

Institut National Agronomique  
Paris - Grignon

Institut National de la Recherche  
Agronomique

## MEMOIRE

Présenté par **Marie FAYEIN**  
Spécialisation : **AGER** (Agronomie – Environnement)

# **Elaboration d'un outil d'accompagnement de projets d'aménagements pour la prévention des incendies de forêt**

Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome de l'INA P-G

Maître de stage : Michel ETIENNE (Unité d'Ecodéveloppement, Avignon)

- Enseignant responsable : Louis-Marie BRESSON

Soutenu le 24 septembre 2003

---

# Sommaire

|               |   |
|---------------|---|
| Remerciements | 1 |
| Introduction  | 2 |

## Première partie : Contexte, problématique et démarche

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. La problématique des incendies de forêt en région méditerranéenne</b>                                       | <b>3</b> |
| 1.1. Présentation de la forêt méditerranéenne   | 3        |
| 1.1.1. Du point de vue de la végétation   | 3        |
| 1.1.2. Du point de vue des usages   | 3        |
| 1.2. Un milieu très combustible   | 4        |
| 1.3. Les enjeux de la prévention des incendies  | 4        |
| <b>2. Que faire pour prévenir le risque d'incendie ?</b>  | <b>5</b> |
| 2.1. La politique de défense des forêts contre l'incendie   | 5        |
| 2.1.1. Les outils réglementaires  | 5        |
| 2.1.2. Les coupures de combustibles   | 5        |
| 2.2. Le rôle du sylvopastoralisme dans la défense des forêts contre l'incendie                                    | 6        |
| 2.2.1. Les modalités d'intégration de l'élevage   | 7        |
| 2.2.2. Les aménagements pastoraux réalisés sur les coupures   | 7        |
| 2.2.3. Intérêt et efficacité du pâturage  | 8        |
| <b>3. Présentation et objectif de l'étude</b>   | <b>9</b> |
| 3.1. Présentation des systèmes multi-agents et intérêt d'un modèle de simulation comme outil d'aide à la décision | 9        |
| 3.2. Objectif du stage et démarche suivie   | 9        |

## Deuxième partie : Outils et méthode

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Présentation du système multi-agents Sylvopast</b>         | <b>11</b> |
| 1.1. A quoi sert ce modèle ?                                     | 11        |
| 1.2. Les éléments constituant ce modèle                          | 11        |
| 1.2.1. L'espace de simulation                                    | 11        |
| 1.2.2. Les agents et dynamiques naturelles                       | 12        |
| 1.2.3. Les incendies   | 12        |
| 1.3. Les données d'entrée et de sortie                           | 12        |
| <b>2. Le jeu de rôle SylvopastJeu</b>                            | <b>12</b> |
| 2.1. Présentation du jeu de rôle                                 | 13        |
| 2.1.1. Comment fonctionne le jeu ?                               | 13        |
| 2.1.2. Dans quel cas est-il utilisé ?                            | 13        |
| 2.2. L'analyse des parties de jeu de rôle                        | 13        |
| 2.2.1. Des parties rejouées                                      | 14        |
| 2.2.2. Réalisation d'une base de données de tous les indicateurs | 14        |
| <b>3. Une prise de connaissance du milieu méditerranéen</b>      | <b>14</b> |
| 3.1. La végétation   | 14        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2. Les aménagements DFCI _____                                 | 15        |
| <b>4. Des entretiens avec des gestionnaires forestiers _____</b> | <b>15</b> |
| 4.1. Choix des personnes rencontrées _____                       | 15        |
| 4.2. Préparation et déroulement des entretiens _____             | 15        |
| 4.2.1. Réalisation des supports d'entretien _____                | 15        |
| 4.2.2. Un travail de réflexion DFCI _____                        | 16        |

### Troisième partie : Premiers résultats et construction du modèle

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Choisir les différents éléments qui vont constituer le modèle _____</b>                      | <b>17</b> |
| 1.1. Les incendies _____   | 17        |
| 1.1.1. Naissance et propagation d'un incendie _____  | 17        |
| 1.1.2. Influence d'un troupeau _____   | 17        |
| 1.2. Les dynamiques végétales _____  | 17        |
| 1.2.1. La strate arbustive _____   | 17        |
| 1.2.2. La strate herbacée _____  | 18        |
| 1.3. Les acteurs et leurs actions _____  | 19        |
| 1.3.1. Les forestiers : gestionnaires de la forêt _____  | 19        |
| 1.3.2. Les bergers : acteurs du pastoralisme _____   | 20        |
| <b>2. Comprendre le comportement du berger et du forestier _____</b>                               | <b>20</b> |
| 2.1. Quelles sont les relations et rapports de force entre berger et forestier ? _____             | 21        |
| 2.2. Comment les acteurs voient-ils la forêt ? _____   | 21        |
| 2.2.1. Le berger : quartier ou circuit _____   | 21        |
| 2.2.2. Le forestier : parquet ou massif _____  | 22        |
| 2.3. Comment le berger gère-t-il son troupeau ? _____  | 22        |
| 2.3.1. Un berger va-t-il capitaliser sur son troupeau ? _____                                      | 22        |
| 2.3.2. L'achat d'animaux est-il régi par le capital du berger ? _____                              | 23        |
| 2.3.3. L'achat d'animaux a-t-il une relation avec la valeur pastorale de la forêt ? _____          | 23        |
| 2.4. Quels sont les objectifs des travaux ? _____  | 24        |
| 2.4.1. Quelles sont les cellules qui subissent le plus de travaux ? _____                          | 24        |
| 2.4.2. Quels sont les travaux demandés par le berger et comment gère-t-il sa participation ? _____ | 25        |
| 2.4.3. Quels sont les travaux réalisés par le forestier ? _____                                    | 25        |
| 2.5. Comment se raisonne l'implantation d'une coupure de combustible ? _____                       | 27        |
| 2.5.1. Objectif d'une coupure de combustible _____   | 27        |
| 2.5.2. Les éléments nécessaires au raisonnement _____  | 28        |
| 2.5.3. Localisation des coupures de combustible _____  | 28        |
| 2.5.4. Etude d'un exemple _____  | 29        |
| <b>3. Une étape indispensable : la formalisation _____</b>   | <b>29</b> |
| 3.1. Le fonctionnement de la forêt _____   | 30        |
| 3.1.1. L'embroussaillage _____   | 30        |
| 3.1.2. Le climat _____   | 30        |
| 3.1.3. La pousse de l'herbe _____  | 30        |
| 3.2. Des acteurs aux agents virtuels _____   | 31        |
| 3.2.1. Les relations entre acteurs _____   | 32        |
| 3.2.2. L'organisation de l'espace _____  | 32        |
| 3.2.3. Le pâturage en forêt _____  | 33        |
| 3.2.4. La construction des listes de cellules à améliorer _____                                    | 34        |
| 3.2.5. La phase de négociation _____   | 35        |
| 3.2.6. La réalisation des travaux _____  | 36        |

---

## Quatrième partie : Simulations, analyse des résultats et discussion

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.Présentation des scénarios des différentes simulations effectuées</b> | <b>38</b> |
| 1.1.Concernant la végétation de la forêt                                   | 38        |
| 1.1.1. <i>Une forêt vierge de toute intervention</i>                       | 38        |
| 1.1.2. <i>Une forêt pâturée</i>  | 38        |
| 1.2.Concernant le comportement des acteurs                                 | 39        |
| 1.2.1. <i>Un forestier dominant</i>  | 39        |
| 1.2.2. <i>Un berger dominant</i>   | 39        |
| 1.2.3. <i>Une gestion sylvopastorale</i>                                   | 39        |
| <b>2.Analyse et interprétation des résultats issus des simulations</b>     | <b>40</b> |
| 2.1.Du modèle Sylvopast  | 40        |
| 2.1.1. <i>La broussaille : un élément contrôlable de la forêt</i>          | 40        |
| 2.1.2. <i>L'herbe : une ressource fragile</i>                              | 41        |
| 2.2.Du modèle SylvopastJeu   | 43        |
| 2.2.1. <i>Commentaire des cartes</i>                                       | 43        |
| 2.2.2. <i>Evolution de la quantité de fourrage</i>                         | 44        |
| 2.2.3. <i>Evolution du nombre de cellules bleues</i>                       | 44        |
| 2.2.4. <i>Evolution de la diversité</i>                                    | 46        |
| 2.2.5. <i>Conclusion</i>   | 47        |
| <b>3. Limites du modèle et propositions d'amélioration</b>                 | <b>47</b> |
| 3.1. La variabilité entre les différentes simulations d'un même scénario   | 47        |
| 3.2. La dynamique de végétation  | 48        |
| 3.3. Les incendies   | 49        |
| 3.4. Le comportement du berger   | 49        |
| 3.5. Validation du calibrage   | 50        |
| <br>   |           |
| <b>Conclusion</b>  | <b>51</b> |
| <b>Lexique des sigles</b>  | <b>52</b> |
| <b>Bibliographie</b>   | <b>74</b> |

Annexe

---

---

## Résumé

Un système multi-agent, appelé Sylvopast, a été développé afin de simuler l'impact de différentes gestions sylvopastorales sur le risque d'incendie. L'idée de faire un tel modèle résulte de la nécessité de gérer de manière préventive les forêts méditerranéennes face aux incendies et de proposer un outil d'aide à la décision pour réaliser des aménagements en ce sens. Ce SMA s'est basé sur deux modèles existants qui ont été complétés à partir de données concernant la végétation (croissance de l'herbe et embroussaillage), d'entretiens avec des gestionnaires forestiers et d'analyses de jeux de rôle. Ils ont ensuite été testés suivant plusieurs scénarios correspondant aux différents modes de gestion et types de pratiques des acteurs actuellement observés.

Les résultats de ces simulations montrent que seule une gestion collective entre berger et forestier permet de protéger efficacement la forêt contre le feu. L'impact des travaux est également jugé sur d'autres indicateurs tels que la biodiversité, la quantité de fourrage disponible ou la production de bois. L'utilisation du modèle Sylvopast permettra d'accompagner les différents acteurs de la gestion forestière dans le processus de concertation et de réflexion face aux problèmes qu'ils rencontrent, et de les aider dans leur prise de décision collective.

---

## **Abstract**

A multi-agent system, called Sylvopast, was developed to simulate the impact of silvopastoral management on fire hazard. The goal of such a model is to respond to the need for managing Mediterranean forests in a preventive way against fire, and for proposing a decision-support tool for silvopastoral management planning. This MAS, based on two existing models, was completed thanks to several data on vegetation dynamics, interviews to forest managers, and analysis of a role-playing games. A set of scenarios, based on different management ways and agents' practices currently observed, were tested and composed.

The outputs of the simulations emphasise that only a collective management between shepherds and foresters makes it possible to effectively protect forest against fire. Indicators, such as biodiversity, available forage or timber production, were used to measure the consequences of forest operations. The Sylvopast model will permit to support negotiation and discussion between agents involved into the forest management process, and to help them in their collective decision-making.

## Remerciements

Avant de vous présenter ce rapport, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce stage à l'INRA et à mener à bien mon mémoire de fin d'études.

Je voudrais en particulier citer :

- toutes les personnes travaillant à l'unité d'Ecodéveloppement, qui m'ont permis de travailler dans une ambiance agréable,
- les différentes personnes avec qui j'ai réalisé mes entretiens, ou que j'ai rencontrées lors de réunion, pour toutes les informations qu'elles m'ont fournies,
- Christophe Le Page, chercheur modélisateur au Cirad de Montpellier, pour son aide précieuse dans le débogage de nos modèles, et Pierre Ruffez son stagiaire pour ses idées foisonnantes sur les agents virtuels,
- enfin, Michel Etienne, qui m'a aidé tout au long de ces six mois à faire ce que doit faire tout bon chercheur : se poser les bonnes questions !

## Introduction

Le 18 juillet 2003, 10000 hectares de forêt ont été ravagés par un incendie dans le massif des Maures (Var). Ce genre d'incendie reste exceptionnel par son ampleur ; cependant chaque année, quelques dizaines de milliers d'hectares de forêt brûlent en région méditerranéenne. Ceci entraîne certes des pertes forestières mais également des pertes économiques, écologiques et paysagères. Face à ce phénomène, inhérent à la forêt méditerranéenne, des actions de prévention et de lutte ont vu le jour dans les années 90. La politique de défense des forêts contre les incendies (DFCI) a évolué vers une meilleure gestion de l'espace forestier afin de prévenir au maximum les incendies et de pouvoir lutter efficacement en cas de départ de feu. Or, la mise en place d'aménagements DFCI fait intervenir un grand nombre d'acteurs, que ce soit les pompiers, les gestionnaires forestiers, les collectivités territoriales, etc. La prise de décision se doit donc d'être collective afin de tenir compte des attentes de chacun et surtout d'adapter au mieux les aménagements au massif forestier considéré (Couix, 1994).

L'intervention de la recherche dans la mise en place de ces aménagements se traduit d'une part par l'expérimentation d'aménagements de prévention, d'autre part par le développement de modèles de simulation pouvant servir d'appui aux prises de décision collective. Depuis deux ans, ces systèmes multi-agents (SMA), élaborés à partir d'une plate-forme développée par des chercheurs du CIRAD, tentent d'être couplés à des jeux de rôle dans le cadre de l'accompagnement de projets de gestion de ressources naturelles (Barreteau *et al.*, 2003). Mon stage s'est déroulé à l'Unité d'Ecodéveloppement de l'INRA d'Avignon dans le cadre d'un projet mené par Michel Etienne. Ce projet, déposé auprès du GIS Incendies de forêts, porte sur l'application de cette méthode de couplage à la gestion de la forêt et a pour but de proposer un outil d'aide à la décision dans l'élaboration de plans d'aménagement pour la prévention des incendies de forêt en région méditerranéenne.

Ce rapport est composé de quatre grandes parties : la première présente le contexte général de l'étude et précise la problématique de mon stage et la démarche suivie, la deuxième partie expose les différents outils que j'ai utilisés pour effectuer mon travail, la troisième partie rapporte mes premiers résultats nécessaires à l'élaboration du modèle et les différentes étapes de construction de celui-ci, enfin la quatrième et dernière partie contient les différents scénarios testés par simulation.

## Première partie : Contexte, problématique et démarche

### 1. La problématique des incendies de forêt en région méditerranéenne

#### 1.1. Présentation de la forêt méditerranéenne

Avant tout, il est nécessaire de préciser ce que nous entendons par l'expression région méditerranéenne. Cette région englobe tout le pourtour méditerranéen, depuis les Alpes jusqu'aux Pyrénées, en passant par la Provence, la Camargue, le Languedoc sans oublier la Corse.

##### 1.1.1. Du point de vue de la végétation

Du fait de son aire géographique étendue, la forêt méditerranéenne est de **composition variable** suivant les régions, des différences apparaissant notamment entre les régions montagneuses et celles de plaine. Le terme de forêt méditerranéenne recoupe **l'ensemble des forêts, maquis, garrigues et landes** situés dans la région décrite précédemment.

Si nous considérons la région Provence Alpes Côte d'Azur, nous pouvons regrouper les essences d'arbres en trois catégories suivant la surface qu'elles recouvrent :

- trois essences à plus de 200.000 hectares chacune : pin sylvestre, chêne pubescent et pin d'Alep
- deux essences entre 75.000 et 100.000 hectares : chêne vert et mélèze
- quatre essences entre 35.000 et 50.000 : chêne liège, hêtre, pin maritime et pin noir d'Autriche
- Le reste se répartit entre plusieurs essences dont les plus importantes en surface sont : sapin pectiné, pin à crochets, épicéa commun, peupliers, pin pignon et châtaigner.

Naturellement, chaque essence a son aire de répartition et des variantes peuvent apparaître au sein des forêts des autres régions méditerranéennes (CRPF Région PACA, 1990).

Les **arbustes** jouent également un rôle important dans la forêt méditerranéenne. Les espèces dominantes les **garrigues** ou les **maquis** sont les cistes (ciste cotonneux, ciste de Montpellier, ciste à feuille de sauge...), les filaires, les genêts, les genévriers, le chêne kermès, les plantes aromatiques (thym, romarin...), l'arbousier, etc.

Cette forêt méditerranéenne, qui couvre aujourd'hui plus de trois millions d'hectares, ne cesse de **poursuivre son extension** malgré la fréquence des incendies (Etienne, 1996). En effet, l'abandon des espaces pastoraux et la déprise agricole favorisent l'avancée de la forêt et la fermeture des milieux (Etienne *et al.*, 1998).

##### 1.1.2. Du point de vue des usages

Nous voyons émerger depuis quelques années de nouvelles fonctionnalités de la forêt. La **protection** des paysages et du patrimoine naturel, la **conservation** ou la restauration de la biodiversité, la diversification des usages et le développement de nouvelles productions liées aux activités de récréation sont les nouveaux objectifs de la gestion actuelle de la forêt, qu'il

faut concilier avec les **usages traditionnels** qui perdurent comme par exemple la chasse ou la récolte de champignons (Etienne, 1990 b).

Ainsi, la pratique de la chasse et la prise en compte des **valeurs récréatives** telles que la cueillette, la randonnée, et non marchandes telles que l'accueil et le paysage se développent de plus en plus aux dépens des objectifs traditionnels de croissance et de valeur marchande (récolte du chêne liège dans les suberaies, coupe de bois de chauffe...) (Aussibal *et al.*, 1995).

## 1.2. Un milieu très combustible

Bien que les facteurs naturels n'expliquent entièrement ni les causes des incendies ni leur ampleur, ils sont tels que la forêt méditerranéenne est beaucoup plus soumise à des risques d'incendie que les autres forêts françaises. En effet la caractéristique principale de cette forêt est son extrême combustibilité ou tout du moins sa forte sensibilité aux incendies.

Le risque d'incendie est tout d'abord conditionné par la **combustibilité** et l'**inflammabilité** de chacune des espèces composant les forêts plus ou moins dégradées. L'inflammabilité est la capacité d'un végétal à s'enflammer facilement. De manière plus précise, l'inflammabilité est la quantité d'énergie nécessaire pour qu'il y ait décomposition thermique totale de la matière végétale. Celle-ci débute par la vaporisation de l'eau libre et liée et des huiles essentielles, et se poursuit par la décomposition de la matière desséchée en un mélange gazeux qui s'enflamme en présence d'une flamme nue ou d'un point chaud. La combustibilité est la propriété qu'un végétal a de brûler. Les espèces très inflammables sont par exemple le pin maritime ou le chêne vert, et la plupart des espèces arbustives de la garrigue ou du maquis. (Valette, 1990).

Ce phénomène est de plus renforcé par des **conditions climatiques** favorables au départ et à la propagation du feu tel qu'un fort vent, des températures élevées, une grande sécheresse de l'air et des précipitations irrégulières souvent orageuses. En effet la période chaude, en été, est sèche et en zone littorale, on peut distinguer 1 ou 2 mois secs selon les stations. Il faut ajouter à cela, l'extrême violence du mistral qui affecte la vallée du Rhône et les zones littorales.

Le développement des incendies suit deux tendances opposées : lorsque les conditions climatiques sont extrêmes le nombre moyen d'hectares brûlés en une année est supérieur à 50000, alors qu'il oscille autour de 11000 les autres années (Etienne, 1996).

## 1.3. Les enjeux de la prévention des incendies

Comme nous l'avons vu précédemment, les enjeux de cette prévention ne sont pas économiques au sens classique du terme, les activités productrices étant très faibles dans cette région et les filières bois peu développées. Cependant, la protection de la forêt contre les incendies est un enjeu économique dans le sens où elle permet parfois de re-dynamiser localement des régions par des actions sylvopastorales qui font intervenir des éleveurs, en sécurisant et en ouvrant les milieux ce qui favorise le tourisme, etc.

Ainsi les nouveaux objectifs de la forêt conditionnent son aménagement et **sa gestion collective** dans la lutte contre les incendies. Les nouvelles formes d'aménagement favorisent désormais plutôt une diversité des milieux. L'hétérogénéité se joue sur des discontinuités horizontales et verticales de la végétation ce qui la rend plus accessible, plus facile à gérer et plus résistante à la progression du feu (Etienne, 1996).

## 2. Que faire pour prévenir le risque d'incendie ?

Depuis les grands incendies des années 80, les orientations prioritaires de la politique de défense des forêts contre l'incendie (DFCI) sont le renforcement de la gestion spatiale du risque, la réduction des causes de feu, la mise aux normes des équipements et le renforcement de la surveillance. Elles mettent en avant l'intérêt de juxtaposer parcelles boisées, parcelles débroussaillées et parcelles agricoles et le compartimentage des massifs forestiers par la mise en place de discontinuités appelées coupures de combustible.

### 2.1. La politique de défense des forêts contre l'incendie

#### 2.1.1. Les outils réglementaires

La France s'est dotée d'outils réglementaires pour favoriser la mise en place de ces aménagements DFCI. Parmi ceux-ci, nous pouvons distinguer les plans intercommunaux de débroussaillage et d'aménagement forestier (PIDAF) et les plans de gestion départementaux contre les incendies.

##### *Plan intercommunal de débroussaillage et d'aménagement forestier*

Il s'agit d'un plan d'aménagement pour un territoire et avec comme seul objectif de réduire les surfaces parcourues par les incendies. Il est réalisé par un bureau d'étude et s'agit d'une démarche lourde. Le résultat de cette étude se présente sous forme d'une carte au 25000<sup>ème</sup> complétée d'explications sur les **choix opérationnels de débroussaillage** à effectuer. Le PIDAF est enfin soumis au préfet qui l'arrête ou non. Ces PIDAF se sont imposés en 1980, après les grands incendies du Var notamment, lorsqu'une circulaire inter-ministérielle a présenté l'ensemble des techniques de débroussaillage, la façon de les employer et la nécessité d'élaborer des plans de débroussaillage au niveau communal (CRPF Région PACA, 1990).

##### *Plan de gestion départemental contre les incendies*

Au niveau départemental, il est également apparu intéressant de disposer d'un **document définissant les objectifs DFCI**. Initiés en 1987, les Schémas Directeurs d'Aménagement des Forêts contre l'Incendie (SDAFI) étaient orientés vers la création d'équipements nouveaux et ont amené la mise en place de groupes de travail inter services, réunissant la plupart du temps le Conseil Général, la DDAF, le SDIS, l'ONF, etc..., réfléchissant sur la DFCI. Les SDAFI n'étaient pas obligatoires sauf pour les demandes d'aide financière présentées à l'Union Européenne, ils apparaissaient alors sous le nom de plans départementaux de protection contre l'incendie. Depuis 2000, les SDAFI ont été remplacés par les Plans de Gestion Départementaux contre les Incendies, qui en changeant de nom, sont devenus obligatoires. Le moteur des aménagements DFCI peut avoir comme origine différents organismes suivant les départements : par exemple la DDAF dans le Gard, le Conseil Général dans l'Hérault, ou l'ONF dans l'Aude.

