwick et al. 98] Fishwick P., Hill D., Smith R., "International Conference on Web-based Modeling and Simulation", SCS/ACM San Diego, Jan 11-14, 203 p., 1998.
- [Fowler et Scott 97] Fowler M., Scott K., "UML Distilled", Addison-Wesley Longman, 1997.
- [Gasser et Briot 92] Gasser L., Briot J.P., *Object-Based Concurrent Programming and DAI*, in Avouris N.M., Gasser L. Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis. Kluwer Academic Press, Dordrecht, pp.81-100, 1992.
- [Hill 95] Hill D.R.C., *Verification and Validation of Ecosystem Simulation Models*, In proceedings of the 1st Simulation Conference, July 24-26, Ottawa, Canada, pp. 176-182, 1995.
- [Hill 96] Hill D., *Object-Oriented Analysis and Simulation*, Addison-Wesley, 1996.
- [Hill 97] Hill D.R.C., *Introduction à la Simulation par Objets*, L'objet / Hermes, Vol. 3, N° 1. pp. 53-63, 1997.
- [Hill et al. 96] Hill D.R.C., Mazel C., Coquillard P., *Integrating V&V in the object-oriented life cycle of ecological modelling simulation projects*. 8th European Simulation Symposium 96 , Oct. 24-26, Genova (Italy), Volume II pp. 21-25, 1996.
- [Hill et al. 98] Hill D., Dumont B., Roux C., *Modeling Spatial Memory of Sheep at Pasture with Multi-Agents*, to be published in European Simulation Symposium, Manchester UK, June 16-19 1998.

- [Huston et al. 88] Huston M., De Angelis D., Post W., *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, pp. 682-691, 1988.
- [Lai 97] Lai M., *UML, la notation unifiée de modélisation objet*, InterEditions, 1997.
- [Michelin et al. 98] Michelin Y., Orth D., L'Homme G., Coquillard P., Gueugnot J., Hill D., Micol D., Loiseau P., L Carrère P., Teuma M., *Gestion des espaces enfrichés par des bovins et des équins : Présentation recherche pluridisciplinaire*, Fourrage n° 153, 1998.
- [Micol 97] Micol D., *Gestion de la végétation et entretien des milieux par les herbivores en moyenne montagne : approche expérimentale et modélisation*, présentation du G.I.S., dossiers de l'environnement de l'INRA, 1997.
- [Muller 97] Muller P.A., *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles, 1997.
- [Nicolas et al. 98] Nicolas C., Avare C., Najman F., *Java client-serveur*, Eyrolles, 1998.
- [Orth et al. 98] Orth D., Carrère P., Lefèvre A., Josien E., L'Homme G., *Does mixed grazing by cattle and horse herbage utilisation under an extensive management ?*, 1998.
- [Shoham 93] Shoham Y., *Agent-Oriented Programming*, in Artificial Intelligence, vol. 60, no. 1, pp. 51-92, 1993.
- [Tu et Terzopoulos 94] Tu X., Terzopoulos D., *Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception and Behavior*, proc. of SIGGRAPH'94, ACM Press, pp. 43-50, Orlando Florida, July 1994.
- [Uhrmacher 97] Uhrmacher A.M., *Concepts of Object and Agent-Oriented Simulation*, TRANSACTIONS of SCIENCE OF COMPUTING, vol. 1, no. 2, pp. 59-67, June 1997.