#### 2.1.2. Les coupures de combustibles

Les premières coupures de combustibles ont été créées avec la Loi « méditerranéenne » de 1986. Elles ont été fortement critiquées sur des critères paysagers puis ébranlées dans leur principe après un incendie qui les a traversées (Hubert *et al*, 1991). Cependant, depuis quelques années, les coupures de combustibles sont devenues aussi importantes pour la DFCI que les points d'eau, les pistes d'accès ou la surveillance.

### *Définition d'une coupure de combustible*

Une coupure de combustible est une **bande aménagée** entre deux zones d'ancrage, **peu sensibles aux incendies** d'espaces naturels, assurant ainsi la continuité d'un dispositif anti-incendie dans le temps et dans l'espace, et contribuant au cloisonnement d'un massif forestier. Ce dispositif nécessite donc une continuité spatiale parfaite du réseau de coupures. La végétation est traitée tant en volume qu'en structure de combustible, pour **réduire la puissance d'un front de feu** l'affectant en tenant compte de la vitesse de propagation de ce front sur cette coupure (Duché et Rigolot, 2000). Une coupure est réalisée de telle sorte que le feu ne puisse s'y propager et permet d'arrêter ou, pour le moins, de ralentir passivement les incendies les moins virulents et de **faciliter la lutte** contre les incendies les plus importants susceptibles d'extension, notamment en les fractionnant.

Les coupures de combustible permettent de réduire la probabilité d'extension du feu, de constituer un obstacle aménagé à la propagation pour permettre une gestion optimale des moyens de lutte, de provoquer un fractionnement du front de flamme et une baisse de puissance et de vitesse de progression du feu.

### *Conception d'une coupure de combustible*

Le document de base pour la réalisation d'une coupure de combustibles est le PIDAF. Pour mettre en place ces coupures, il est nécessaire de prendre en compte l'aérogologie, les apports de la physique du feu, la dynamique de végétation, etc. Le traitement d'ouverture de la végétation peut se faire par débroussaillage mécanique ou manuel, par traitement chimique, par brûlage dirigé ou par dessouchage. Il consiste à réaliser des **ruptures de végétation** aussi bien verticales qu'horizontales (Guiton et Kmiec, 2000). Ce dispositif nécessite bien évidemment une **maîtrise du combustible** et donc un contrôle régulier de la strate herbacée et arbustive et de la couverture morte. **L'entretien** suit deux stratégies différentes. Dans l'une, la gestion reste exclusivement forestière, le débroussaillage se faisant de façon mécanique. Dans l'autre cas, la gestion est partagée par une exploitation d'élevage qui fait pâturer son troupeau sur de grandes coupures de combustibles : il s'agit alors de **sylvopastoralisme**. Je vais détailler cette stratégie dans le paragraphe suivant étant donnée son importance pour la suite de mon travail.

## 2.2. Le rôle du sylvopastoralisme dans la défense des forêts contre l'incendie

La contribution de l'élevage à l'entretien des coupures s'est développée depuis une vingtaine d'années. Cependant, avant les années 90, les opérations associant troupeau et débroussaillage se faisaient dans un cadre de recherche et d'expérimentation. Depuis maintenant une dizaine d'années, cette pratique est de plus en plus courante du fait d'un besoin des forestiers de diminuer les coûts d'entretien des coupures de plus en plus nombreuses (Millat *et al*, 2000).

Les systèmes sylvopastoraux, résultats de la conjonction entre des objectifs pastoraux et des objectifs forestiers, s'inscrivent ainsi dans cette nouvelle **gestion à long terme de la forêt** (Bellon et Guérin, 1996). Le sylvopastoralisme doit permettre du point de vue de l'élevage, de **fournir une ressource fourragère** suffisante en quantité et en qualité à l'ensemble du troupeau ; et du point de vue de la forêt, de **limiter l'accumulation de phytomasse** herbacée et arbustive et donc de **combustible**, dans les espaces pâturés (Arnaud et Dimanche, 1995). Plus de 70% des surfaces concernées par des coupures de combustible est utilisé par des troupeaux provenant pour moitié d'élevages ovins, pour un quart d'élevages bovins, le reste se partageant équitablement entre élevages équins et caprins. Environ 250 exploitations sont concernées, dont 25% correspondent à l'installation d'un nouvel exploitant (Etienne, 1996).

### 2.2.1. Les modalités d'intégration de l'élevage

Le pâturage en forêt implique des systèmes d'élevage très diversifiés tant par la nature de l'élevage (bovin, ovin...) que par le type de production (lait, viande...). Cependant le critère de différenciation est généralement **l'éloignement de l'exploitation par rapport à la coupure de combustible**. Ainsi on distingue trois modalités d'intégration de l'élevage sur des coupures de combustible (Millat *et al.*, 2000).

#### *La transhumance hivernale*

Des **élevages situés en montagne**, donc éloignés du périmètre, mettent à profit la création d'une coupure de combustible pour descendre des **animaux à faibles besoins**. Ceci vise à améliorer les résultats économiques des exploitations montagnardes en permettant de diminuer les coûts d'hivernage et d'augmenter la taille du troupeau. Cette transhumance peut commencer dès le début de l'automne et se prolonger jusqu'à la fin du printemps.

Cette **présence saisonnière** montre bien que cette opération n'est impliquée qu'en partie dans le projet DFCI mais nécessite cependant la mise en place d'infrastructures pastorales mobiles et oblige à prévoir une zone aménagée pour la réception et l'accoutumance du troupeau aux conditions des parcours méditerranéens.

#### *Le redéploiement pastoral*

L'élevage possède son **siège d'exploitation à proximité de la coupure** et fonctionne de lui-même selon une logique de production animale. La coupure lui offre la possibilité d'**étendre son territoire pastoral** et d'utiliser de nouvelles ressources fourragères. L'éleveur se doit donc de redéployer son système d'élevage, et en particulier son système fourrager, pour engager des adaptations techniques à la conduite des animaux et à la constitution de sa chaîne de pâturage.

**Le pâturage est alors intégré à l'itinéraire technique** de la coupure et l'éleveur est un partenaire DFCI à part entière. Il faut néanmoins tenir compte des contraintes imposées à l'éleveur et veiller à ce que des aménagements pastoraux soient réalisés afin d'aider celui-ci à mettre en œuvre ce changement. Dans certains cas cependant, la coupure n'est qu'une opportunité de surfaces pastorales complémentaires et le pâturage n'intervient alors que comme une technique complémentaire d'entretien.

#### *L'installation pastorale*

**Un système d'élevage est créé de toutes pièces** à partir des ressources pastorales offertes par la coupure. Dans ce cas, le projet d'aménagement se doit de garantir l'hébergement de l'éleveur et l'alimentation du troupeau toute l'année. La coupure est donc souvent complétée par d'autres surfaces fourragères au sein ou à proximité du massif forestier. Il s'agit d'une opération lourde aussi bien en investissement financier qu'en moyens d'animation.

### 2.2.2. Les aménagements pastoraux réalisés sur les coupures

L'utilisation d'une coupure par un éleveur doit lui permettre de fournir une alimentation suffisante à son troupeau. Ainsi, pour que les besoins du troupeau soient satisfaits, différents aménagements peuvent être réalisés pendant ou après la mise en place de la coupure.

Si la ressource n'est pas suffisante, d'autres **parcelles fourragères** peuvent être **associées à la coupure**. Ces parcelles sont extérieures à la coupure mais à proximité. Il est possible également de **valoriser les autres produits de la forêt** comme les feuillages, les glands, les châtaignes, etc. Même si la ressource est normalement suffisante pour nourrir le troupeau, l'éleveur peut décider d'avoir à disposition des surfaces fourragères dont il se servira comme

"surfaces tampons" en cas d'évènements climatiques exceptionnels.

Souvent différentes techniques sont employées pour **diminuer en partie la compétition avec les ressources**. Par exemple un débroussaillage va permettre de réduire le volume d'arbuste et de favoriser la pousse de l'herbe. De même, il est assez courant de fertiliser puis d'effectuer un sursemis afin d'augmenter la ressource fourragère de la forêt.

Enfin, sans agir sur la végétation de la coupe, il est possible d'**améliorer la valorisation de la ressource ligneuse** par l'animal au moyen d'une alimentation complémentaire qui aide à mieux digérer et ingérer les feuillages (Arnaud *et al.*, 1990).

### 2.2.3. Intérêt et efficacité du pâturage

#### *Contrôle de l'embroussaillage*

L'impact des animaux sur l'embroussaillage s'exerce à la fois par la **consommation** des végétaux mais également par leur **piétinement** (particulièrement lorsqu'il s'agit de gros herbivores : bovins, équins) (Rigolot et Etienne, 1996), avec un **effet négatif** sur la croissance des arbustes. Le pâturage permet d'augmenter le temps entre deux débroussaillages mécaniques pour l'entretien d'une coupe de combustible. On peut gagner de 1 à 4 ans suivant les espèces arbustives et le type d'animaux. De plus cet impact est cumulatif, l'espacement des débroussaillages n'est pas constant mais croissant : les débroussaillages mécaniques sont toujours nécessaires mais, au fur et à mesure des années, ils peuvent être effectués à des intervalles de plus en plus longs. En ce qui concerne la strate herbacée, celle-ci est contrôlée chaque année si la gestion du troupeau est faite correctement. Le pâturage permet une **réduction de la quantité d'herbe sèche** en été, ce qui est très important pour la lutte contre les incendies de forêt, l'herbe sèche constituant un très bon vecteur de feu (Arnaud *et al.*, 1990).

#### *Des avantages pour l'éleveur et le forestier*

La plupart des espèces présentes en forêt sont comestibles par les animaux : l'éleveur profite ainsi d'une **ressource fourragère gratuite**. En retour, le troupeau facilite la gestion du sous-bois et la récolte des fruits, limite la compétition avec les autres arbustes, protège les arbres bien développés et réduit les besoins en débroussaillage, les pousses étant régulièrement broutées (Etienne et Valeix, 1995). Le gestionnaire forestier gagne de la **sécurité sur l'ensemble du massif** ce qui lui permet d'envisager une diversification de la sylviculture, voire d'envisager une transformation du boisement sur les parquets de meilleure fertilité.

Du point de vue des nouveaux usages de la forêt (chasse, paysage, accueil du public,...), le pâturage est également intéressant. En effet, les sursemis favorisent la faune sauvage en créant des zones de gagnage pour les lapins, les sangliers ou les perdrix. Le contrôle de l'embroussaillage par les animaux contribue à la préservation d'une forêt ouverte, accueillante vis-à-vis du public (Etienne et Valeix, 1995). Le pâturage favorise également le cycle biologique de la forêt en stimulant la dégradation de la litière (Arnaud et Dimanche, 1995).

On peut noter que cet intérêt du pâturage en forêt a été reconnu et s'est traduit par la mise en place de **mesures agri-environnementales** dans les années 90. Celles-ci rémunèrent l'impact du pâturage des troupeaux sur la végétation arbustive des zones débroussaillées. Ces mesures concernent également d'autres zones non stratégiques du point de vue DFCI mais primordiales pour le fonctionnement des projets pastoraux (Millat *et al.*, 2000).

### 3. Présentation et objectif de l'étude

#### 3.1. Présentation des systèmes multi-agents et intérêt d'un modèle de simulation comme outil d'aide à la décision

Un système multi-agents (SMA) est un modèle permettant de créer des **sociétés virtuelles**, composées de nombreux **agents, en interaction avec leur environnement** et agissant sur une même **ressource**. L'espace est constitué de cellules et les agents correspondent à des modélisations d'acteurs ayant un lien direct ou indirect avec cette ressource. Le processus de décision est considéré comme une série d'interactions entre les acteurs ayant des objectifs divers et avec des degrés d'importance et d'influence variables (Bousquet *et al.*, 2002).

Un SMA permet donc d'obtenir une **représentation des interactions** existant au sein d'un milieu et permet de juger de l'évolution de celui-ci au cours du temps suivant l'impact des pratiques humaines sur les dynamiques naturelles. En effet, l'espace de simulation est en constant changement puisqu'il est en interaction à chaque pas de temps avec l'ensemble des actions des différents acteurs et des entités agissant sur la dynamique naturelle. De ce point de vue, la représentation d'une ressource dans le SMA se rapproche de la représentation patrimoniale d'un territoire qui considère celui-ci comme un environnement en constant changement dans lequel tous les éléments travaillent au maintien et au développement de l'identité et de l'autonomie des acteurs dans l'espace et dans le temps par adaptation à ces évolutions. Le SMA est donc un outil tout à fait approprié pour la **gestion de problèmes environnementaux**, qui mettent en présence des systèmes intrinsèquement complexes et multi-acteurs.

Concrètement, les simulations effectuées via les SMA proposent aux différents acteurs **plusieurs évolutions possibles de leurs ressources** selon la façon dont ils les gèrent. Elles les font réagir face à un problème donné et constituent une base commune de discussion afin qu'ils trouvent une solution à leur problème. L'existence des points de vue propres à chaque agent est une aide supplémentaire à cette discussion. En effet, ils sont visualisables à tout moment et permettent de faire comprendre aux gens que les autres n'ont pas un comportement similaire au leur car ils suivent des objectifs différents. Or, le processus d'évolution de la ressource est intimement lié aux règles de décision de chacun des acteurs, il est donc important de mener une **gestion concertée**.

#### 3.2. Objectif du stage et démarche suivie

Mon stage a consisté à **continuer le travail d'élaboration** du SMA Sylvopast, en lui apportant certaines **améliorations**. Il m'a fallu déterminer les différentes composantes du modèle (entités spatiales, sociales, attribut de chacun, etc.), formaliser les comportements des groupes sociaux et le fonctionnement de l'écosystème forestier, puis faire tourner le modèle suivant plusieurs scénarios afin d'envisager la prévention des incendies de forêt sous différents angles. Les questions ayant amené à tester ces scénarios étaient les suivantes :

- Quel est l'**impact** des différents **types d'aménagements** réalisables dans la **forêt** sur la protection de celle-ci face aux incendies ?
- Quels sont les ajustements nécessaires pour permettre l'intégration d'activités sylvopastorales dans la planification de la création et de l'entretien d'une coupure de combustible ? Quel est alors l'**impact** du **sylvopastoralisme** et sa place dans la gestion de la forêt ?

Pour répondre à ces questions, la construction d'un modèle approprié était nécessaire. J'ai donc tout d'abord débuté mon stage par la compréhension des phénomènes mis en jeu lors des incendies de forêt, des motivations à l'installation d'une coupure de combustible et de l'intérêt d'y associer du sylvopastoralisme. Ceci m'a amené à me poser deux questions :

- Quelles informations devra contenir le modèle afin de bien rendre compte du problème (qui faire intervenir, comment décrire l'environnement, quels sont les facteurs extérieurs à avoir un impact sur la forêt) ?
- Comment décrire les comportements des acteurs et le fonctionnement du système sylvopastoral, en cherchant à être le plus proche de la réalité ?

J'ai répondu à ces questions grâce à des lectures bibliographiques ou des entretiens avec des gestionnaires forestiers, mais également à des rencontres sur le terrain et à l'analyse de jeux de rôle organisés au préalable avec des étudiants. L'acquisition de ces connaissances m'a permis de construire deux modèles qui seront la base d'un SMA Sylvopast.

## Deuxième partie : Outils et méthodologie

Cette deuxième partie a pour objectif de présenter les outils dont je me suis servie tout au long de mon stage : des visites de terrain, des entretiens avec des gestionnaires forestiers, deux modèles informatiques. Elle exposera la façon dont je les ai utilisés et ce qu'ils m'ont apporté.

### 1. Présentation du système multi-agents Sylvopast

Pour avoir plus d'explications concernant ce modèle, il est possible de consulter sur le site Internet de JASSS, l'article consacré à Sylvopast (Etienne, 2003).

#### 1.1. A quoi sert ce modèle ?

Le but du SMA Sylvopast est de représenter un **massif forestier** soumis à une gestion sylvopastorale, à des **dynamiques écologiques** de croissance de la végétation, à des **risques d'incendie**, de rendre compte du comportement de deux types d'acteurs jouant un rôle principal dans le **sylvopastoralisme** : les bergers et les forestiers, et de faire apparaître les différentes stratégies de ceux-ci pour la gestion de la forêt et la prévention du risque d'incendie.

L'utilisation de ce modèle comme **outil d'aide à la décision** pour la prévention des incendies de forêt constitue une base de discussion pour les différents acteurs impliqués dans cette action, et permet de visualiser l'impact des travaux sur une forêt et leur conséquence du point de vue DFCI.

#### 1.2. Les éléments constituant ce modèle

##### 1.2.1. L'espace de simulation

L'espace est représenté par une **carte constituée de 2500 (50x50) cellules** de forme hexagonale, chaque cellule représentant un hectare de terrain. Le choix de la forme résulte de la nécessité d'avoir pour chaque cellule un voisinage déterminé de façon nette. Dans le point de vue de base, les couleurs des cellules se rapportent aux différentes **formes de végétation**. Chaque strate est représentée par une couleur primaire (figure 1) : strate herbacée en jaune, strate arbustive en rouge et strate arborée en bleu. Les combinaisons de couleurs font référence aux combinaisons des différentes strates de végétation, par exemple une cellule violette contient des arbres (bleu) et de la broussaille (rouge). Les cailloux sont représentés par la couleur grise.

Les **modifications** subies par l'espace à chaque pas de temps sont **visualisables immédiatement** sur cette carte. En effet, si des cellules subissent des travaux ou si elles s'embroussaillent, leur couleur va être automatiquement modifiée suivant l'évolution des strates présentes. Par exemple, une cellule jaune (herbe) qui s'embroussaille va devenir orange (herbe et broussaille).

L'un des principaux intérêts des SMA est que l'espace peut y être perçu selon **différents points de vue**. Ceux-ci correspondent généralement à la vision particulière qu'un agent a de son environnement (Etienne *et al.*, 1997). Par exemple, il est possible de visualiser la carte des ressources fourragères, souvent demandée par le berger, ou la carte du risque d'incendie

qui intéresse préférentiellement le forestier. Il est possible de représenter tous les points de vue demandés par les acteurs, du moment que les données nécessaires sont accessibles. Ainsi nous pouvons regarder l'espace à travers un large éventail de représentations.

### 1.2.2. Les agents et dynamiques naturelles

Un système multi-agents est composé de différentes **entités spatiales, sociales et passives**. Les premières représentent différentes **composantes de l'espace** concerné, les secondes représentent des **groupes d'agents** ayant des comportements communs, les dernières correspondent à des **lois fixes** connues.

Dans le SMA Sylvopast, les entités sociales correspondent aux principaux acteurs de la gestion sylvopastorale d'une forêt : les bergers et les forestiers. La cellule est une entité spatiale, dans laquelle sont implémentées les dynamiques naturelles telles que l'embroussaillage et la production d'herbe. Enfin, nous pouvons citer le climat comme entité passive, qui va jouer un rôle important quant aux dynamiques de végétation.

### 1.2.3. Les incendies

Le modèle feu de Sylvopast attribue à chacune des cellules de la forêt, un **coefficient de combustibilité** (en quatre niveaux) tenant compte de la **formation végétale** et de la **présence ou non de pâturage**. Ensuite, en fonction de la **direction du vent** (vent d'ouest), le modèle de propagation détermine les cellules voisines qui vont être brûlées par une cellule en feu.

## 1.3. Les données d'entrée et de sortie

Pour construire le SMA, il est nécessaire de créer toutes les entités citées ci-dessus et d'implémenter les procédures. Le langage informatique utilisé pour cette implémentation s'appelle **Smalltalk**. Un exemple de procédure écrite en Smalltalk est fourni en annexe 1.

A chaque entité, sont donc associées des **procédures** mais également les **attributs** nécessaires pour les mettre en œuvre. Par exemple, nous associons à l'entité 'berger' la procédure qui lui permettra d'acheter des animaux : l'exécution de cette procédure nécessite que le berger ait comme attribut son capital et la taille de son troupeau. Le contrôleur permet ensuite de faire tourner le modèle en faisant appel aux procédures de chacune des entités.

Outre le fait de voir l'espace à travers différents points de vue, il est possible de visualiser des attributs sous forme de **graphiques**. En effet, la plupart des attributs sont en constante évolution au cours du temps, du fait de leur corrélation avec l'état de l'espace ou les actions des agents. Par exemple, le capital du forestier est différent à chaque tour du fait de la perte d'argent dû au coût de travaux et du gain d'argent dû à l'obtention de prime. Ainsi CORMAS peut générer des graphes d'évolution de ces attributs qui peuvent donc être utilisés en tant qu'indicateurs. Les données résultant de ces simulations peuvent également être exportées sous la forme de fichiers texte.

## 2. Le jeu de rôle SylvopastJeu

J'avais à ma disposition 64 parties de jeux de rôle, dont 44 jouées en dix tours et 20 en 5 tours. Ces parties s'étaient déroulées entre des étudiants d'horizons différents, ayant ou non des connaissances sur le sylvopastoralisme et la forêt méditerranéenne. On peut noter par exemple la participation de forestiers, de vétérinaires mais également d'agronomes, de sociologues, d'écologues ou de géographes.

## 2.1. Présentation du jeu de rôle

Pour avoir plus d'explications concernant ce modèle, il est possible de consulter sur le site Internet de JASSS, l'article consacré à SylvopastJeu (Etienne, 2003).

### 2.1.1. Comment fonctionne le jeu ?

SylvopastJeu est un SMA servant de support à un jeu de rôle qui est en cours d'amélioration afin de pouvoir se jouer avec des joueurs réels ou des joueurs virtuels (projet de version distribuée). La forêt est représentée par une grille de **100 cellules** (10x10) soumise aux **aléas climatiques** et à l'**embroussaillage**. L'incendie est modélisé de la même manière que dans le modèle Sylvopast. La carte du point de vue végétation utilisée pour SylvopastJeu se trouve en annexe 2.

Le jeu demande la **participation de trois personnes** : deux joueurs (un **forestier** et un **berger**) et un **observateur** qui a comme principale responsabilité de noter les comportements des joueurs. Les rôles du forestier et du berger peuvent être tenus par des personnes plus ou moins liés à ces professions.

Pendant que le forestier prend connaissance de la forêt et réfléchit à la meilleure manière de gérer cette ressource, le berger emmène son **troupeau à pâturer** dans les différentes parties enherbées de la forêt, calculant au mieux le fourrage à apporter à son troupeau en tenant compte du climat, du type de formation végétale et des distances à parcourir. A la fin du tour, le résultat du pâturage est enregistré et la phase de **négociation** commence. Celle-ci dure dix minutes maximum et doit déboucher sur une liste de cellules et de **travaux associés à réaliser**. Chacun des deux partis peut évidemment refuser la négociation, de même qu'au bout des quinze minutes il n'y a pas forcément accord entre l'éleveur et le forestier. Le forestier, après avoir effectué les travaux, est récompensé par une prime si la valeur de la forêt a progressé. Un jeu complet se déroule sur **10 tours** correspondant à dix années de gestion sylvopastorale.

### 2.1.2. Dans quel cas est-il utilisé ?

Les jeux de rôle sont utilisés en complément des systèmes multi-agents pour **valider la représentation virtuelle** de la ressource et des interactions entre acteurs. Le principe est que, lors d'une partie de jeu de rôle, les joueurs réels prennent la place des agents modélisés dans le SMA. Ils peuvent donc voir si la représentation virtuelle de l'espace est proche ou non de la réalité.

De plus, lors du déroulement du jeu, des problèmes de gestion des ressources ou de choix d'aménagement surgissent. Ils vont faire réagir les joueurs qui peuvent alors trouver des solutions originales et **prendre conscience** que des **problèmes** identiques peuvent très bien survenir dans la réalité. Le jeu devient alors à la fois un outil de visualisation des conséquences de telle ou telle gestion donc un **outil d'aide à la décision** et un **outil d'observation des comportements** d'acteurs face à un problème donné.

Enfin, le jeu de rôle nécessitant la présence de joueurs, il devient un **outil de rencontre** et permet d'amorcer le dialogue entre des personnes qui ne jugeaient pas utile d'échanger leur point de vue.

## 2.2. L'analyse des parties de jeu de rôle

L'étude de jeux de rôle devait m'aider à identifier les comportements des différents acteurs, les différentes stratégies proposées face au même objectif de gestion de la forêt. L'analyse devait également faire émerger les modalités de structuration et de gestion de la forêt par les

bergers et les forestiers, les stratégies d'anticipation des conflits potentiels entre joueurs et les modalités de négociation. Ainsi, l'analyse du comportement des joueurs m'a permis d'établir des grands types de comportements, que ce soit pour les forestiers ou pour les bergers, et donc d'affiner, dans le modèle, la représentation de ceux-ci. J'ai effectué mon analyse suivant différents points de vue : tout d'abord, de façon visuelle en regardant les cartes résultant des parties, ensuite en analysant les indicateurs chiffrés que j'avais à ma disposition.

### 2.2.1. Des parties rejouées

L'analyse des parties jouées a été facilitée par la disponibilité d'un module Rejouer qui permet de **revoir en accéléré** chacun des tours réalisés par les deux joueurs : sur mon écran d'ordinateur s'affichait la carte de la forêt, les messages adressés aux joueurs et les graphes d'évolution des indicateurs. J'ai eu ainsi la possibilité de visualiser à chaque tour les cases pâturées par le berger dans l'ordre où elles ont été pâturées, de prendre connaissance des travaux effectués ainsi que de la participation financière éventuelle du berger, du type de climat, des incendies subis par la forêt et de l'achat d'animaux.

Cette première approche des jeux de rôle m'a permis de me faire une idée de **la vision de la forêt** qu'ont les bergers et les forestiers, de la manière dont ils gèrent la ressource « herbe » pour les bergers et « bois » pour les forestiers, de voir les **différences de comportement** entre les personnes ayant dans la vie un lien avec l'élevage ou la gestion forestière, d'essayer de comprendre la **raison des actions** de chacun.

### 2.2.2. Réalisation d'une base de données de tous les indicateurs

Lors du déroulement des parties, l'ordinateur **enregistre** à chaque **tour toutes les actions réalisées** (type et localisation des travaux effectués) et **les indicateurs** utilisés par les joueurs. Pour le berger, il s'agit de : son capital, la taille de son troupeau, la valeur pastorale de la forêt, sa participation financière aux travaux. Pour le forestier, il s'agit de : son capital, la prime qu'il a reçue, le nombre de cellules en forêt de production (cellules bleues), l'indice de risque d'incendie, l'indice de diversité paysagère. De plus, à chaque tour, sont enregistrés le, la structure de végétation de chaque cellule et les cellules incendiées.

J'ai réalisé à partir de ces informations deux bases de données : l'une sur les indicateurs, l'autre sur les travaux. La réalisation de tableaux croisés dynamiques faisant intervenir les chiffres de ces bases de données m'a permis de répondre à nombre de questions au sujet du comportement des acteurs.

## 3. Une prise de connaissance du milieu méditerranéen

### 3.1. La végétation

Ne connaissant pas du tout la région méditerranéenne, et encore moins sa végétation, il m'a fallu un premier temps d'acquisition de connaissances dans ce domaine. En effet, même si les cartes du modèle ne font apparaître que les différentes strates de végétation et non les espèces végétales qui les composent, il semblait cependant nécessaire que je sache quels arbres ou quels arbustes étaient spécifiques des forêts méditerranéennes.

Ainsi, quelques **sorties botaniques** avec mon maître de stage m'ont permis de me familiariser avec la végétation méditerranéenne. Cela m'a été utile notamment lors des entretiens que j'ai réalisés avec des gestionnaires forestiers, pour mieux comprendre ce dont ils me parlaient et

me faire une idée, d'après leur description, des forêts de leur département. De plus ces sorties m'ont donné une vision de la forêt méditerranéenne dans son ensemble, de son agencement et des combinaisons possibles des trois strates de végétation.

### 3.2. Les aménagements DFCI

Des visites de terrain m'ont également permis de voir de mes propres yeux des coupures de combustible, après les avoir imaginées au travers des lectures de documents techniques et de photos. Je me suis ainsi rendue compte de la **variété des coupures de combustibles** mises en place.

Dans l'**Aude**, ces dispositifs s'appuient sur des **coupures agricoles** sur lesquelles ont été plantées des **vignes**. La valorisation vinicole des coupures de combustible est courante dans ce département.

Dans le **Var**, de nombreuses coupures de combustible sont utilisées par un **troupeau d'ovins**. La coupure sur laquelle je me suis rendue, a bénéficié d'un suivi scientifique et technique par l'unité d'Ecodéveloppement de l'INRA d'Avignon afin d'analyser le fonctionnement des systèmes sylvopastoraux et de proposer des améliorations (Etienne *et al.*, 2002).

Enfin, dans un cadre strictement personnel, j'ai pu apercevoir des aménagements DFCI tels que des citernes ou des pistes DFCI.

## 4. Des entretiens avec des gestionnaires forestiers

La conception du modèle Sylvopast nécessitait une connaissance des règles de gestion des massifs forestiers en région méditerranéenne dans leur globalité et de la DFCI en particulier. Le meilleur moyen de se procurer ces informations était de rencontrer les acteurs de cette gestion forestière.

### 4.1. Choix des personnes rencontrées

J'ai sélectionné mes interlocuteurs parmi les personnes participant aux réunions **du Réseau Coupure de Combustibles (RCC)**. Ce réseau, créé en 1992, a pour objectif de collecter et d'analyser des données sur la gestion des coupures de combustibles. Les personnes que j'ai rencontrées travaillent dans les départements de l'Aude, de la Corse du Sud, du Gard et du Var.

J'ai donc interrogé des personnes :

- de l'**Office National des Forêts (ONF)**. Ses missions sont de gérer et équiper les forêts domaniales et les forêts des collectivités locales soumises au régime forestier, de réaliser des opérations de gestion, des travaux en vue de la protection, de l'aménagement et du développement des ressources naturelles.
- de la **Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF)** en charge de la mise en place et du suivi des coupures de combustibles. La DDAF oriente, harmonise, programme et met en œuvre la politique et les actions régionales.

### 4.2. Préparation et déroulement des entretiens

#### 4.2.1. Réalisation des supports d'entretien

Nous avons besoin comme support d'entretien, de **cartes virtuelles** représentatives des forêts

des départements concernés. Ces cartes ont été réalisées avec le modèle Sylvopast grâce à une procédure qui permet de construire différents espaces de simulation en modifiant les proportions et les dispositions de structures de végétation.

Après observation de photographies aériennes, j'ai pu me faire une idée du type de végétation rencontrée dans les départements de chacune des personnes que j'allais interroger. J'ai ainsi réalisé des cartes pour le Var, l'Aude et le Gard. En ce qui concerne la **Corse du sud**, l'importance de la topographie nous a fait utiliser comme support d'entretien une **photographie aérienne**. Les éléments essentiels de chaque carte sont :

- pour le **Var** : presque toute la carte est couverte par des **maquis**, la plupart des cellules contiennent une strate arbustive
- pour l'**Aude** : j'ai intégré un maillage de cellules représentant de la **vigne**
- pour le **Gard** : j'ai construit une carte ne contenant que de la broussaille et des rochers pour l'interlocuteur travaillant essentiellement dans de la garrigue, et une autre carte plus boisée en distinguant les résineux des **châtaigniers** pour l'interlocuteur travaillant en Cévennes.

Ces cartes se trouvent en annexe 3.

#### 4.2.2. Un travail de réflexion DFCI

Ces entretiens se sont déroulés de façon tout à fait ouverte et avaient comme premier objectif d'obtenir des **renseignements** sur la **forêt**, les **politiques d'aménagements** et la **prévention des incendies** de forêt propre au département dans lequel nous nous trouvions.

La deuxième partie des ces entretiens consistait à faire réfléchir les personnes interrogées sur la carte réalisée préalablement. La personne interrogée devait tout d'abord compléter celle-ci en y faisant figurer les routes, le vent dominant, les habitations, voire la mer. Elle devait ensuite **dessiner des aménagements** à réaliser dans un but DFCI ou plus précisément tracer sur la carte l'emplacement de coupures de combustible.

Le but de cette étude de carte était de comprendre la réflexion précédant la mise en place d'un tel aménagement, les critères à prendre en compte et la stratégie de prévention utilisée.

Par comparaison des différents entretiens, il m'a alors été possible de distinguer les actions générales communes à toute la zone méditerranéenne et les actions propres à chaque département.

## Troisième partie : Premiers résultats et construction du modèle

Cette partie a pour objectif de décrire mon travail dans la construction du modèle. Celui-ci se décompose en trois phases : la détermination des éléments du modèle, la formalisation des comportements et des dynamiques, et enfin la saisie des données et le codage informatique. Dans cette partie, je vais présenter les résultats qui m'ont servi à effectuer les deux premières phases de ce travail.

### 1. Choisir les différents éléments qui vont constituer le modèle

#### 1.1. Les incendies

##### 1.1.1. Naissance et propagation d'un incendie

La **végétation** peut être représentée comme la **combinaison de trois strates** : la strate herbacée, la strate arbustive et la strate arborée. La strate arbustive est toujours en contact avec la strate herbacée, elle n'est en général jamais en contact avec la strate arborée (hauteur inférieure à la hauteur des premières branches) (Dupuy, 2000). **Tout feu prend naissance au sol**, c'est-à-dire dans la litière, puis se développe dans la strate herbacée, se propage dans les strates arbustives, puis dans les strates arborées (Guiton et Kmiec, 2000). Une structure de végétation composée de deux strates contiguës (par exemple composée d'une strate herbacée et d'une strate arbustive) propage donc mieux le feu qu'une formation végétale composée d'une seule strate ou de deux strates non contiguës. Cependant la propagation du feu dépend également de la nature du combustible : une formation végétale composée seulement d'herbe et une seulement d'arbustes ne brûlent pas de la même façon.

##### 1.1.2. Influence d'un troupeau

Or cette **capacité à propager le feu** peut être **modulée par** la présence d'un **troupeau**. Celui-ci va agir sur la strate herbacée par son action de pâturage. Il va en effet **réduire la quantité d'herbe** au sol et donc éviter l'accumulation d'herbe sèche avant l'été. Il va également **agir sur la strate arbustive** par pâturage des jeunes pousses et piétinement des arbustes existants (Arnaud *et al.*, 1990). Toutefois, le taux d'abrutissement peut varier de 2 à 50% et dépend fortement de l'espèce arbustive et de sa palatabilité, de la gestion pastorale et du type d'animal (Etienne *et al.*, 1996). La quantité de combustible sera moindre, le coefficient de propagation du feu sera alors plus faible. Ainsi à tout endroit où l'herbe est présente, le troupeau va avoir une action bénéfique pour la prévention des incendies, si la gestion du berger garantit un raclage correct de l'herbe.

#### 1.2. Les dynamiques végétales

##### 1.2.1. La strate arbustive

La strate arbustive apparaît comme un élément essentiel à prendre en compte pour la prévention des incendies de forêt car c'est une **strate à phytovolume combustible élevé**. De plus, elle fait la jointure entre la strate basse et la strate haute et autorise donc une propagation

verticale du feu. Ce rôle prépondérant de la strate arbustive dans la prévention des incendies de forêt est très visible : en effet, le contrôle de l'embroussaillage représente une part importante des travaux d'aménagement dans un but DFCI.

La modélisation de la dynamique d'embroussaillage s'est appuyée sur les données accumulées pendant quinze ans, lors du suivi scientifique d'une exploitation d'élevage à but sylvopastoral. Le phytovolume aérien (phytovolume = hauteur \* surface au sol) permet de suivre l'encombrement de l'espace par les broussailles en combinant leur croissance en hauteur et en recouvrement. Cependant il traduit assez mal le risque de propagation du feu et la quantité d'énergie potentielle susceptible d'être libérée lors d'un incendie, ce que fait bien la phytomasse arbustive (Etienne *et al.*, 2002).

La **vitesse d'embroussaillage** est **variable suivant l'espèce** considérée mais également **suivant les techniques appliquées** (Etienne *et al.*, 2002).. Les variations dans la vitesse d'embroussaillage provoquées par l'itinéraire technique peuvent facilement s'observer. Par exemple, nous pouvons voir sur la figure 2 que l'embroussaillage est moins rapide après un débroussaillage mécanique qu'après un brûlage dirigé.

La figure 3 prouve que la **vitesse d'embroussaillage** est fortement **liée au pâturage**. En effet, celle-ci est plus faible lors d'une combinaison débroussaillage et pâturage que lors d'un débroussaillage seul. De même, dans le cas d'une fertilisation, la vitesse d'embroussaillage est nettement réduite. Ceci s'explique par l'action de broutage et de piétinement du troupeau qui réduit la croissance des arbustes. Le troupeau permet ainsi une maîtrise partielle de la dynamique d'embroussaillage (Etienne *et al.*, 2002). Lorsque la parcelle est fertilisée puis semée, l'attrait pour le troupeau est plus grand, le pâturage est donc plus important et a plus d'impact sur la croissance des arbustes.

### 1.2.2. La strate herbacée

Nous avons vu que la présence d'un troupeau influence la croissance des arbustes et joue sur la propagation des incendies. Or, pour qu'un troupeau puisse pâturer, il faut qu'il y ait de l'herbe à manger. La forêt est alors considérée comme productrice d'une ressource alimentaire pour le troupeau.

Sous le climat méditerranéen, nous pouvons distinguer dans une année, **deux ou trois périodes de pousse de l'herbe** : en automne, au printemps et parfois en hiver. L'été est tellement chaud et sec que l'herbe se dessèche et se dégrade : au début de l'automne nous pouvons donc considérer que la quantité d'herbe en forêt est nulle (Etienne *et al.*, 2002). J'ai choisi de retenir trois périodes de croissance de l'herbe car, pour évaluer celle-ci, je me suis basée sur des documents présentant des résultats de mesures au cours de trois saisons.

Durant ces périodes, seuls quelques jours sont favorables à la croissance de l'herbe ; ce sont les **jours efficaces**. Ceux-ci répondent à des critères de température et d'humidité et sont en nombre variable suivant les saisons (Etienne *et al.*, 2002). La croissance de l'herbe est donc soumise à une **saisonnalité**.

Le **climat** va avoir une grande influence sur la croissance de l'herbe car il détermine le début et la fin des saisons, et l'efficacité d'un jour donné. Le climat étant un paramètre annuel, la croissance de l'herbe va être également soumise à une **variabilité interannuelle** (Etienne *et al.*, 2002).

Cependant nous avons vu qu'un des avantages de l'herbe est que, lorsqu'elle est combinée à des arbustes, elle permet un contrôle de ceux-ci par le troupeau. Or, l'observation de graphiques de productivité annuelle de sursemis montre des fluctuations régulières en dents

de scie, liées à l'embroussaillage progressif de la coupure. La recolonisation de la coupure par la **broussaille** agit sur la production d'herbe par **effet de concurrence** pour l'eau et la lumière (Armand et Etienne, 1996).

Nous pouvons alors également nous poser la question de **l'influence des arbres** sur la croissance de l'herbe. Le couvert arboré a un **effet d'ombre** constant sur la production pastorale mais aussi des effets saisonniers (Armand et Etienne, 1996). Ceux-ci sont dus à **la réduction les écarts de température et d'humidité** provoquée par ce couvert. De façon générale, la production annuelle de l'herbe est plus élevée sous les arbres mais présente de fortes variations saisonnières. L'effet du couvert arboré est fortement marqué en hiver et en début de printemps avec une importante augmentation de la production fourragère. En effet, il atténue l'effet du gel et permet donc un allongement de la pousse d'automne et de celle de printemps. Il retarde l'effet de la sécheresse et provoque un dessèchement moins rapide du fourrage disponible à l'arrivée de l'été (Armand et Etienne, 1996).

J'ai donc élaboré des modèles de croissance de l'herbe variant selon la structure de végétation et la saison.

### 1.3. Les acteurs et leurs actions

#### 1.3.1. Les forestiers : gestionnaires de la forêt

Il est impossible d'établir un modèle d'aide à la prévention des incendies de forêt sans faire intervenir l'acteur principal de la gestion forestière : le forestier. Ce terme désignera au sens large tout type de personne prenant la décision et **effectuant des travaux d'entretien ou d'aménagement forestiers**.

Tous les forestiers n'agissent pas avec les mêmes objectifs, par exemple un premier peut vouloir protéger la forêt contre le risque d'incendie, un autre faire de la forêt un espace de production, et un dernier améliorer la biodiversité. De toute manière, quel que soit son objectif, le forestier aura à sa disposition une palette de travaux dans laquelle il pourra puiser pour atteindre son but. Ces travaux vont modifier une ou plusieurs des trois strates de végétation que j'ai évoquées précédemment : la strate herbacée, la strate arbustive ou la strate arborée.

Les travaux concernant la strate arbustive visent toujours à réduire celle-ci car elle pose un problème dans la gestion du risque d'incendie et n'est pas souhaitable dans les forêts de production. Il existe différentes techniques de réduction du phytovolume arbustif, pour n'en citer que quelques-unes : les débroussaillages manuels ou mécaniques, l'emploi de phytocides ou le brûlage dirigé (Guiton et Kmiec, 2000).

Les actions concernant la strate arborée peuvent se faire dans un but de réduction de celle-ci : il s'agit alors d'une éclaircie soit pour garder les plus beaux arbres avec un objectif de production de bois, soit pour mettre en place une parcelle sylvopastorale.

Enfin, il est possible d'agir sur la strate herbacée par des méthodes de sursemis, souvent associée à une fertilisation afin d'accroître la productivité de l'espèce semée (Armand et Etienne, 1996). Ceci ne se fait que dans le cas d'un aménagement sylvopastoral. Le but du sursemis est de favoriser l'ingestion des lignieuses par les animaux.

Ces actions sur les trois strates de végétation devront être intégrées au modèle, sans pour autant que nous soyons obligés de détailler le type de technique employée. Nous ne retiendrons que les **actions qui modifient la structure de végétation** (disparition ou

apparition d'une strate). Ainsi, l'agent forestier aura à sa disposition trois actions d'aménagement forestier : **semier, débroussailler et reboiser**.

Les travaux forestiers sont réalisés par des gestionnaires forestiers à la demande d'un maître d'ouvrage, celui-ci finançant les travaux effectués. Des aides ou subventions existent pour les travaux d'aménagement forestiers, qu'elles soient européennes, nationales ou locales. Dans le modèle, nous considérons que celui qui commande et effectue les travaux représente une seule et même personne. C'est donc au forestier que revient de **payer les travaux**. Ses actions sont cependant soumises au jugement d'une personne extérieure, que nous avons nommée « gouvernement » dans le modèle. Il évalue l'état de la forêt et décide de verser ou non des **primes**. De même, après un incendie, une prime est accordée au forestier pour restaurer la zone incendiée.

### 1.3.2. Les bergers : acteurs du pastoralisme

L'agent berger intervient dans le modèle car le système multi-agents doit représenter un aménagement sylvopastoral.

Un berger peut **faire pâturer son troupeau dans un massif forestier** selon différentes organisations spatiales (Etienne, 1990 b). Cependant, quelle que soit celle-ci, les pâturages ne lui sont pas mis à disposition gracieusement : s'il n'est pas propriétaire de la forêt, il doit passer avec celui-ci une convention pluriannuelle de pâturage lui donnant l'**autorisation de pâturage contre le paiement d'un droit annuel**. La gestion du troupeau lui revient entièrement : son but principal est de pouvoir correctement nourrir son troupeau. Connaissant les besoins de celui-ci, il va chercher à tirer un maximum de profit des pâturages en forêt, tenant compte de l'état de la végétation et du climat pour effectuer le choix du lieu de pâturage. La modalité d'intégration adoptée par le modèle sera celle de l'installation d'un élevage ovin transhumant l'été. Ceci se base sur le fait que nous voulons un berger qui parte durant cette saison afin que les travaux forestiers puissent être effectués, et qui pâture dans la forêt tout le reste du temps.

De plus, le berger aura les mêmes obligations et choix que dans la réalité : paiement du droit de pâturage, achat d'animaux supplémentaires, choix des lieux de pâturage. Il peut enfin **participer financièrement aux travaux**, par exemple lorsque ceux-ci permettent d'améliorer la valeur pastorale de la forêt.

Un paramètre important à prendre en compte pour le berger est les **besoins du troupeau**. La comparaison de la courbe de besoins avec celle du fourrage disponible dans la forêt permettra d'évaluer les travaux d'aménagements pastoraux à réaliser ou le nombre de brebis supplémentaires pouvant être nourries par la forêt. Pour établir la courbe des besoins du troupeau (figure 4), il faut tout d'abord repérer les différentes périodes au cours de l'année : nous pouvons distinguer la période d'entretien en hiver, celle de la mise-bas et de la croissance des petits au printemps, et celle des ventes à l'automne. Nous considérons que les agneaux sont vendus en trois fois.

## 2. Comprendre le comportement du berger et du forestier

Il m'a fallu étudier les comportements des partenaires de l'aménagement afin d'en proposer formalisation. Pour cela, l'étude des parties de jeux de rôle a été très intéressante. Elle m'a permis de répondre aux questions que je me posais pour pouvoir coder les actions que j'avais décidées d'intégrer au modèle. Ces questions concernaient essentiellement les rapports de force entre les partenaires, les entités de gestion manipulées, l'organisation du pâturage, les stratégies de négociation et les types de travaux réalisés.

## 2.1. Quelles sont les relations et rapports de force entre berger et forestier ?

En observant les différentes parties, je suis arrivée à distinguer des grands groupes de stratégies, basées principalement sur les relations entre joueurs, et en complément de la typologie déjà réalisée (Etienne, 2003).

Pour le berger, j'ai distingué:

- le berger dominé par un forestier qui ne fait des travaux que selon ses propres objectifs
- le berger dominé par un forestier qui fait quelques travaux d'amélioration pastorale
- le berger qui dépense son argent sans faire attention et qui se ruine
- le berger dominant qui fait faire au forestier beaucoup de cellules vertes mais qui n'arrive pas à toutes les pâturer car il n'augmente pas son troupeau en conséquence
- le berger dominant qui fait faire au forestier des travaux permettant d'augmenter la valeur pastorale de la forêt, puis il augmente son troupeau et donc son capital
- le berger qui est en accord avec le forestier

Pour le forestier j'ai distingué :

- le forestier exclusif qui ne fait aucun travaux en faveur du berger
- le forestier dominant qui ne fait des travaux pour le berger que si cela ne le dérange pas dans son objectif
- le forestier dominé qui fait tous les travaux que le berger lui demande
- le forestier en accord avec le berger dans le but d'augmenter la biodiversité de la forêt
- le forestier en accord avec le berger dans le but de protéger la forêt contre les incendies
- le forestier en accord avec le berger dans le but de conserver des massifs de production existants

Ces grands types de comportements peuvent se combiner entre eux au cours des parties, certaines combinaisons étant évidemment exclues car irréalisables (par exemple un forestier exclusif avec un berger dominant).

Les rapports de force, ou d'entente, entre les deux partis jouent un rôle important lors de la phase de négociation sur le choix des travaux à réaliser dans la forêt. Ce sont eux qui vont déterminer la manière de sélectionner les cellules qui devront subir des travaux.

## 2.2. Comment les acteurs voient-ils la forêt ?

Les deux acteurs voient la forêt d'un œil différent. Ils « découpent » cet environnement en fonction de ce qui les intéresse le plus : l'herbe pour le berger et le bois pour le forestier. De plus, tous les forestiers, ainsi que tous les bergers, ne raisonnent pas de la même façon. Il en résulte des stratégies d'occupation de l'espace variées.

### 2.2.1. Le berger : quartier ou circuit

J'ai distingué deux types de stratégies de conduite du troupeau par le berger. Elles répondent au besoin qu'a celui-ci de nourrir correctement ses brebis. Ainsi, la **stratégie de l'éleveur** va être surtout orientée vers la valorisation du potentiel fourrager de la forêt afin que les besoins du troupeau soient satisfaits, et vers la réduction des distances parcourues afin de diminuer la perte d'énergie occasionnée par les déplacements successifs du troupeau.

La première stratégie consiste à construire des **quartiers de pâturage**. Les quartiers sont des endroits à forte valeur pastorale, permettant à l'éleveur de **nourrir son troupeau au même endroit pendant plusieurs jours consécutifs**. Les brebis se déplaçant à l'intérieur d'un quartier de pâturage, y trouvent suffisamment de fourrage pour se nourrir correctement et ne perdent pas d'énergie pour cause de longs déplacements. Le berger va ainsi construire plusieurs quartiers de pâturage qu'il va faire pâturer les uns à la suite des autres.

La seconde stratégie est celle dite du **circuit de pâturage**. Contrairement à la stratégie précédente, celle-ci n'offre pas la possibilité au berger de rester plusieurs jours au même endroit mais elle se base essentiellement sur une **réduction des distances de déplacement**. Le circuit est en fait une succession de parcelles à pâturer. Aucun déplacement long ne sera réalisé entre les différents lieux de pâturage.

L'adoption d'une de ces deux stratégies ne relève que d'un choix purement personnel de l'éleveur qui conserve celle-ci tout au long de la partie. Dans le modèle, tout éleveur se verra assigner au hasard une des deux stratégies : circuit ou quartiers.

### 2.2.2. Le forestier : parquet ou massif

Le forestier peut gérer la forêt de deux manières différentes. Il faut entendre « gérer la forêt » comme synonyme de construire des unités de gestion sur lesquels il fera des travaux d'améliorations forestières. Ces unités de gestion sont de deux types : massifs ou parquets.

Un **massif** est défini comme une **entité boisée** délimitée par des surfaces non boisées. Il peut donc être de taille et de forme variable.

Un **parquet** est une **unité de gestion de taille fixe** (généralement assez petite – quelques dizaines d'hectares) sur lequel les travaux seront planifiés de façon uniforme. Un parquet n'est pas forcément composé uniquement de surfaces boisées, cela dépend de son mode de construction.

Il est cependant beaucoup plus difficile de cerner les stratégies des forestiers durant les parties de jeux de rôle, les travaux d'amélioration forestière n'étant pas très nombreux. Dans le modèle, tout forestier se verra assigner au hasard une des deux stratégies : parquet ou massif.

## 2.3. Comment le berger gère-t-il son troupeau ?

J'ai cherché à comprendre les raisons qui poussent un berger à vouloir augmenter ou non la taille de son troupeau, et à modifier en conséquence son organisation de pâturage.

### 2.3.1. Un berger va-t-il capitaliser sur son troupeau ?

Nous pouvons regrouper les parties en quatre ensembles (figure 5).

Les bergers n'ayant plus de troupeau correspondent à ceux qui ont fait faillite (A).

Certains bergers décident de capitaliser sur leur troupeau (B) : il s'agit de ceux ayant un troupeau de taille importante mais un capital de fin de partie d'un montant identique à celui de début de partie.

D'autres, au contraire, n'augmentent que peu la taille de leur troupeau dans le but d'accumuler de la trésorerie grâce à une bonne valorisation du fourrage disponible (C) : ils ont, à la fin, un capital qui a plus que doublé au cours de la partie.

Mais la majorité des bergers suit un schéma plus classique (D) : l'**augmentation du troupeau** entraîne une **augmentation du capital**. En effet, les bergers tirent un maximum de profit du fourrage qu'ils ont à disposition : ils achètent autant de brebis qu'il est possible de nourrir et les engraisent. L'achat de troupeau est raisonné sur le potentiel fourrager.

### 2.3.2. L'achat d'animaux est-il régi par le capital du berger ?

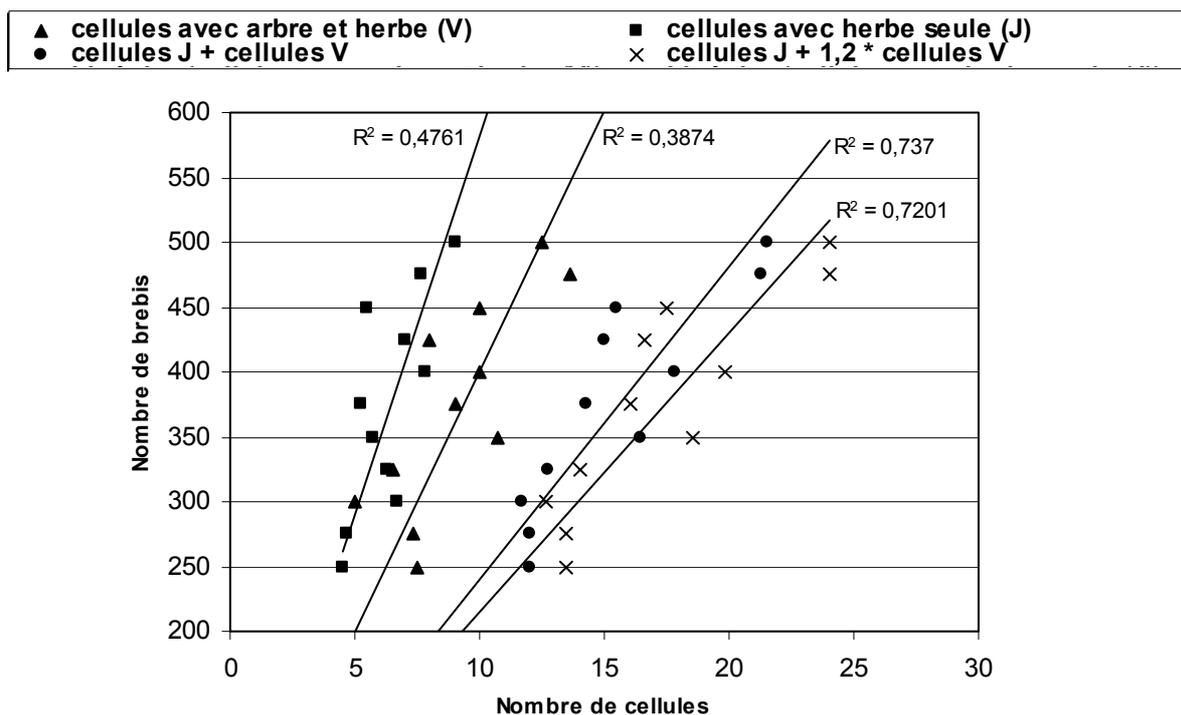
La décision d'acheter des brebis dépend a priori fortement du capital à disposition. En effet, l'achat d'animaux n'entraîne pas seulement un coût ponctuel relatif au prix même des brebis, mais également un coût supplémentaire sur tous les tours à venir car le droit de pâturage est proportionnel à la taille du troupeau. Un berger qui décide d'augmenter son troupeau doit donc d'abord regarder s'il a de quoi payer les animaux et le droit de pâturage du tour suivant. S'il ne fait pas cette vérification, il court automatiquement à la faillite.

En fait, la décision d'acheter d'animaux n'est **pas liée à la quantité d'argent** disponible puisque dans les parties où il y a eu achat, le montant du capital du berger était variable. Nous pouvons tout naturellement supposer qu'un autre facteur intervient, comme par exemple la valeur pastorale.

### 2.3.3. L'achat d'animaux a-t-il une relation avec la valeur pastorale de la forêt ?

J'ai supposé qu'un berger décide d'**augmenter la taille** de son troupeau lorsqu'il considère qu'il y a **suffisamment de fourrage** dans la forêt pour nourrir quelques brebis supplémentaires. L'indicateur permettant d'apprécier le potentiel fourrager de la forêt est le nombre de cellules jaunes et vertes, car ces cellules présentent un fort potentiel fourrager.

Dans la figure 6, l'évolution de la taille du troupeau en fonction du nombre de cellules vertes ou jaunes montre une tendance à l'augmentation du troupeau corrélée avec l'augmentation du nombre de ces cellules. La régression linéaire donne un coefficient variant autour de 0,4-0,5 ce qui n'est pas satisfaisant. J'ai donc supposé que l'achat d'animaux était lié au nombre total de cellules à fort potentiel fourrager. La valeur des cellules vertes étant en moyenne plus élevée que celle des jaunes, j'ai donc donné un poids plus important aux cellules vertes. Cependant, lors de la comparaison des coefficients de régression des courbes montrant l'évolution du nombre d'animaux avec la somme pondérée (coefficient de 1,2) ou non des cellules vertes et jaunes, nous constatons que ceux-ci sont identiques : le berger en tient donc compte que de l'ensemble des bonnes cellules en herbe pour raisonner son achat d'animaux.



## Figure 6 : Evolution de la taille du troupeau en fonction du nombre de cellules à fort potentiel fourrager

### 2.4. Quels sont les objectifs des travaux ?

Il s'agit de comprendre les attentes du berger et du forestier vis-à-vis des travaux prioritaires d'amélioration à effectuer dans la forêt.

#### 2.4.1. Quelles sont les cellules qui subissent le plus de travaux ?

La réponse à cette question me fournira des indications sur cellules qui ont le plus d'importance aux yeux du berger et du forestier.

Les cellules ayant subi le plus grand nombre de travaux sont les cellules numéro 63, 35, 31, 28, 45 et 56 (plus de 30 travaux). Ces cellules sont toutes de couleur **violette**, ce qui met en évidence leur **rôle stratégique**. En effet, elles contiennent des arbres et de la broussaille et donc :

- Elles sont susceptibles d'être transformées en cellules bleues par débroussaillage : un forestier avec un objectif de **production de bois** les regardera donc avec intérêt.
- Elles peuvent être transformées en cellules vertes en ajoutant un semis au débroussaillage : elles sont donc des sources potentielles de **fourrage** pour le berger.
- Elles ont un **risque d'incendie élevé** : des joueurs voulant faire de la DFCI auront donc pour objectif de diminuer le nombre de celles-ci.

Ces hypothèses sont confirmées par l'analyse des types de travaux appliqués à ces cellules (figure 7). Nous pouvons tout d'abord constater que tous les types de travaux ont été réalisés sur ces cellules : le forestier a donc le choix de faire ce qu'il veut sur les cellules violettes.

Les cellules les plus souvent débroussaillées et donc transformées en cellules bleues, sont les cellules numéro 28, 31 et 63. Leur transformation répond à deux cas possibles. Le forestier veut conserver le même nombre de cellules bleues tout au long de la partie mais celles-ci disparaissent soit par transformation en cellules vertes soit à cause de l'incendie : il transforme donc des cellules violettes afin de restaurer son stock de cellules bleues. Ou alors le forestier est productif et veut avoir le plus de cellules bleues possible.

Les trois cellules les plus débroussaillées et semées et donc transformées en cellules vertes, sont les cellules numéro 45, 35 et 56 : elles correspondent à des cellules faisant la transition entre deux massifs forestiers et placées de façon assez centrale par rapport aux cellules en herbe. Le berger a donc des cellules de bonne potentialité fourragère proche de celles qu'il a déjà, le forestier sécurise ses unités de gestion forestière en empêchant une propagation du feu de l'une à l'autre.

Cependant, toutes les cellules vertes ne sont pas créées à partir de cellules violettes (figure 8). En effet, d'une manière générale, plus il y a de cellules vertes, moins il y a de cellules bleues (A) : des cellules vertes peuvent donc aussi être créées à partir de cellules bleues. Le nombre de cellules bleues initial étant de 23, les parties dans lesquelles la somme des cellules vertes et bleues est inférieure à 23 (B) correspondent à celles où l'incendie a été important, la disparition de cellules boisées ne s'expliquant que par le feu. Enfin, un nombre de cellules bleues supérieur à 23 signifie qu'il y a eu transformation des cellules violettes en cellules bleues. Cependant, je remarque deux stratégies différentes : soit toutes les cellules violettes sont devenues bleues (C), soit une partie a été transformée en cellules vertes (D).

#### 2.4.2. Quels sont les travaux demandés par le berger et comment gère-t-il sa participation ?

Je voudrais comprendre les raisons pour lesquelles le berger décide de temps en temps de participer financièrement à des travaux, connaître les facteurs dont il tient compte pour mesurer le montant de son investissement, et enfin avoir des renseignements sur le but recherché de ses travaux c'est-à-dire ce qu'il attend comme résultat des travaux qu'il a financé.

*Dans quel type de travaux investit le berger et de quelle manière ?*

Le berger, en règle générale, investit dans des **travaux** qui lui **fournissent de l'herbe** :

- 56% des travaux réalisés avec la participation du berger sont des **semis**. Ces semis se font principalement sur des cellules bleues.
- 34% représentent des débroussailllements avec semis.
- Enfin, le reste correspond à des travaux de débroussaillage simple : il s'agit la plupart du temps de débroussaillage sur des cellules contenant de l'herbe et de la broussaille ; sinon ceci correspond à des situations où le berger opte pour la prudence en répartissant son investissement en deux temps : débroussaillage la première année, semis la deuxième.

Le berger participe financièrement à tous types de travaux sauf les reboisements (figure 9). Lorsque l'investissement est inférieur ou égal à 100, la participation est majoritairement pour un travail de semis. Quand le berger n'a pas beaucoup d'argent à investir, il préfère financer un travail qui coûte peu et qui lui est utile (augmentation de la valeur pastorale de la forêt) : dans 74% des cas, le berger prend complètement en charge les semis qu'il finance. Le berger peut également choisir de participer à un travail de débroussaillage et semis, avec un investissement couvrant tout ou partie des frais. Seuls 13% de ces travaux sont entièrement pris en charge par le berger. Lorsqu'il n'assure qu'une partie des frais, il s'engage à couvrir les frais de semis : c'est le cas pour 45% des ces travaux. Les travaux de débroussaillage sont plus rares mais sont en général assez bien couverts par la participation du berger.

*L'investissement du berger est-il dicté par l'état de la forêt ou par son capital ?*

J'ai supposé que la participation aux travaux devait avoir comme point de départ la valeur pastorale de la forêt : un berger n'investit que si cette valeur lui paraît insuffisante. Or ce n'est pas le cas. Même pour des valeurs faibles, la participation peut rester nulle. Cela est la conséquence de cette faible valeur pastorale de la forêt : le berger n'a pas pu nourrir correctement son troupeau, donc il n'a pas gagné d'argent, voire même il en a perdu, ce qui fait qu'il n'a pas de quoi investir dans des travaux.

J'ai regardé l'influence du capital sur l'investissement au tour 5 car ce n'est qu'à partir de ce moment que le berger commence à gagner de l'argent. J'ai remarqué que la participation aux travaux ne se fait qu'à partir d'un certain seuil de capital : l'investissement ne se fait que lorsque le capital est supérieur à 300. Sinon, le berger laisse le forestier payer les travaux tant qu'il estime qu'il n'a pas suffisamment pour investir sans se ruiner.

#### 2.4.3. Quels sont les travaux réalisés par le forestier ?

*Quels sont les objectifs du forestier ?*

Un forestier peut effectuer des travaux suivant différents objectifs tels que la **production** de bois, la conservation de la **biodiversité** ou la **défense** de la forêt **contre les incendies**.

Le tableau 1 nous fournit des indications sur les différents travaux réalisés par les forestiers.

Le premier objectif se réalise en débroussaillant des cellules violettes ou en reboisant. Cet objectif transparaît dans 21% des travaux réalisés.

Les deux autres objectifs ne sont pas vraiment caractérisés par des travaux particuliers. La DFCI privilégiera l'élimination des cellules embroussaillées à fort risque d'incendie et la création de pare-feu, mais c'est surtout la localisation des travaux qui compte. L'objectif biodiversité sera caractérisé par le maintien de tous les types de formations végétales.

Cependant, nous remarquons que les travaux de production d'herbe représentent 76% des travaux effectués. Nous avons déjà analysé la localisation des cellules vertes, il faut donc maintenant analyser celle des cellules jaunes. Les cellules qui sont le plus souvent transformées en jaune sont les cellules oranges numéro 22, 32 et 65 (figure 10). Elles sont situées à proximité des massifs forestiers et correspondent à des cellules stratégiques du point de vue DFCI. En effet, les cellules orange sont des cellules qui propagent fortement le feu : les transformer en cellules jaunes diminue le risque d'incendie sur les unités forestières. De plus, leur coût de transformation en pelouse reste raisonnable.

Afin d'attribuer à chacun des deux derniers objectifs une probabilité d'apparition, il faudrait regarder l'effet des travaux réalisés par le forestier sur l'indice de diversité et sur le nombre de cellules incendiées. Or, l'indice de diversité est calculé à chaque tour en fonction des travaux des deux acteurs, et l'incendie n'intervient qu'après toute une série de travaux réalisés par les deux acteurs : ainsi, il est impossible de distinguer l'effet propre du forestier. En prenant l'hypothèse que les variations de diversité et du nombre de cellules incendiées dépendent plus des travaux du forestier car ceux-ci sont plus nombreux, je peux dire que 35% des parties se sont jouées avec un objectif biodiversité, 38% avec un objectif DFCI.

#### *La création de prés répond-elle à un objectif DFCI ?*

De manière générale, plus l'investissement est élevé, plus le risque d'incendie est faible. Ceci n'est pas forcément dû à une volonté du forestier de protéger la forêt contre les incendies mais résulte indirectement des travaux réalisés : plus les travaux sont nombreux, plus le nombre de cellules à risque diminue sans pour autant qu'elles soient placées stratégiquement. Une diminution de l'indice de risque n'entraîne donc pas forcément une diminution du nombre de cellules brûlées (annexe 4).

Lorsque le forestier crée des cellules jaunes, il les positionnerait sur les pare-feu s'il avait un objectif DFCI, ce qui réduirait le nombre de cellules incendiées. La figure 11 va nous permettre d'analyser la relation entre le nombre de cellules jaunes et le nombre de cellules touchées par l'incendie. Tout d'abord, pour analyser cette figure, il faut avoir une idée de la taille possible de l'incendie. Sachant que dans les parties réalisées avec les étudiants, le feu prend toujours naissance dans la même case, un feu se déclenchant au démarrage brûlerait 25 cases.

Nous pouvons observer une tendance générale qui est que l'**augmentation du nombre de cellules jaunes** entraîne une **diminution du nombre de cellules brûlées** (A et B). Cependant, dans le cas B, le nombre de cellules jaunes est presque semblable à celui du cas A, et pourtant l'incendie est catastrophique : les cellules jaunes, soit ont été très mal placées et sans objectif DFCI, soit n'ont pas été pâturées et ont perdu leur efficacité de pare-feu.

Nous pouvons repérer deux sous-ensembles particuliers dans le groupe A. Le premier (A1) correspond à la réalisation de travaux dans un but clairement DFCI. De nombreuses cellules jaunes sont mises en place et réduisent la surface incendiée : les cellules sont placées

stratégiquement sur le pare-feu et sont pâturées, elles protègent efficacement la forêt contre la propagation du feu (B). Cependant, il existe un écart dans le nombre de ces cellules pour un même résultat : il faut en conclure qu'à partir d'un certain nombre de cellules bien placées, celles-ci ne sont plus utiles à la diminution du risque d'incendie mais seulement à l'augmentation de la valeur pastorale. Le deuxième cas correspond à un très faible nombre de cellules jaunes mais à un nombre de cellules brûlées moyen à fort (A2). Les forestiers n'avaient pas pour but de protéger les massifs et ils ont subi les conséquences de leurs travaux.

#### *Comment évolue l'indice de diversité au cours des parties ?*

L'indice de diversité initial est de 32 (figure 12). Nous pouvons donc constater que, dans la majorité des cas (80% des parties), les travaux des cinq premiers tours vont dans le sens d'une amélioration de la diversité (A) car les premiers travaux favorisent le développement de structures de végétation nouvelles (cellules jaunes et vertes). Les parties présentant une chute de l'indice correspondent à une faillite du berger et un abandon de la forêt qui alors s'embroussaille.

En fin de parties, les aménagements réalisés mènent à trois situations bien différentes (B).

- L'indice de diversité oscille autour de sa valeur initiale (I) : la proportion entre les structures de végétation n'évolue pas trop. Ceci correspond généralement au cas où peu de travaux sont faits et où les cellules en herbe sont systématiquement pâturées.
- L'indice continue d'augmenter : nous sommes clairement en présence d'acteurs avec un objectif biodiversité (II). Ces parties représentent environ 35% des parties jouées.
- Enfin, l'indice de diversité tombe en dessous du seuil initial (III). Deux cas de figure expliquent ce phénomène. De nombreux travaux sont effectués et la forêt devient dominée par des cellules bleues, jaunes et vertes, au détriment des cellules embroussaillées (marron, violettes et oranges). La disparition de ces structures de végétation réduit la diversité. Ou bien, l'incendie du tour 5 a détruit une grande partie de la forêt qui s'est couverte de maquis et les travaux effectués ensuite n'ont pas réussi à faire remonter l'indice de diversité.

## 2.5. Comment se raisonne l'implantation d'une coupure de combustible ?

Contrairement aux paragraphes précédents, la réponse à cette question provient surtout des différents entretiens que j'ai réalisés et m'a servi à modéliser les comportements d'acteurs avec un objectif DFCI

### 2.5.1. Objectif d'une coupure de combustible

La création de coupures de combustible a pour principal objectif de **cloisonner un massif forestier**, c'est-à-dire une entité combustible qui ne peut pas mettre le feu à une autre entité combustible donc séparée d'elle par des terres agricoles, des plaines viticoles (entretenues), etc., afin de **limiter la surface couverte par les incendies**. Le raisonnement se fait donc généralement à l'échelle du massif concerné, sauf en Corse où le massif forestier, par la définition donnée ci-dessus, recouvre toute l'île : il faut alors garder à l'esprit que l'on protège non pas quelques centaines d'hectares mais plusieurs milliers. De même, il est parfois difficile de délimiter un massif car celui-ci est morcelé par de petites zones agricoles, ce qui entraîne des problèmes de gestion et de mise en place d'aménagements.

Enfin, certaines coupures peuvent avoir comme objectif de protéger un village ou une zone boisée particulière (intérêt économique ou patrimonial).

### 2.5.2. Les éléments nécessaires au raisonnement

L'implantation d'une coupure se raisonne en observant tout d'abord le terrain et ses caractéristiques (tableau 2).

Toutes les personnes interrogées m'ont tout d'abord fait la remarque qu'il était difficile de proposer un plan d'aménagement du massif car plusieurs éléments ne figuraient pas sur la carte. Le **relief** est un paramètre essentiel car il joue sur la **dynamique du feu**. Une coupure de combustible se fait en crête, une coupure en fond de vallée étant inefficace du fait des phénomènes de saute de feu. Les passages les plus délicats sont les cols et les têtes de talweg : il s'y produit une accélération du vent et donc augmentation de la puissance du feu. Le relief peut également être un obstacle à la réalisation de l'ouvrage, qui doit se faire de façon mécanique à au moins 80%. De même, la **présence d'aménagements DFCI** fournirait une aide à l'implantation d'une coupure car serviraient d'appui. Malheureusement, le but du travail était de partir d'un massif vierge de tout aménagement, et le relief n'est pas encore une donnée disponible dans ma création de cartes Cormas.

Certaines personnes ont également noté l'absence de certains indicateurs qui leur semblaient nécessaires. Ainsi, dans le Var, la multiplicité des propriétaires forestiers et le caractère majoritairement privé de la forêt posent de nombreux problèmes en terme d'aménagement forestier ; le mitage de la forêt rend difficile la protection des habitations. Dans l'Aude, la majorité des coupures de combustible étant plantée en vigne, il est nécessaire de connaître les droits de plantation et la qualité du terrain. Dans le Gard, si les châtaigneraies sont bien entretenues, il n'est pas nécessaire de faire de grandes coupures de combustible.

Les éléments présents sur la carte et utiles à la mise en place d'une coupure sont le **vent dominant** car c'est lui qui renseigne sur la **direction probable du feu**, les **zones agricoles** et les voies de communication car elles vont servir de **zones d'ancrage pour la coupure**. La présence de villages peut orienter le choix de la localisation de la coupure. La végétation peut être un obstacle : les travaux se feront préférentiellement sur une végétation facile à travailler, qui peut être traitée mécaniquement (pour limiter les coûts d'ouverture) et qui ne repousse pas trop vite (pour limiter les coûts d'entretien). La présence d'arbres est quelquefois vue comme un atout car un couvert arboré homogène limite l'écoulement du vent et donc la vitesse de feu, constitue un écran protecteur qui intercepte les brandons, et agit négativement sur la repousse arbustive.

### 2.5.3. Localisation des coupures de combustible

Les coupures se font **parallèlement ou tangentiellement à la direction du vent** pour permettre une lutte de flanc, sauf en Corse où il est nécessaire de faire des coupures perpendiculaires afin d'éviter de brûler de trop grandes surfaces. Lorsqu'elles sont perpendiculaires, les coupures doivent être beaucoup plus larges pour être efficaces.

La localisation d'une coupure va fortement dépendre de ce qui est déjà existant, tel que des **zones d'activité agricole** ou des **voies de communications**. Ces zones d'activité agricole sont de type différent suivant les départements : vignes en Aude, élevage (montagne) ou vergers (plaine) en Corse, châtaigneraie dans le Gard, remise en culture d'oliveraies ou sylvopastoralisme dans le Var, etc. Il se peut que ces zones soient parfois mal placées du point de vue de la dynamique du feu et n'aient pas les conditions techniques d'application requises : le fait d'y implanter une coupure affecte l'efficacité de celle-ci. Le principe est quand même de s'appuyer au plus sur ces zones agricoles en consolidant celles-ci avec une orientation DFCI, puis de les lier avec création de nouvelles zones agricoles ou par simple

débroussaillage. Pour ce qui est des voies de communication, elles sont très souvent intégrées à une coupure par débroussaillage de part et d'autre.

#### 2.5.4. Etude d'un exemple

Le travail sur carte, représenté sur la figure 13, s'est réalisé en deux temps : tout d'abord, mon interlocutrice a du **compléter la carte** avec des indications telles que les villes, les voies de communication, le vent dominant ; puis elle a **dessiné l'aménagement DFCI** et expliqué son raisonnement.

Sur la carte du Var, la mer a été placée au Sud et le vent dominant (le Mistral) souffle du nord-ouest au sud-est ce qui correspond à la situation réelle. La ville principale se situe au bord de la mer et est entourée de maisons isolées : cela correspond au mitage que l'on peut observer dans ce département. De petits villages se trouvent dans les terres et sont entourés de zones agricoles, celles-ci n'étant pas présentes sur la carte initiale et paraissant indispensable à la réalisation du travail de construction de la coupure. Du point de vue des routes, la ville est entourée d'une sorte de rocade et se situe sur une route littorale. Chacun de deux villages est desservi par une route qui se prolonge pour sortir du département ou qui se transforme en une simple piste. Des pistes relient les villages et les zones agricoles.

La construction de l'aménagement DFCI peut être divisée en plusieurs étapes.

La personne enquêtée a tout d'abord repéré les **axes de communication** (piste ou route) qui pourraient servir d'appui à la coupure, notamment celles qui sont **parallèles** ou tangentes à la direction du Mistral. La piste prenant naissance au coin nord-ouest de la carte et prolongée par la route a donc de ce point de vue été considérée comme le support de l'ouvrage principal. Il a été prévu de le débroussailler sur toute sa longueur ainsi que la piste, sur une largeur de vingt mètres de chaque côté augmentée à l'approche du village, la **zone agricole** pouvant servir d'appui. Dans le coin est/nord-est de la carte, un ouvrage secondaire a été proposé en s'appuyant sur la route menant du village à la ville et sur la piste.

Toutefois, afin de bien compartimenter le massif, il a été envisagé de faire un troisième ouvrage. Malheureusement, la piste reliant les deux villages est très mal orientée vis-à-vis du vent (elle est perpendiculaire à celui-ci). La personne interrogée a donc décidé d'abandonner cette piste et d'en créer une tangentielle au vent, passant par les zones agricoles du village le plus à l'ouest et le massif entretenu au nord qui servent ainsi de zones d'ancrage.

Enfin, au sud, elle a envisagé de renforcer la zone agricole proche de la ville afin d'améliorer la protection, en supposant que le débroussaillage obligatoire autour des maisons a été fait. Des points d'eau ont été prévus massivement sur l'ouvrage principal, notamment au niveau des croisements.

### 3. Une étape indispensable : la formalisation

La construction du modèle implique la formalisation des paramètres et des comportements des acteurs définis ci-dessus. Cette formalisation doit permettre une transcription logique en langage informatique. Elle doit donc être claire et complète.

Un schéma récapitulant les grandes procédures du modèle SylvopastJeu est disponible en annexe 5.

### 3.1. Le fonctionnement de la forêt

#### 3.1.1. L'embroussaillage

Les facteurs jouant sur l'embroussaillage sont l'itinéraire technique, le type d'espèce arbustive et le piétinement d'un troupeau. Afin de trouver des équations à intégrer au modèle, il m'a d'abord fallu choisir les courbes d'embroussaillage sur lesquelles j'allais m'appuyer pour faire apparaître tous ces facteurs.

Il m'a paru logique de conserver la courbe avec débroussaillage seul et celle avec débroussaillage et pâturage. En effet, la comparaison des deux devait me permettre d'**attribuer au pâturage un coefficient de réduction de l'embroussaillage**. Considérant que la deuxième courbe donnait une vitesse d'embroussaillage pour une valeur moyenne de pression de pâturage, j'ai décidé de **faire varier cette vitesse en fonction de la pression de pâturage** : lorsque la pression de pâturage est faible, l'embroussaillage est inférieure à 300m<sup>3</sup>/ha, si elle est forte elle est supérieure.

La courbe d'embroussaillage après fertilisation me paraissait également intéressante afin de montrer la différence d'impact du troupeau en fonction de la quantité d'herbe. J'ai considéré qu'une pression de pâturage très faible n'avait pas d'influence sur l'embroussaillage.

Je suis donc ainsi arrivée à trouver des équations correspondant à différentes situations de pâturage. Suivant les cas, l'augmentation de phytovolume arbustif est de :

- ◆ pression de pâturage < 500 bêtes : + 870m<sup>3</sup>/ha/an
- ◆ pression de pâturage > 500 bêtes :
  - herbe non semée : + (415 – (pression de pâturage – 50))m<sup>3</sup>/ha/an
  - herbe semée : + (225 – (pression de pâturage – 50))m<sup>3</sup>/ha/an

#### 3.1.2. Le climat

Le climat conditionne la croissance de l'herbe et donc la quantité de fourrage disponible pour le berger. Il est donc important de rentrer dans le modèle les données concernant le type de saison c'est-à-dire la **probabilité** d'avoir chaque année un automne, un hiver et un printemps **sec, moyen ou humide**.

Pour cela, il m'a fallu recueillir des données sur le climat de plusieurs années précédentes et calculer les fréquences d'occurrence d'un automne humide, d'un hiver sec, etc... Les données que j'ai utilisées sont les relevés effectués par l'INRA au cours du suivi d'une exploitation sylvopastorale. Cependant, cette méthode des fréquences d'occurrence ne peut être valable que si nous disposons de données sur de nombreuses années, or pour l'instant je n'ai réussi à n'en avoir que sur douze ans. Les résultats que j'ai trouvés ne sont donc pas significatifs.

#### 3.1.3. La pousse de l'herbe

Les tableaux fournissant les valeurs des données en gras dans ce paragraphe se trouvent en annexe 6.

##### *Croissance de l'herbe seule*

Avant de connaître la croissance journalière de l'herbe, il m'a fallu tout d'abord établir le **nombre de jours efficaces** par saisons. Un jour efficace est un jour pendant lequel il ne gèle pas et il n'y a pas de déficit hydrique. Pour cela, je me suis appuyée sur des relevés météorologiques existant concernant la forêt de Palayson. La date de début de l'automne et de

fin de printemps peut être déterminée à partir du bilan hydrique, celle du début de l'hiver à partir des sommes de températures (Etienne *et al.*, 2002). J'ai défini le jour 0 comme étant le 240<sup>ème</sup> jour de l'année. J'ai fait ce choix dans le but de faciliter mes calculs et parce que ce jour correspond au premier chiffre rond précédent le début d'un automne précoce.

A partir du nombre de jours efficaces par saison et au **début des saisons**, il est possible d'établir des calendriers de **début et fin de pousse de l'herbe** suivant le climat. J'ai décidé, pour plus de facilité, que les jours efficaces seraient consécutifs, ce qui revient à faire l'hypothèse d'une croissance ininterrompue de l'herbe au cours de la saison (figure 14). Le mode de détermination du début et de la fin des phases de pousse de l'herbe est détaillé en annexe 7.

Les expérimentations effectuées par l'INRA m'ont également fourni des renseignements concernant la **croissance saisonnière de l'herbe** hors concurrence. J'ai donc établi la **croissance de l'herbe journalière** en divisant la croissance de l'herbe saisonnière par le nombre de jours efficaces par saison. Pour simplifier le modèle, j'ai choisi de n'attribuer à la croissance de l'herbe journalière qu'un coefficient moyen et indépendant des types de saison. L'effet du climat va être légèrement atténué à cause de ce coefficient unique, cependant il sera encore bien marqué par le fait que le nombre de jours pendant lesquels l'herbe va pousser en sera dépendant.

#### *Croissance de l'herbe sous arbre et arbuste*

Ayant à ma disposition la courbe de croissance de l'herbe seule, j'ai pu moduler celle-ci en fonction de la présence d'arbustes ou d'arbres.

Tout d'abord, il me faut définir les différents seuils d'embroussaillage : si le recouvrement de broussaille est inférieur à 1000 m<sup>3</sup>/ha, l'herbe est considérée comme seule, la combinaison herbe et broussaille se situe dans une fourchette allant de 1000 m<sup>3</sup>/ha à 4000m<sup>3</sup>/ha, enfin, il n'y a plus d'herbe à partir d'un embroussaillage de 4000m<sup>3</sup>/ha.

D'après les données sur la croissance de l'herbe dans des parcelles en cours d'envahissement par de la broussaille, la production d'herbe diminue de 5% par tranche de 250m<sup>3</sup> d'embroussaillage. La production d'herbe seule peut donc être modulée par application d'un coefficient de la forme :  $1 - (0,05 * \text{Volume de broussaille} / 250)$ . Ainsi, plus le volume de broussaille sera élevé, plus la croissance de l'herbe sera réduite.

Pour ce qui concerne l'herbe sous un couvert arboré, les données à ma disposition n'étaient pas satisfaisantes, j'ai donc essayé d'estimer avec l'aide de mon maître de stage, **des coefficients** rendant compte de **l'effet des arbres** sur la production fourragère. Nous nous sommes pour cela basés sur l'expérience de mon maître de stage en la matière et sur notre connaissance des différentes influences que peuvent avoir les arbres sur l'herbe aux différentes saisons.

### 3.2. Des acteurs aux agents virtuels

Les comportements humains sont trop complexes pour qu'ils puissent être implémentés dans un modèle. Il nous a donc fallu faire des choix dans les actions que nous allions coder et ne retenir que les principales. Nous avons choisi de retenir la caractérisation du rapport de force entre les deux acteurs, leur mode d'organisation spatiale, les modes de construction de leurs souhaits de travaux et les modalités de négociation.

### 3.2.1. Les relations entre acteurs

Nous avons vu qu'il existait plusieurs types de relations entre le berger et le forestier. La relation de pouvoir ou d'entente entre ces deux acteurs est étroitement liée au caractère propre de la personne et ne change pas durant toute la simulation. Il existe cinq grands types de relations entre le berger et le forestier (Etienne, 2000) que nous avons décidé d'utiliser dans le modèle :

- **Exclusion** : le forestier ne fait rien en faveur du berger, le pousse à faire faillite et à quitter la forêt (relation EX)
- **Forestier dominant** : le forestier impose son choix de gestion de la forêt sans pour autant en exclure totalement le berger (relation FD)
- **Berger dominant** : le berger obtient tous les travaux qu'il veut de la part du forestier (relation SD)
- **Séparation** : chacun agit de son côté sans empiéter sur le « territoire » de l'autre (relation AP)
- **Accord** : le berger et le forestier jouent de concert, avec la même volonté de satisfaire les priorités de l'autre. Nous avons scindé ce cas en où le forestier est dominant (relation AF) et un autre où le berger prend la main (relation AS).

Nous avons fait de cette relation entre les deux joueurs, un attribut du forestier car nous estimons que c'est à lui d'organiser la négociation étant donné que la tâche finale (faire des travaux) lui incombe. Ainsi la procédure « négociateur » se trouve dans l'entité « stratégie forestier » et se décline en différentes versions suivant la relation entre les joueurs.

La valeur attribuée à cet attribut est tirée au sort entre les six proposées.

### 3.2.2. L'organisation de l'espace

Nous avons vu que les bergers et les forestiers ne voyaient pas la forêt sous le même aspect. Le choix de ces stratégies se fait durant la phase d'initialisation. Le type stratégie est par un tirage au sort pondéré accordant une probabilité d'occurrence 50% aux quartiers, de 50% aux circuits, de 70% aux massifs et de 30% aux parquets. Chacun des deux acteurs va ensuite construire ses unités de gestion correspondant à une organisation différente de l'espace.

Des différences de comportements résultent de ces stratégies. Nous avons donc décidé de créer, en plus des entités sociales « berger » et « forestier », des **entités passives** « stratégie berger » et « stratégie forestier » dans lesquelles sont codées tous les **comportements** qui sont **propres à des stratégies**, comme par exemple la construction des entités de gestion.

#### *Mode de construction des unités de gestion*

La construction des unités de gestion pastorales suit une règle très simple : **toute cellule contenant de l'herbe** (cellules jaunes, vertes, marrons et oranges) peut être intégrée au circuit ou à un quartier de pâturage.

Lorsqu'un berger adopte la stratégie '**quartier**', il construit ceux-ci par **agrégation** des cellules en herbe et cherchera à agrandir ces agrégats par ajout de cellules en lisière ; lorsqu'il adopte la stratégie '**circuit**', il construit celui-ci par sélection de **cellules isolées** les plus productrices et cherchera toujours à conserver l'aspect de « chaîne » de son circuit. Le nombre de cellules appartenant à chacune des deux unités de gestion dépend du nombre de brebis du troupeau à nourrir.

Evidemment, au fur et à mesure que le temps s'écoule, ces unités évoluent de par la création

ou la disparition de cellules enherbées ayant pour cause des travaux, un incendie ou l'embroussaillage naturel. Il faut donc reconstruire ces unités à chaque tour.

Les unités de gestion forestière se construisent de manière différente car elles ne répondent pas à la même attente. Les parquets sont définis par un critère de taille, les massifs par un critère de composition.

En ce qui concerne les **parquets**, le forestier doit repérer les **agglomérats de quatre cellules** possédant au moins trois cellules boisées, embroussaillées ou non. Ces parquets sont donc de composition végétale mixte et d'une taille fixe de quatre cellules (40 ha).

Les **massifs** sont des ensemble constitués de **cellules boisées** non embroussaillées et de cellules boisées embroussaillées ou enherbées voisines d'au moins deux cellules boisées non embroussaillées. Ce mode de construction permet d'obtenir des massifs relativement compacts et entièrement boisés.

#### *Les indicateurs propres à chaque unité*

Différents indicateurs sont attribués aux quatre unités de gestion.

J'ai défini comme **pare-feu l'ensemble des cellules de lisière pouvant potentiellement mettre le feu au massif**. Chacune de ces cellules possède un attribut appelé **dangerosité** qui est le **nombre de cellules** du massif qu'elles protègent qui seraient **brûlées** si cette cellule prend feu.

Les parquets sont caractérisés par quatre indicateurs : la sensibilité au vent, le risque de feu, la valeur productive et le coût de transformation. La **sensibilité au vent** correspond à l'exposition du parquet par rapport au vent dominant (vent d'ouest) et par rapport aux autres parquets : elle est nulle pour un parquet isolé et égale à 1+nombre parquets à l'est du parquet concerné pour les parquets juxtaposés. La **valeur productive** correspond à la proportion de cellules bleues dans le parquet. Le **risque d'incendie** correspond à la somme des dangerosités des cellules de lisière pour chaque parquet. Le **coût de transformation** correspond au coût de transformation de toutes les cellules du parquet en cellules bleues.

Les quartiers de pâturage possèdent comme attribut leur valeur pastorale.

Enfin les cellules du circuit possèdent toutes une **valeur pastorale** variant en fonction du climat.

#### 3.2.3. Le pâturage en forêt

Les résultats du pâturage sont visibles à l'écran, les cellules choisies par le berger et pâturées par le troupeau étant signalées par la lettre P.

#### *Choix des cellules à pâturer*

De manière générale, le choix des cellules à pâturer est directement lié au climat car il détermine la quantité de fourrage disponible dans chaque cellule.

Les quartiers se pâturent un par un. Le passage de l'un à l'autre ne se fait qu'après épuisement de la ressource fourragère du quartier en cours de pâturage. De plus, le choix de l'**ordre de pâturage des quartiers** se base sur la **quantité de fourrage disponible** dans ceux-ci : le berger les pâture dans l'ordre décroissant de leur potentiel fourrager, avec comme exception l'obligation de pâturer les cellules jaunes ou vertes isolées même si leur potentiel fourrager est plus faible qu'un quartier de plus grande taille car ce sont de bonnes cellules qu'il ne faut pas laisser s'embroussailler.

Le **circuit** se pâture dans un certain ordre. Il se commence par une extrémité c'est-à-dire une cellule proche d'un coin de la carte, appartenant à un agrégat de cellules à fort potentiel fourrager et ayant une valeur pastorale favorable suivant le climat. Puis les **cellules** sont **pâturées de proche en proche**, la préférence étant donnée à une cellule un peu plus éloignée

mais de plus forte valeur pastorale plutôt qu'à une cellule proche de plus faible valeur.

#### *Achat d'animaux*

Le berger choisit de temps en temps d'acheter des animaux. L'augmentation du troupeau est régie par deux conditions : il faut qu'il y ait **plus de fourrage** dans la forêt que le minimum nécessaire pour nourrir le troupeau actuel, il faut que le berger ait **suffisamment d'argent** pour acheter les animaux et payer leur droit de pâturage. Cependant, j'ai fixé une taille maximale du troupeau à 500 têtes, m'étant aperçu que même les bergers capitalisant sur leur troupeau, ne dépassaient jamais ce nombre et finissaient par capitaliser sur leur argent. De plus, j'ai fait en sorte que le berger conserve un capital minimum malgré ses estimations d'achats et de dépenses, afin de pouvoir supporter une année climatique difficile.

#### 3.2.4. La construction des listes de cellules à améliorer

##### *Le berger : augmenter la ressource fourragère*

Nous avons vu que l'investissement du berger se faisait essentiellement en vue d'une amélioration pastorale. J'ai donc tenu compte de ce dernier point pour établir les règles de construction des listes de cellules proposées par le berger.

La priorité est donnée à l'**amélioration des unités de pâturage existantes** du berger. Cette collection de cellules contiendra donc toutes les cellules des unités dont la valeur pastorale peut être globalement améliorée (collecI). Par exemple, si une cellule orange (herbe et broussaille) appartient à une unité de pâturage, elle sera intégrée à la collection car un simple débroussaillage la transformerait en cellule jaune (herbe) et lui ferait augmenter sa valeur pastorale moyenne à un niveau bien supérieur.

Deux autres collections de cellules vont être construites en vue d'**augmenter la taille des quartiers de pâturage** ou de **diminuer les déplacements au sein d'un circuit**. La première collection contiendra des cellules boisées pouvant être transformées en cellules vertes (collecV), la deuxième contiendra des cellules non boisées pouvant être transformées en cellules jaunes (collecJ). La priorité sera donnée à la première collection car nous avons vu que le berger préférerait avoir à sa disposition des cellules vertes (arbre et herbe) qui fournissent de l'herbe en plus grande quantité et surtout qui offrent un abri par ses arbres.

Dans le cas de la stratégie 'quartier', ces deux collections sont construites en repérant toutes les cellules en lisière de quartier. Dans le cas de la stratégie 'circuit', elles le sont en repérant toutes les cellules qui sont à mi-chemin entre les cellules du circuit classées dans l'ordre où elles ont été pâturées. Lors de la phase de négociation, le berger va plutôt mettre en avant collecV car il préfère avoir des cellules vertes

Le berger étant à la recherche de cellules vertes, nous lui avons enfin attribué une collection des cellules boisées de la forêt, potentiellement transformables en cellules vertes, n'appartenant pas aux collections précédentes (collecO).

En ce qui concerne l'**investissement** du berger, nous supposons que le berger ne participe aux travaux que s'il estime que **la forêt n'offre pas suffisamment de fourrage** à son troupeau et qu'il lui reste ensuite assez d'argent pour payer son droit de pâturage au tour prochain. De plus, au vu des résultats de l'analyse des jeux de rôle, nous estimons qu'un berger va investir une somme d'argent comprise entre 50 et 350.

##### *Le forestier : protéger ou produire ?*

Nous avons fait le choix, qu'outre l'objectif de favoriser la biodiversité, un forestier pensait

tout d'abord à **protéger ses unités puis à les améliorer** dans un sens de production de bois. En effet, cette démarche semble à première vue logique : le forestier ne va pas payer des travaux de production de bois s'il n'est pas sûr que celui-ci ne brûlera pas juste après et que son investissement n'aura pas été vain. Nous retrouvons cette logique dans l'étude des jeux de rôle : durant les premiers tours les forestiers ne font de travaux qu'à l'extérieur des unités de gestion, puis ils en viennent à faire des travaux à l'intérieur de celles-ci.

Afin de gérer ses unités, le forestier a besoin d'un certain nombre d'indicateurs. Ceux-ci vont lui servir à prévoir quelle cellule il est important de traiter afin de protéger ses unités de gestion. Les quatre indicateurs des parquets (sensibilité au vent, risque de feu, valeur productive et coût de transformation) vont permettre de classer ceux-ci de façon à mettre en avant les parquets les plus exposés au feu. Il en est un peu de même pour les massifs. Les cellules de lisière vont être classées et donc traitées en fonction de leur dangerosité décroissante.

La décision de passer à l'objectif de protection à celui de production est déterminée par un **taux de satisfaction de protection** des unités de gestion. Lorsque le risque d'incendie est inférieur à la proportion de cellules violettes pour un massif ou à 2 pour un parquet, l'unité de gestion correspondante est considérée comme suffisamment protégée pour que le forestier commence à **faire des travaux d'amélioration** à l'intérieur en vue d'une production de bois. Les travaux internes aux parquets se font tout d'abord sur les cellules ayant un coût de transformation faible.

Il en résulte deux collections, l'une contenant des cellules dites de pare-feu (collecFB) ; l'autre contenant les cellules des unités bien protégées et qu'il faut améliorer (collecMU). Ces collections vont changer d'un tour sur l'autre, d'une part car des travaux auront été effectués sur certaines de ces cellules : celles-ci n'apparaîtront plus dans la collection, d'autre part car le taux de satisfaction aura été atteint pour certaines unités : les cellules de leur pare-feu ne seront plus proposées. Le forestier va prioritairement améliorer ses unités déjà protégées donc faire des travaux sur des cellules de collecMU, puis protéger celles qui ne le sont pas donc traiter les cellules de collecFB.

Enfin, nous avons décidé d'attribuer au forestier une troisième liste de cellules contenant toutes les cellules qui ne sont pas stratégiques à ses yeux c'est-à-dire toutes les cellules de la forêt excepté celles des pare-feu à améliorer et celles des unités de gestion (collecDC).

### 3.2.5. La phase de négociation

Le but de la phase de négociation est qu'un **accord** soit passé entre les deux joueurs afin qu'ils déterminent **les cellules sur lesquelles vont être faits des travaux**. C'est dans cette phase de négociation que la relation qui existe entre les deux agents va jouer un rôle important car elle va déterminer quel joueur va être le plus satisfait des travaux réalisés. En effet, suivant le type de relation, les cellules choisies comme étant celles sur lesquelles les travaux vont être faits, appartiendront à des collections différentes.

Avant de décrire les différentes négociations, j'ai besoin de rappeler le niveau d'intérêt que chacun des deux agents porte à ses collections. Pour le berger, l'intérêt est décroissant de collecI à collecO, en passant par collecV et collecJ. Pour le forestier, l'intérêt est décroissant de collecMU à collecDC en passant par collecFB.

Les négociations les plus simples correspondent aux cas EX et AP.

Dans le premier cas, le forestier ne se préoccupe pas des collections du berger, seules comptent les cellules appartenant à ses collections de protection et d'amélioration de ses

unités. Les cellules sélectionnées pour subir des travaux sont les cellules proposées en premier dans collecMU et collecFB, dans la limite de l'argent disponible.

Dans le deuxième cas, chacun des acteurs effectue séparément des travaux sur les cellules de ses propres collections. Le forestier sélectionne donc les premières cellules de collecMU et de collecFB dans la limite de ses moyens financiers, le berger les premières cellules de collecI, de collecV et de collecJ dans la limite de sa participation financière.

Les autres types de négociation font toutes intervenir une comparaison des collections de chacun, ce qui débouche sur une sélection des cellules communes. Cependant, suivant la relation entre les joueurs, les collections comparées ne vont pas être les mêmes et la comparaison ne se fera pas dans le même ordre. Enfin, lorsqu'il n'est pas possible de trouver des cellules communes, les travaux se font sur les cellules des collections du joueur le plus favorisé par la relation (tableau 3).

Dans le cas AF, nous décidons que les travaux doivent satisfaire les deux acteurs, avec un léger avantage pour le forestier : c'est pourquoi nous recherchons les cellules de pare-feu qui intéressent le plus le forestier et qui se retrouvent dans les collections du berger ordonnées selon ses préférences. Dans le cas AS, nous décidons que les travaux doivent satisfaire les deux acteurs, avec un léger avantage pour le berger : c'est pourquoi nous recherchons les cellules des collections du berger ordonnées selon ses vœux, qui pourraient intéresser le forestier d'un point de vue DFCI ou qui du moins qui ne présentent pour lui aucun intérêt. Dans les deux cas, si aucune cellule commune n'est trouvée, c'est le forestier qui décide seul des travaux.

Dans le cas FD, le forestier fait en alternance des travaux sur des cellules de pare-feu car elles fournissent de l'herbe au berger, et sur des cellules de ses unités de gestion. Les cellules de pare-feu sont choisies parmi celles communes avec le berger mais le forestier ne tient pas compte des priorités de celui-ci quant à l'ordre préférentiel de ses collections.

Dans le cas SD, c'est le berger qui décide des travaux. Il cherche donc tout d'abord à réaliser des travaux sur les cellules de sa collecI, mais qui ne perturbe pas l'organisation des unités de gestion forestière donc appartenant à collecFB ou collecDC. Toutefois, si aucune cellule commune n'est trouvée, le berger sélectionne ses cellules préférentielles quelle que soit leur localisation.

### 3.2.6. La réalisation des travaux

A chaque fois que les acteurs se sont mis d'accord sur un travail, celui-ci est immédiatement réalisé. Les causes qui rendent impossible la réalisation d'un travail sont déjà implémentées dans le modèle, il s'agit d'un coût de transformation plus élevé que le capital disponible et d'un type d'aménagement irréalisable sur certaines cellules (par exemple, un semis sur une cellule enherbée).

Sur les cellules appartenant à une **unité de gestion forestière**, les travaux réalisés vont dans le sens d'une **production de bois** et donc de la création de cellules bleues. Ainsi, sur des cellules où il n'y a pas d'arbre (cellules rouges, oranges ou jaunes), le travail est un reboisement ; sur les cellules où il y a des arbres et de la broussaille, le travail est un débroussaillage. Si des cellules marron (arbres, broussailles et herbe) se trouvent intégrées à des unités de gestion forestière, le forestier attend que l'herbe disparaisse par embroussaillage naturel pour effectuer un débroussaillage et transformer ces cellules, devenues violettes, en cellules bleues.

Sur les **autres cellules**, les travaux réalisés vont dans le sens d'une **diminution du risque d'incendie** et donc d'une création de cellules en herbe non embroussaillée. Les travaux sont

donc de type débroussaillage quand il y a de la broussaille et semis quand il n'y a pas d'herbe.

Ceci s'applique quel que soit le type de relation existant entre les deux acteurs sauf dans le cas d'un berger dominant (SD) : dans cette situation, aucune distinction n'est faite entre les cellules appartenant ou non à des unités forestières et les travaux vont tous dans la sens d'une plus grande production d'herbe.

Les travaux provoquent une **modification des structures de végétation**. Les cellules ayant subi un reboisement deviennent bleues. Pour celles ayant subi un autre type de travail, il suffit d'enlever ou de rajouter la couleur correspondant à la strate éliminée ou ajoutée à la teinte de la cellule. Par exemple, lors d'un semis sur une cellule rouge, nous rajoutons de l'herbe donc de la couleur jaune : la cellule devient donc orange.

## Quatrième partie : Simulations, analyse des résultats et discussion

A cette étape du travail, la mise en place et le fonctionnement du système sylvopastoral ont été tous deux formalisés puis implémentés, mais dans deux modèles distincts décrits précédemment : **Sylvopast** pour tout ce qui touche aux **dynamiques naturelles** et **SylvopastJeu** pour tout ce qui concerne les **comportements humains**. J'ai effectué des simulations sur Sylvopast pour vérifier la façon dont ont été codées les dynamiques naturelles, et sur SylvopastJeu pour vérifier si les comportements ont été représentés de manière correcte et donne des résultats satisfaisants quant aux conséquences de la gestion sylvopastorale sur la forêt.

Dans le premier, le pas de temps correspond à un jour car la dynamique de pousse de l'herbe est implémentée de façon journalière : pour observer quelques évolutions lors de mes simulations, j'ai dû faire tourner le modèle sur 5 ou 6 ans ce qui correspond à près de 2000 tours (une année ne faisant pas 365 jours car nous avons éliminé l'été durant lequel il ne se passe rien). Par contre, un tour du deuxième modèle correspond à une année : j'ai donc fait tourner SylvopastJeu sur 10 tours, ce qui est la règle pour les jeux de rôle.

Cette partie a pour but de présenter les résultats que j'ai observés lorsque j'ai fait tourner ces deux modèles séparément.

### 1. Présentation des scénarios des différentes simulations effectuées

#### 1.1. Concernant la végétation de la forêt

Ces simulations sont effectuées en faisant tourner le modèle Sylvopast suivant différentes modalités afin de mettre en évidence le fonctionnement des dynamiques.

##### 1.1.1. Une forêt vierge de toute intervention

Dans ce premier scénario appelé par la suite **scénario 'témoin'**, la nature reprend ses droits et les dynamiques naturelles suivent leur cours. **Aucune intervention** d'aucun type n'est effectuée dans la forêt : il n'y a pas de troupeau qui pâture ni de forestier qui fait des travaux. La broussaille et l'herbe suivent leur croissance naturelle.

Ce scénario correspond dans la réalité aux forêts privées non entretenues mais n'est pas, ou peu, intéressant en lui-même. Il permet tout d'abord de valider la prise en compte de dynamiques naturelles par le modèle et de tester les effets de variations climatiques. Il sert également de témoin lors des comparaisons avec les autres simulations dans lesquels sont prises en compte des actions de pâturage.

##### 1.1.2. Une forêt pâturée

Ce deuxième scénario, appelé par la suite **scénario 'troupeauX (X = nombre de brebis)** fait intervenir un troupeau ovin qui va pâture dans la forêt. Le pâturage est implémenté de la façon suivante : les brebis vont manger autant d'herbe qu'il est nécessaire pour subvenir à leurs besoins journaliers, elles ne sont pas présentes sur une année complète mais partent en été quand il n'y a plus d'herbe, le troupeau va imprimer une **pression de pâturage** aux

cellules sur lesquelles il va aller donc il va donc jouer sur la quantité d'herbe produite mais également sur le volume de broussaille.

Ce scénario a pour but de montrer **l'influence des pratiques pastorales** sur un territoire forestier en le comparant au scénario précédent où l'abandon de la forêt est total. Il va mettre en évidence les avantages et inconvénients du pastoralisme pour l'éleveur et pour le forestier.

## 1.2. Concernant le comportement des acteurs

Si nous combinons les deux types de stratégies du berger (circuit et quartier), les deux types de stratégies du forestier (parquet ou massif) et les six types de relations existants entre les agents (AF, AP, AS, EX, FD, SF), nous obtenons 24 situations différentes en ce qui concerne le comportement des acteurs de la gestion d'une forêt.

J'ai choisi de ne retenir que trois scénarios qui me paraissent refléter trois grands types de comportements du berger et du forestier et trois conséquences sur la forêt gérée par ceux-ci, notamment du point de vue de la prévention des incendies. Dans ces trois scénarios, seul le type de relation change. Les stratégies sont les mêmes (parquet pour le forestier et quartier pour le berger) et leur choix est justifié par certains scénarios.

### 1.2.1. Un forestier dominant

Dans ce scénario, appelé par la suite **scénario 'fdom'**, la relation entre le berger et le forestier est bien évidemment de type EX : **le forestier va imposer sa gestion** de la forêt et les travaux qui en résultent.

J'ai fait appel à la stratégie 'parquet' du forestier pour avoir un comportement plus marqué de la part de cet agent. En effet, si nous voulons observer des travaux d'amélioration des unités de gestion forestières (ce qui est fort probable étant donné le rapport de force), il est préférable d'être dans cette stratégie, certains parquets présentant dès le début de la partie un taux de protection satisfaisant. De plus, les cellules de pare-feu sont disposées de telle manière que les travaux d'amélioration qui pourraient y être faits n'arrangeront pas forcément le berger. La stratégie du berger est celle des quartiers pour une raison pratique : les calculs effectués dans cette stratégie sont courts et autorisent donc des simulations rapides.

### 1.2.2. Un berger dominant

Ce deuxième scénario, appelé par la suite **scénario 'bdom'** fait appel à la relation de type SD. **Le berger a cette fois-ci du pouvoir** sur le forestier : il va lui faire faire tous les travaux qui l'intéressent d'un point de vue pastoral.

Les stratégies 'quartier' et 'parquet' présentent l'avantage que les cellules proposées dans les collections du berger se trouvent souvent être des cellules appartenant aux unités de gestion du forestier et sont généralement des cellules boisées. En effet, dans la configuration actuelle de la carte, les quartiers se situent à proximité des parquets : les cellules qui permettraient de les agrandir se trouvent donc dans les parquets. De plus presque toutes les cellules boisées sont intégrées à un parquet : les cellules de la collecO du berger appartiennent donc toutes à des unités de gestion forestière. Le berger étant dominant, des travaux devraient donc être effectués sur ce type de cellules non pas en vue d'une amélioration forestière mais en vue d'une amélioration pastorale.

### 1.2.3. Une gestion sylvopastorale

Le dernier scénario, appelé par la suite **scénario 'accord'**, adopte la relation de type AF. **La gestion se fait collectivement** : le berger et le forestier se mettent d'accord sur tous les travaux à effectuer dans la forêt.

## 2. Analyse et interprétation des résultats issus des simulations

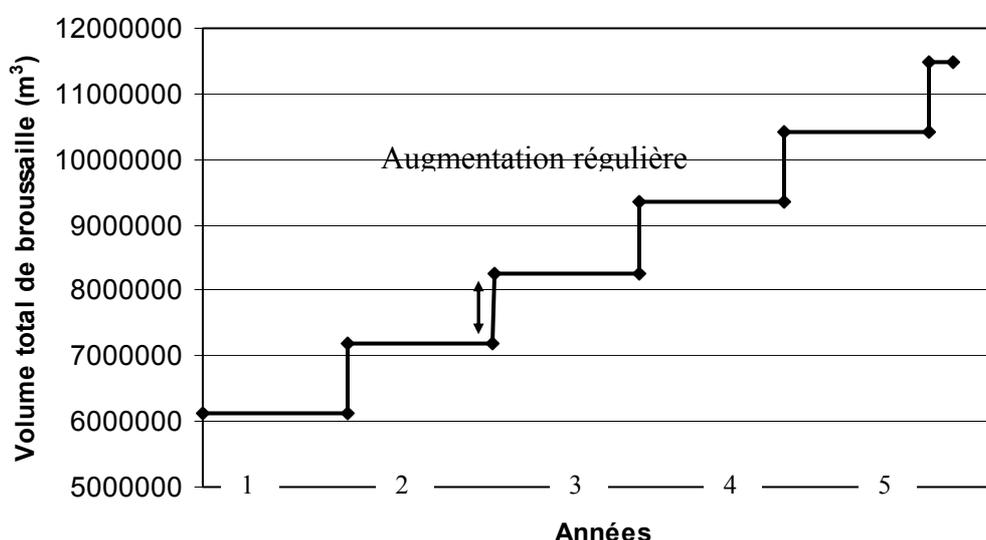
### 2.1. Du modèle Sylvopast

#### 2.1.1. La broussaille : un élément contrôlable de la forêt

##### *Augmentation annuelle de volume*

La broussaille ne croît en volume qu'**une seule fois par an**, à la fin d'une année de pâturage. Ceci est dû à notre manière de coder l'embroussaillage qui nécessite de connaître la pression de pâturage subie chaque année par chacune des cellules de la forêt.

Lorsqu'il n'y a aucune intervention extérieure c'est-à-dire dans le cas du scénario 'témoin', la broussaille croît de la **même quantité chaque année** (figure 15).



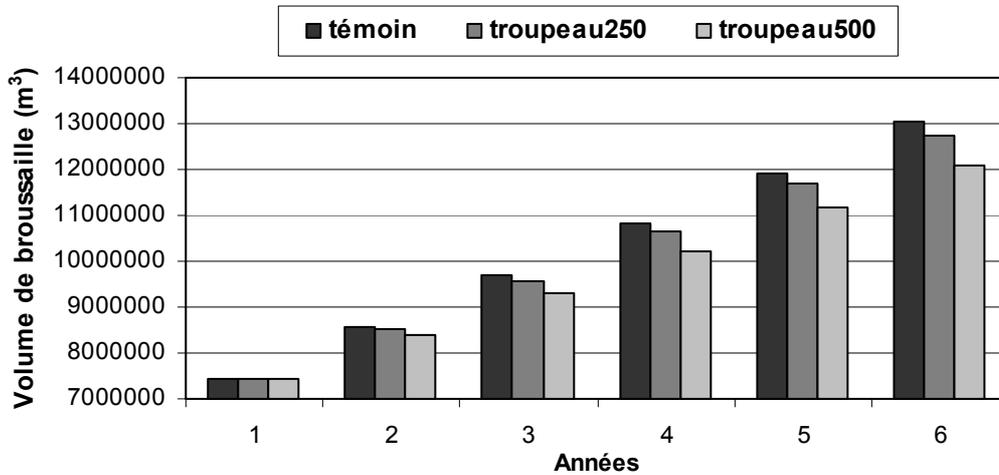
**Figure 15 : Dynamique d'embroussaillage sur cinq ans dans le cas du scénario 'témoin'**

Cette croissance ne dépend absolument pas du climat. La seule variation que nous pouvons observer entre différentes simulations du scénario 'témoin' est due à **la différence de végétation initiale** (figure 16). En effet, certaines cellules sont potentiellement « embroussaillables » c'est-à-dire qu'elles peuvent produire de la broussaille : il s'agit toutes les cellules contenant ou de l'herbe ou de la broussaille. Plus une carte contiendra de ces cellules, plus la quantité de broussaille totale produite sera importante. La quantité de broussaille produite en volume par an est proportionnelle au ratio de cellules « embroussaillables » de la forêt.

##### *Action du troupeau sur la broussaille*

La présence d'un troupeau dans la forêt fait **diminuer le volume de broussaille produit** au cours d'une année. Lorsque je lance des simulations suivant les scénarios 'témoin', 'troupeau 250' et 'troupeau 500' en faisant attention à prendre une même quantité initiale de broussaille,

j'observe que, plus les animaux du troupeau sont nombreux, plus la quantité de broussaille produite par an est faible (figure 17). Un troupeau de 250 animaux fait diminuer la quantité de broussaille de 5% par an environ ; un troupeau de 500 animaux, de 18%.



**Figure 17 : Influence du troupeau sur le volume de broussaille produite en début de chaque année**

De plus, du fait du changement de climat, des modifications du nombre de cellules pâturables dues à l'embroussaillement et du fourrage disponible, l'action du troupeau est différente d'une année sur l'autre. La pression de pâturage sur chaque cellule varie donc suivant les années ce qui fait que la broussaille **ne croît pas d'un volume identique chaque année** contrairement au cas du scénario 'témoin'.

### *Conclusion*

Nous avons vu que les deux principaux facteurs agissant sur la broussaille sont la proportion des différentes structures de végétation dans une forêt et le nombre d'animaux mis à pâturer dans la forêt. Ainsi, pour pouvoir contrôler l'embroussaillement dans un but DFCI, il va falloir tenir compte de ces deux paramètres.

Il faut tout d'abord analyser la végétation présente : une forêt peut apparaître comme relativement sûre du point de vue incendie car présentant un grand nombre de parcelles en prés, cependant il ne faut pas oublier que, sans entretien, ces parcelles vont s'embroussailler et deviendront très dangereuses. Si ces prés ne sont pas mis à pâturer, il va falloir effectuer au cours des années suivantes beaucoup de travaux de débroussaillage. Au contraire une forêt présentant des massifs boisés relativement propres c'est-à-dire sans broussaille et régulièrement entretenus, présente moins de risque car elle est peu productrice d'éléments combustibles. Ensuite, en fonction de la quantité de broussaille acceptée, il faudra adapter le nombre d'animaux du troupeau mis à pâturer dans le cadre d'une gestion sylvopastorale : plus le troupeau est important, plus les repasses d'entretien seront espacées.

#### 2.1.2. L'herbe : une ressource fragile

##### *Les trois phases de la croissance annuelle*

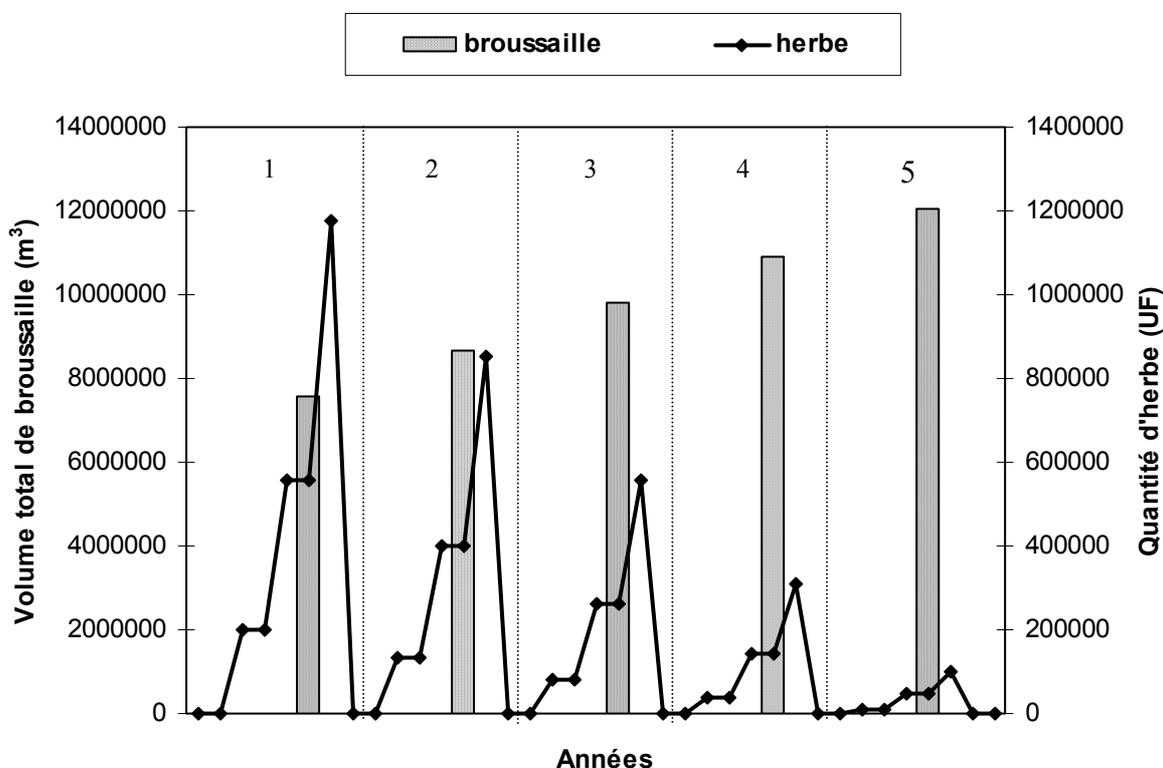
Lorsque nous regardons le graphique de la quantité d'herbe produite dans la forêt en fonction

du temps dans le cas du scénario ‘témoin’ (figure 18), il est tout d’abord possible de vérifier le fait que l’herbe pousse en **trois phases**, avec des périodes intermédiaires pendant lesquelles la croissance est nulle.

De plus, lorsque que le **climat** est modifié, l’aspect des courbes change : plus le climat est sec, moins il y a production d’herbe car le nombre de jours efficaces pour la croissance est moindre (figure 19).

#### *L’action néfaste de la broussaille*

La présence de broussaille gêne la pousse de l’herbe. Lorsque nous regardons les quantités d’herbe produites dans le scénario ‘témoin’ au regard des quantités de broussaille produites (figure 20), nous nous rendons compte que, d’années en années, la production annuelle d’herbe diminue alors que celle de broussaille augmente. Il y a donc une corrélation entre ces deux phénomènes.



**Figure 20 : Production d’herbe et de broussaille dans le cas du scénario ‘témoin’**

Cette **concurrence de la broussaille sur l’herbe** se traduit au final par la disparition de celle-ci. Suivant la proportion des différentes formations végétales de la carte initiale, l’herbe disparaît au bout de 4 ou 5 ans dans le scénario ‘témoin’.

#### *Avantage et inconvénient de la présence du troupeau*

Comme nous l’avons vu précédemment, le troupeau, par effet de piétinement et de broutage, ralentit la croissance de la broussaille. De même, nous avons constaté que la broussaille gênait la croissance de l’herbe. Ainsi, le **troupeau**, en agissant sur la strate arbustive, **favorise la pousse de l’herbe en diminuant la concurrence avec les arbustes**. C’est ce que nous

montre la figure 21 : la première année, la quantité d'herbe produite dans le scénario 'témoin' est plus faible que dans le scénario 'troupeau 500' car les animaux mangent une partie de l'herbe. Mais par la suite, malgré ce broutage de l'herbe, la quantité produite par an est plus forte dans le scénario 'troupeau 500' car le volume d'arbuste est plus faible.

Cependant de façon ponctuelle, la présence d'un troupeau fait diminuer la quantité d'herbe présente en forêt : il s'agit des périodes de latence entre les phases de croissance saisonnières. En effet, la croissance de l'herbe ne compense plus la perte de fourrage due à l'action de broutage du troupeau. Ce phénomène se remarque sur la courbe du scénario 'troupeau500' de la figure 21 : au lieu d'avoir un plateau pour chaque phase de latence, nous observons une courbe à pente négative.

### *Conclusion*

Le berger n'aura de l'herbe à sa disposition qu'une certaine période de l'année et à des quantités variables : il devra adapter son pâturage aux saisons mais également aux climats annuel et saisonnier, ceux-ci pouvant faire fluctuer énormément la production d'herbe. Il va de plus falloir qu'il fasse attention aux périodes critiques telles que le début de l'été pendant lequel l'herbe se dégrade très vite.

Il faudra également qu'il tienne compte du potentiel de production de la forêt pour adapter au mieux la taille de son troupeau. En effet, nous serions tentés, d'après le paragraphe précédent, de mettre le plus possible d'animaux à pâturer vu que le nombre n'a pas d'effet néfaste sur l'herbe mais favorise celle-ci. Cependant, durant les périodes de latence entre les croissances saisonnières, le troupeau n'a à sa disposition que ce qui a été produit à la saison précédente : un nombre d'animaux trop important par rapport à la quantité d'herbe disponible, entraînerait un surpâturage de la forêt et une mauvaise alimentation du troupeau. Par exemple un troupeau n'a pas assez à manger le premier automne s'il comprend 400 animaux dans une forêt très embroussaillée, ou 600 dans une forêt moyennement embroussaillée.

## 2.2. Du modèle SylvopastJeu

Nous pouvons constater l'influence de ces différentes gestions de la forêt par l'analyse de la carte finale mais également par l'étude de l'évolution des différents indicateurs à notre disposition, comme par exemple la quantité de fourrage, la proportion de cellules bleues et l'indice de diversité.

### 2.2.1. Commentaire des cartes

Les cartes montrant les résultats des différents scénarios sont consultables en annexe 8.

Le scénario 'accord' est représenté par deux cartes finales correspondant aux deux types d'incendies qui peuvent survenir : il peut y avoir au cinquième tour un incendie qui brûle un très petit nombre de cellules, ou un incendie qui brûle un très grand nombre de cellules.

Les scénarios 'fdom' et 'bdom' sont représentés par une seule carte chacun. En effet, malgré les variations observées au cours des différentes simulations effectuées pour chacun de ces deux scénarios, les cartes finales possèdent toutes un air de ressemblance. Il est donc possible de se faire une idée de l'impact d'une gestion particulière sur la forêt en observant une carte issue d'une de ces simulations.

La carte résultant du scénario '**accord**' avec un grand incendie, mise à part la surface de garrigue plus importante, possède les mêmes caractéristiques que celle ayant subi un petit incendie. Nous pouvons remarquer qu'il n'existe presque plus de cellules violettes au sein des

unités de gestion : elles ont été transformées en cellules bleues afin d'accroître la **production de bois**. De même presque toutes les cellules en lisière ouest du grand ensemble boisé au centre de la carte ont été débroussaillées et semées pour constituer **une barrière efficace contre le feu**. Nous pouvons cependant remarquer que rien n'a été fait concernant le petit ensemble boisé au nord-est de la carte bien qu'il soit constitué de deux parquets. Ceci met en évidence la logique de protection des unités de gestion : il vaut mieux protéger des unités à forte valeur productive et situées sous le vent dominant.

La carte du scénario '**fdom**' est issue d'une simulation effectuée en dix tours, l'incendie du dixième tour n'ayant pas encore eu lieu. Cette carte est représentative d'une forêt méditerranéenne typique, composée essentiellement de **forêt entretenue** (cellules bleues) et de **garrigue** (cellules rouges). La carte présentée résulte d'une simulation avec un incendie au tour 5 peu important : en effet, il reste encore de nombreuses cellules boisées, dont les cellules bleues qui ont été créées par le forestier (signalées par la lettre d). Cependant, nous pouvons constater qu'aucune protection contre les incendies n'est mise en place : l'**incendie** du tour 10, non représenté ici, a été **ravageur**.

La carte du scénario '**bdom**' se distingue des trois autres par sa quasi **absence de cellules boisées** (cellules bleues, violettes et marron), et son **abondance de cellules vertes**. Les cellules boisées ont disparu soit à cause de l'incendie car elles n'étaient pas protégées, soit par transformation en cellules vertes.

### 2.2.2. Evolution de la quantité de fourrage

Tous les résultats présentés dans ce paragraphe ont été obtenus à partir d'**une seule simulation**. En effet, après avoir fait tourner le modèle plusieurs fois, je me suis rendue compte que l'aspect des courbes ne changeait pas d'une simulation à l'autre : j'ai donc décidé de ne conserver que les valeurs de la dernière simulation effectuée.

Nous ne pouvons voir sur la figure 22 que les courbes de la quantité de fourrage disponible pour les scénarios '**bdom**' et '**accord**'. En effet, nous ne pouvons pas obtenir de courbe pour le scénario '**fdom**' car celle-ci est construite à partir d'un indicateur calculé par l'agent berger. Or, celui-ci a fait faillite au quatrième tour dans le scénario '**fdom**' : le calcul n'est donc plus effectué et la valeur de la quantité de fourrage n'est plus disponible pour construire le graphique.

Les scénarios '**accord**' et '**bdom**' se distinguent très nettement l'un de l'autre. A la fin de la simulation, la quantité de fourrage du scénario '**bdom**' est supérieur au double de celle du scénario '**accord**'.

Entre le début et la fin de la partie, ces deux scénarios vont dans le sens d'une **augmentation de la quantité totale de fourrage** disponible dans le forêt, ce qui s'explique par la **présence du berger** tout au long de la partie. En effet, d'une part, un berger veut toujours plus d'herbe dans la forêt :

- quand il a le pouvoir, il ne fait que des travaux dans ce sens ;
- quand il discute avec le forestier, celui-ci ne lui accorde que quelques travaux ;

D'autre part, les cellules en herbe sont pâturées : elles ne s'embroussaillent pas, ce qui permet un maintien de la quantité de fourrage produite par chacune d'elles.

### 2.2.3. Evolution du nombre de cellules bleues

J'ai effectué dix simulations de chaque scénario pour voir si le comportement des acteurs était identique ou s'il variait d'une simulation à l'autre. Or, je n'ai pas toujours trouvé le même résultat : pour chacun des trois scénarios, nous pouvons distinguer plusieurs cas.

Le **scénario ‘accord’** présente deux tendances. La première correspond à un incendie faible au cinquième tour (nombre de cases brûlées inférieur à 15) et a été observée dans 6 simulations, la deuxième correspond à un incendie fort (nombre de cases brûlées supérieur à 25) et a été observée dans 4 simulations. Sur la figure 23A, se trouvent les courbes moyennes des simulations correspondant à une même tendance.

Durant les **cinq premiers tours**, les courbes sont toutes confondues : il y a **peu de travaux de production de bois**. En effet, du fait de la bonne entente au cours de la négociation, les premiers travaux vont être faits d’abord sur le pare-feu en créant des cellules enherbées ce qui a pour but de protéger les unités de gestion forestière et d’augmenter la valeur pastorale de la forêt.

L’**efficacité de ces travaux** est **plus ou moins bonne**. Lorsque de nombreuses cellules bleues sont brûlées, cela signifie que le pare-feu n’a pas été efficace ; lorsque l’incendie ne fait pas chuter le nombre de cellules bleues, cela signifie que le pare-feu a stoppé la progression du feu. Dans ce cas, nous pouvons même voir que le nombre de cellules bleues augmente car le forestier profite de l’aide exceptionnelle versée après l’incendie pour reconstituer une partie de la forêt et créer de nouvelles cellules bleues.

**Après l’incendie**, quelle que soit l’ampleur de celui-ci, nous pouvons observer une **augmentation régulière du nombre de cellules bleues**. En effet, ce qu’il reste des parquets est relativement bien protégé par les travaux des tours précédents : les forestiers se concentrent donc sur l’**amélioration de la valeur productive** de leurs unités de gestion.

Les forestiers qui n’ont pas eu trop de dégât avec l’incendie, se retrouvent avec un nombre de cellules bleues final bien supérieur au nombre initial. Les autres, qui ont beaucoup été touché par l’incendie, reviennent en fin de partie à leur nombre de cellules bleues initial.

Le **scénario ‘fdom’** présente une augmentation du nombre de cellules bleues durant les cinq premiers tours (figure 23B). En effet, en tant que forestier dominant, son seul objectif est de **produire du bois** sans se soucier de protéger ses parquets par un pare-feu. Il entreprend donc immédiatement des travaux d’amélioration forestière.

Le **passage d’un incendie** est aisément repérable sur la figure : il **fait chuter le nombre de cellules bleues** au même moment pour toutes les courbes. Cette chute est plus ou moins importante selon l’endroit où le feu s’est déclaré. La figure 23B donne un exemple de trois cas de figures différents suivant l’ampleur de l’incendie. Durant les cinq derniers tours, le forestier étant seul dans la forêt du fait de la faillite du berger, ses parquets n’ont plus aucune protection : il n’entreprend donc pas de travaux d’amélioration forestière. Le nombre de cellules bleues reste donc stable.

Il en résulte que, suivant l’ampleur de l’incendie, le forestier a réussi ou non à augmenter son nombre de cellules bleues sur l’ensemble de la partie.

La figure 23C nous donne la courbe moyenne des dix simulations réalisées pour le **scénario ‘bdom’**. La **réduction progressive du nombre de cellules bleues** s’explique par les travaux d’**amélioration du potentiel fourrager** de la forêt. En effet, le berger cherche à faire des cellules vertes : il lui faut donc éclaircir des cellules boisées. Or les cellules bleues sont les cellules boisées majoritaires et celles qui demandent le moins d’investissement. Cependant la chute peut être moins brutale suivant la zone parcourue par l’incendie.

Cependant, nous pouvons faire la remarque que ce n’est pas parce que le nombre de cellules bleues diminue que la forêt ne peut plus être considérée comme une forêt de production. En effet, le sylvopastoralisme intègre la production de bois mais sous une forme moins dense : il ne faut pas oublier que les cellules vertes contiennent de l’herbe mais aussi des arbres, éclaircis pour permettre une meilleure croissance de la strate herbacée.

#### 2.2.4. Evolution de la diversité

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la variabilité observée dans les différentes simulations d'un même scénario ne s'observait qu'après le passage de l'incendie au cinquième tour. Cette variabilité est plus ou moins grande suivant l'indicateur étudié et le scénario retenu. La **diversité des structures de végétation** est l'**indicateur le plus sensible à l'incendie** : en effet, à partir du tour 5, nous pouvons constater des évolutions très différentes de cet indice suivant l'ampleur de l'incendie de chacune des simulations. La forte sensibilité de l'indice de diversité à l'incendie résulte de son mode de calcul : il tient compte de la forêt dans son ensemble et de toutes les structures de végétation. La moindre modification est donc immédiatement prise en compte contrairement aux deux autres indicateurs (nombre de cellules bleues et quantité de fourrage) qui ne tiennent compte que d'une, voire quelques-unes des structures de végétation présentes.

Dans le **scénario 'fdom'**, il faut quelque temps pour que l'indice de diversité change radicalement (figure 24A). Nous pouvons remarquer que durant les **quatre premiers tours**, celui-ci reste à peu près **constant**. Les travaux ne sont pas très nombreux et ne modifient donc que peu la végétation. L'indice de diversité reste donc relativement stable.

Au tour 4, il chute car le berger abandonne la forêt qui commence à **s'uniformiser par embroussaillage**, et perd donc de la diversité. L'incendie du cinquième tour accentue l'uniformisation de la végétation : la pente de la courbe continue donc d'être négative. L'absence de pâturage à la fin de la partie prolonge ce processus de diminution du nombre de structures végétales représentées.

En résumé, l'indice chute d'environ 20 points entre le début et la fin des simulations

Pour le **scénario 'accord'**, la courbe de l'évolution de la diversité est identique pour les différentes simulations durant les cinq premiers tours (figure 24B). L'**indice de diversité augmente** de façon nette car les premiers travaux, qui sont des **travaux de protection DFCI**, favorisent le développement de structures de végétation nouvelles (cellules jaunes et vertes) : le milieu s'en trouve donc diversifié. Cependant, à force de faire des travaux de protection et d'amélioration, la forêt devient dominée par des cellules bleues, jaunes et vertes, au détriment des cellules embroussaillées. La **disparition de ces structures de végétation réduit la diversité** qui chute alors à son niveau initial jusqu'au tour 5.

Après l'incendie, l'indice de diversité évolue de façon contrastée dans chacune des simulations effectuées. Nous pouvons distinguer trois grandes tendances se caractérisant par le nombre de cellules brûlées par l'incendie.

Lorsque l'**incendie parcourt moins de 10 cellules**, il n'a **aucun effet** sur l'indice de diversité car il ne modifie pas les structures de végétation : les rares cellules touchées sont principalement de la broussaille, or les cellules rouges restent rouges après passage d'un feu. Les partenaires continuent leurs aménagements dont l'effet reste positif sur la diversité.

Lorsque l'**incendie parcourt plus de 25 cellules**, il **uniformise la végétation** de la forêt qui retourne alors principalement à l'état de broussaille. Ce qu'il reste des unités de gestion forestière est suffisamment protégé pour qu'il puisse y avoir des travaux d'amélioration : la création de nouvelles cellules bleues renforce cette baisse de l'indice de diversité. L'augmentation provisoire que nous observons est due à la création de pelouses supplémentaires pour renforcer le pare-feu.

Lorsque l'incendie est moyen, la courbe se situe entre les deux précédentes. La chute brutale de la valeur de l'indice de diversité est à corréliser aux travaux d'amélioration forestière qui suppriment des cellules embroussaillées sources de diversité. Enfin, la remontée progressive de l'indice de diversité est liée aux travaux qui ont un impact positif sur la diversité.

Le **scénario ‘bdom’** présente une variabilité encore plus marquée après l’incendie (figure 24C). Durant les cinq premiers tours, les actions des joueurs sont identiques : l’indice de diversité reste constant. En effet, les travaux ne sont pas très nombreux et ne modifient donc que peu la végétation : l’indice de diversité reste donc relativement stable.

A partir de l’incendie du tour 5, **les agents doivent s’adapter à chacune des situations** proposées par les différentes simulations. A chaque courbe de la figure 24C correspond une réponse des acteurs à l’incendie. Devant la multiplicité des comportements et le faible nombre de simulations effectuées, je ne suis pas capable d’interpréter ce qui se passe durant les cinq derniers tours du scénario ‘bdom’ en ce qui concerne l’évolution de l’indice de diversité.

### 2.2.5. Conclusion

Au regard du résultat de ces quatre scénarios, il m’est désormais possible de répondre aux questions que je m’étais posées à propos de la prévention des incendies de forêt, à savoir quel était l’impact des aménagements sylvopastoraux sur la protection de la forêt contre les incendies.

De façon générale, nous pouvons dire que **seule une action concertée entre un berger et un forestier peut assurer une bonne prévention des incendies**, le berger aidant à l’entretien de la forêt permettant ainsi une protection plus efficacement et plus durable que celle engendrée par les seuls travaux du forestier. En effet, il y a moins de chance que l’incendie soit important si le berger fait pâturer son troupeau dans la forêt. Le scénario ‘fdom’ illustre bien ce propos : le berger ayant fait faillite au tour 5, la forêt n’est plus que gérée que par le forestier et, en général, l’incendie se déclarant au tour 10 est ravageur. Il est évident que le scénario pouvant permettre la meilleure protection de la forêt est le **scénario ‘accord’** car d’une part il **respecte les unités de gestion forestière** (pas de travaux d’amélioration pastorale à l’intérieur de celles-ci), d’autre part, il **propose la mise en place d’un pare-feu**. Cependant, même s’il le réduit, il laisse un aléa incendie, qui peut aboutir à des situations aussi graves que s’il n’y a pas de coopération entre les deux acteurs.

De plus, le scénario ‘accord’ permet également **d’atteindre un bon niveau de tous les indicateurs** cités dans les paragraphes précédents (quantité de fourrage disponible, nombre de cellules bleues et valeur de l’indice de diversité). Il assure une bonne production de bois, une production de fourrage suffisante pour maintenir un berger dans la forêt, voire pour l’autoriser à augmenter son troupeau, et une diversité satisfaisante.

## 3. Limites du modèle et propositions d’amélioration

Les résultats que j’ai exposés ci-dessus sont à moduler en raison des nombreuses petites imperfections des modèles utilisés. J’expose dans cette partie quelques-unes des raisons qui me poussent à n’être pas totalement satisfaite des ces résultats et la manière dont je propose d’améliorer les modèles.

### 3.1. La variabilité entre les différentes simulations d’un même scénario

Cette remarque concerne le modèle SylvopastJeu. Comme je l’ai précisé auparavant, j’ai testé les scénarios plusieurs fois chacun afin de voir si le comportement des joueurs était toujours identique ou si les actions différaient d’une simulation à l’autre. Malgré les multiples simulations effectuées, le pâturage se fait toujours sur les mêmes cases, les mêmes travaux sont réalisés au même endroit et au même pas de temps, pendant les cinq premiers tours. Ensuite, le caractère aléatoire de l’incendie fait que les acteurs doivent réagir de façon différente dans chacune des simulations.

Cette **uniformisation des comportements** durant les cinq premiers tours est due au type de représentation de l'espace utilisée dans SylvopastJeu. La **carte** de ce modèle est **petite** (seulement cent cellules) : elle ne permet donc pas d'avoir une grande variabilité dans le choix des cellules à intégrer aux différentes collections du berger et du forestier. De plus, les collections des deux acteurs sont toujours construites de la même façon par Cormas sans qu'**aucun facteur aléatoire** n'intervienne dans la façon d'**ordonner les cellules** de même valeur. Enfin, la **négociation** étant implémentée de façon assez **simple** et ne tenant pas compte ni de ce qui s'est passé aux tours précédents ni d'accords éventuels pris pour les tours suivants, il en résulte un choix des travaux identique.

Nous avons vu que la négociation est codée pour l'instant sous une forme assez simple. Il y **manque des notions très « humaines »** comme par exemple le mensonge : le forestier peut faire croire au berger qu'il va faire des travaux en sa faveur pour le pousser à l'investissement mais va en fait garder l'argent pour lui, ou la promesse : ceci impliquerait que la négociation tienne compte des cellules proposées au tour précédent, ce qui n'est pas le cas pour l'instant, etc. Cette amélioration de la négociation va notamment être importante pour la version distribuée (version mise sur Internet en libre accès) de SylvopastJeu : elle va donc essentiellement être élaborée par les chercheurs du Cirad.

### 3.2. La dynamique de végétation

Le modèle Sylvopast possède des lois de croissance de l'herbe en fonction du climat et des strates de végétation environnantes, des lois d'embroussaillage des cistes et de dissémination des graines de résineux, ce qui rend compte d'une dynamique de végétation complexe mais encore assez simple.

De manière générale, **aucune différence** n'est faite **entre les différentes espèces**, qu'elles soient herbacées, arbustives ou arborées. La prise en compte de ces espèces permettrait cependant d'affiner la modélisation de la quantité de fourrage, de la dynamique d'embroussaillage, de la propagation du feu et de la production de bois.

Concernant l'embroussaillage, le modèle considère que la **vitesse de croissance de la broussaille** est **linéaire**. Or, il y a normalement présence d'un plafond d'embroussaillage qui fait que la broussaille ne pousse pas indéfiniment. De plus, bien que nous l'ayons pris en compte pour l'herbe, nous avons négligé **l'influence du climat et du couvert arboré sur la vitesse d'embroussaillage**. La croissance de la broussaille est donc très simplifiée.

La présentation de tous ces éléments manquants nous fait croire qu'il serait indispensable de les intégrer au modèle. Cependant, il ne faut pas oublier que la conception d'un modèle nécessite une simplification. Je me suis alors demandée si, dans mes propositions d'amélioration du modèle, il fallait que je propose toutes ces complexifications.

Je ne pense pas qu'il soit nécessaire de rajouter des éléments sur les différentes espèces herbacées. En effet, la croissance de l'herbe dépend déjà de plusieurs facteurs, la compliquer rendrait encore plus dur le codage de l'organisation de pâturage du berger qui est déjà suffisamment complexe.

Pour ce qui est des arbustes, il est nécessaire de **fixer un plafond d'embroussaillage** car une croissance indéfinie n'est pas du tout réaliste : je propose un seuil de 10000 m<sup>3</sup>/ha. Je ne crois pas qu'il soit nécessaire d'intégrer les facteurs climat et couvert arboré dans l'embroussaillage car ceci aurait trop de conséquences sur la croissance de l'herbe ce qui la compliquerait d'avantages. Nous pourrions par contre **distinguer deux grands groupes d'arbustes suivant leur vitesse de croissance** : les cellules contenant des arbustes à forte croissance devront donc être regardées avec plus d'attention car elles présentent un plus fort

risque d'incendie et sont moins facilement contrôlables pas le pâturage. De plus, des données sont déjà disponibles grâce au travail de suivi du RCC (Etienne *et al.*, 2002).

### 3.3. Les incendies

Les incendies se déclarent aléatoirement en été, quand le climat annuel a été sec, et dans de la broussaille. Cela correspond très bien à la réalité. Cependant **aucune indication sur la fréquence** n'est donnée : si nous avons trois années sèche consécutive, il y a une chance que nous ayons trois fois des incendies, ce qui n'arrive jamais.

Nous pourrions donc créer un **attribut correspondant à l'intervalle entre deux incendies**. Si la détermination aléatoire des incendies propose un départ de feu moins de sept ans après l'incendie précédent, la décision sera prise de ne pas déclencher l'incendie.

Dans le jeu de rôle SylvopastJeu, les joueurs peuvent consulter comme indicateur l'indice du risque d'incendie. Cependant, nous avons vu que cet indice était mal adapté car il calculait un risque global sur l'ensemble de la carte alors que ce qui intéresse les joueurs, notamment le forestier, est le risque qu'ont ses unités forestières de brûler.

Chaque unité possède déjà un attribut rendant compte du risque probable d'incendie sur elle-même. Il suffirait donc de créer un attribut, appartenant à la forêt, qui correspondrait à la somme de ses risques particuliers. Nous aurions ainsi une idée du **danger encouru par les entités de gestion forestières vis-à-vis du feu**.

### 3.4. Le comportement du berger

Lors de l'observation de parties de jeux de rôle, j'ai pu constater que les travaux d'améliorations pastorales se répartissaient entre la création de cellules jaunes et celle de cellules vertes. Or, dans les simulations que j'ai effectuées, il apparaît que ces travaux se font essentiellement en faveur de la création de cellules vertes.

Toutefois, nous avons vu que le forestier possédait un taux de satisfaction de protection de ses massifs pour l'aider à construire ses collections de manière plus efficace. Le berger pourrait également **exprimer sa satisfaction quant aux cellules pâturables** qu'il a à sa disposition dans la forêt. Il serait possible de créer un attribut correspondant au **rapport entre le nombre de cellules vertes et le nombre de cellules jaunes** : lorsque ce rapport serait supérieur à 1,2, le berger donnerait la priorité à sa collection de cellules jaunes (collecJ), lorsqu'il serait inférieur à 0,8, il donnerait la priorité à ses collections de cellules vertes (collecV et collecO).

Pour l'instant, le berger arrive à acheter des animaux grâce à la manière dont nous avons implémenté cette action mais certains achats observés dans les jeux de rôle n'apparaissent pas dans les simulations. Ces achats sont généralement liés au désir du berger de capitaliser sur son troupeau et non sur sa trésorerie.

Je propose donc de rajouter un **attribut 'capitalisation'** au berger qui indiquerait sous quelle forme il préfère posséder son capital. Cet attribut pourrait avoir deux valeurs : troupeau ou capital. Dans le premier cas, tout l'argent du berger partirait dans l'achat d'animaux ; dans le deuxième cas, je propose de fixer une taille maximale de troupeau de 400 brebis à ne pas dépasser.

En ce qui concerne sa participation financière aux travaux, le berger n'investit dans aucune des simulations réalisées. Or, lorsque nous regardons certaines parties de jeu de rôle assez proches des ces simulations, nous constatons qu'il y a une participation non nulle du berger dans les travaux. Notre manière d'implémenter l'investissement n'est donc pas satisfaisante.

Ceci nous empêche de coder la négociation de type ‘séparation’ (AP), celle-ci se basant sur le fait que chacun des acteurs payent ses travaux avec son argent.

Il faudrait pouvoir autoriser le berger à investir même lorsqu’il a déjà suffisamment de fourrage. Je propose donc de **ne pas limiter l’investissement** au seul cas où la valeur pastorale de la forêt ne suffit pas à nourrir toutes les brebis. Cependant, je pense qu’il faut rajouter la condition que le berger, s’il participe à des travaux alors qu’il a déjà suffisamment de fourrage à disposition, se doit d’augmenter son troupeau du nombre de brebis nécessaire pour pâturer les nouvelles cases créées.

### 3.5. Validation du calibrage

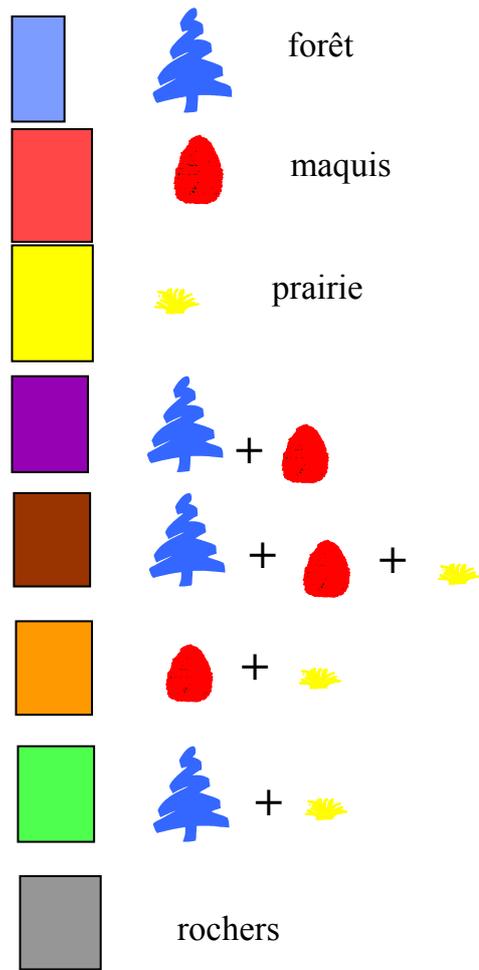
Les valeurs seuil sont les valeurs qui **déclenchent dans le modèle le lancement de prises de décision**. Pour n’en citer que quelques-unes, un seuil de pression de pâturage détermine s’il y a impact ou non du troupeau sur l’embroussaillage, des taux de satisfaction interviennent dans la construction des collections des acteurs, les travaux ne peuvent être faits qu’à partir d’un certain montant du capital, etc. Ces valeurs seuils sont donc très importantes dans le SMA et nécessitent d’être validées.

Certaines de ces données ont déjà été testées lors des différentes simulations que j’ai effectuées. En effet, les résultats que j’ai obtenus semblaient cohérents, le calibrage des valeurs seuils auxquelles j’ai fait appel pour ces simulations était donc bien fait. Cependant, il en existe encore d’autres pour lesquelles une validation reste à faire. Il s’agit : du nombre de cellules dans un parquet et du pourcentage de cellules boisées à l’intérieur de celui-ci de la taille minimale de voisins bleus pour qu’une cellule violette soient intégrée à un massif, du calcul du taux de satisfaction, du capital minimum qu’un berger doit toujours conserver pour vivre.

## Conclusion

Le véritable SMA Sylvopast est en cours de construction en ce moment par intégration des procédures de SylvopastJeu concernant le comportement des agents au modèle Sylvopast. Cette intégration n'a pas pu être faite plus tôt pour des raisons informatiques : il a d'abord fallu résoudre tous les bugs, assez nombreux, des deux modèles. Cela a demandé du temps et surtout un travail en commun avec mon maître de stage et Christophe Le Page, ce qui n'était pas évident vu leur emploi du temps chargé. De plus de nombreuses améliorations ont été rajoutées au fur et à mesure aux deux modèles.

A l'heure actuelle, je n'ai donc qu'une vague idée de ce que donneront les simulations effectuées avec le SMA Sylvopast complet selon les scénarios proposés dans ce rapport mais je pense que Michel Etienne sera amené à proposer d'autres scénarios qui répondront à des attentes plus précises. Pour l'instant, le modèle va tourner sur une carte fictive mais il sera possible de l'adapter à une forêt particulière. Alors qu'actuellement le modèle ne donne que des pistes de réflexion générales sur la gestion forestière dans un but DFCI, une fois adapté à un cas concret, il pourra permettre une réelle concertation entre les acteurs concernés par la forêt et deviendra un outil de décision pour une gestion forestière adaptée aux contraintes locales du territoire.



**Figure 1 : Code couleur de la végétation dans le modèle Sylvopast**

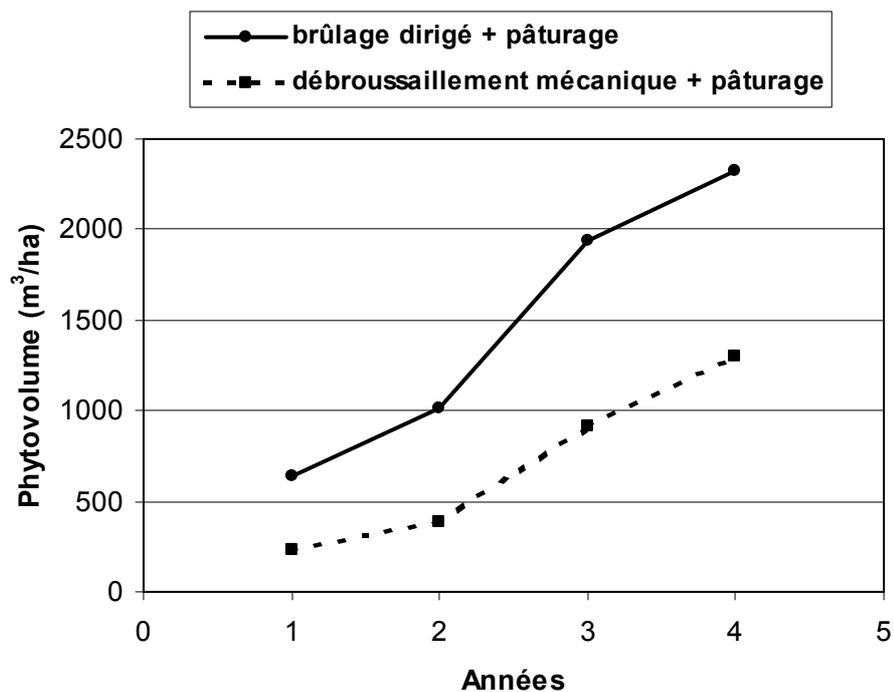


Figure 2 : Influence du type de débroussaillage sur la dynamique d'embroussaillage (Etienne *et al.*, 2002)

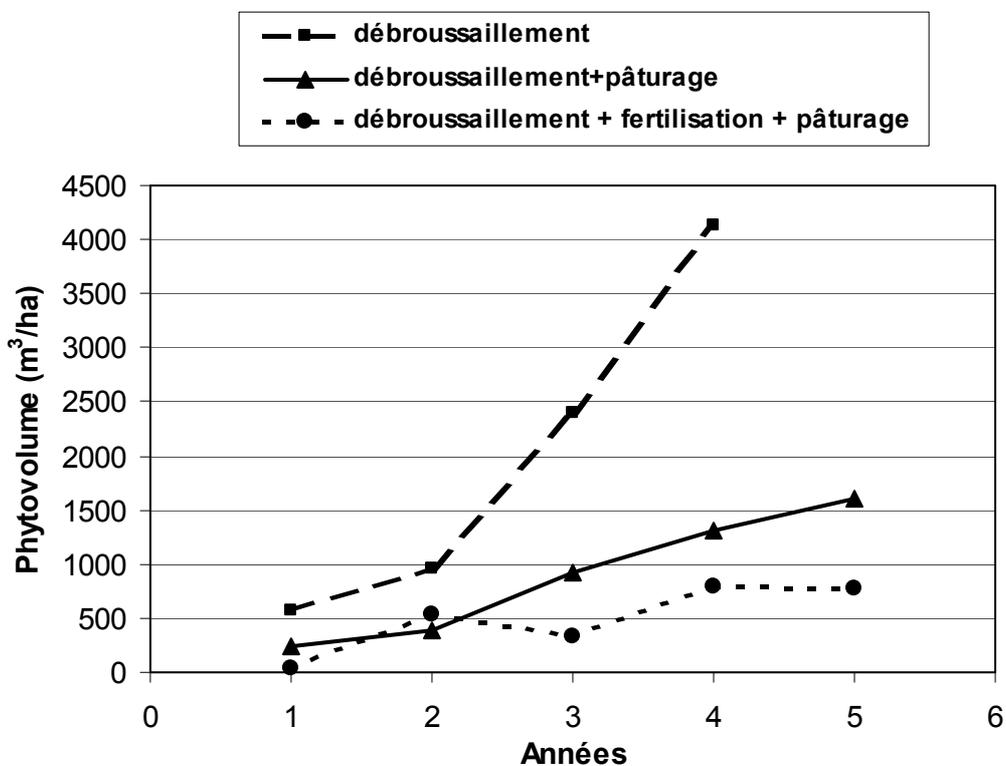
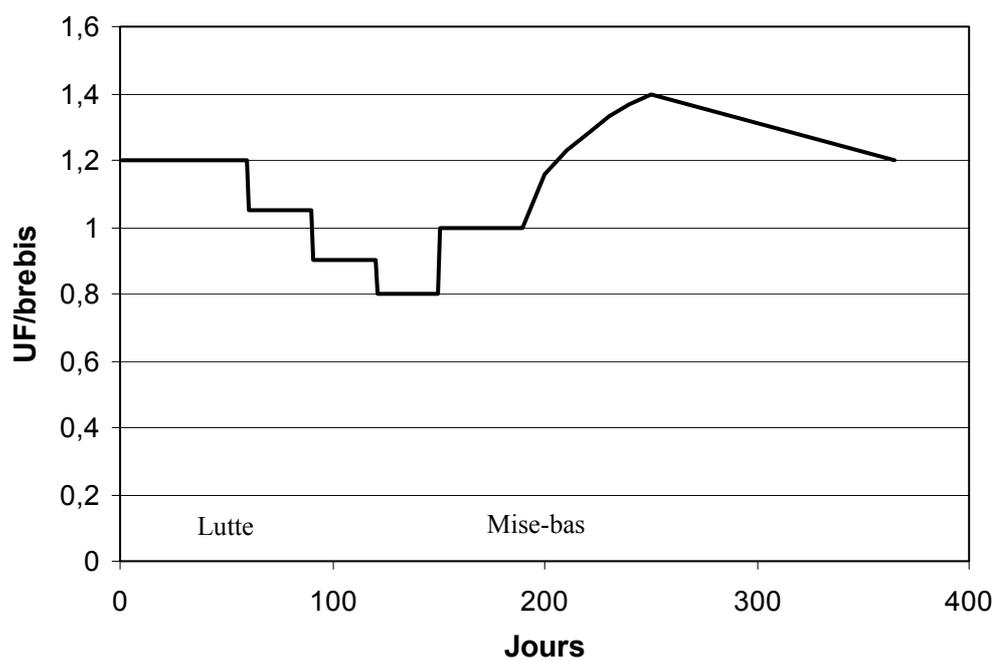


Figure 3 : Influence du pâturage sur la dynamique d'embroussaillage (Etienne *et al.*, 2002)



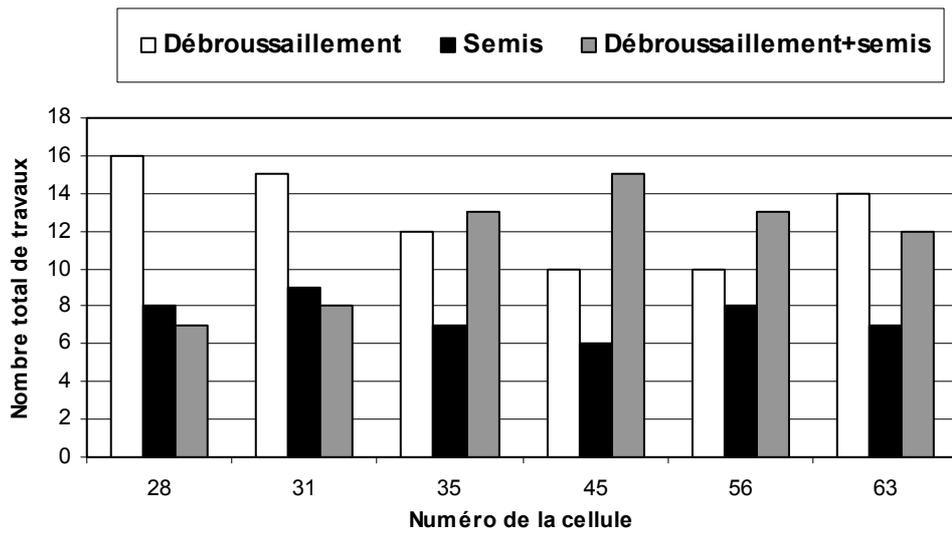
**Figure 4 : Besoins alimentaires journaliers du troupeau ovin modélisé (Etienne *et al.*, 2002)**

|                   |      | Nombre d'animaux dans le troupeau |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|-------------------|------|-----------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
|                   |      | 50                                | 75 | 00 | 25 | 50 | 75 | 00 | 25 | 50 | 75 | 00 |  |
| Capital du berger | 0-   |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 100  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 100- |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 200  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 200- |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 300  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 300- |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 400  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 400- |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 500  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 500- |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 600  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 600- |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 700  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 700- |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                   | 800  |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 800-              |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 900               |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 900-              |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1000              |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1000-             |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1100              |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1100-             |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1200              |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1200-             |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1300              |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1300-             |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| 1400              |      |                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |

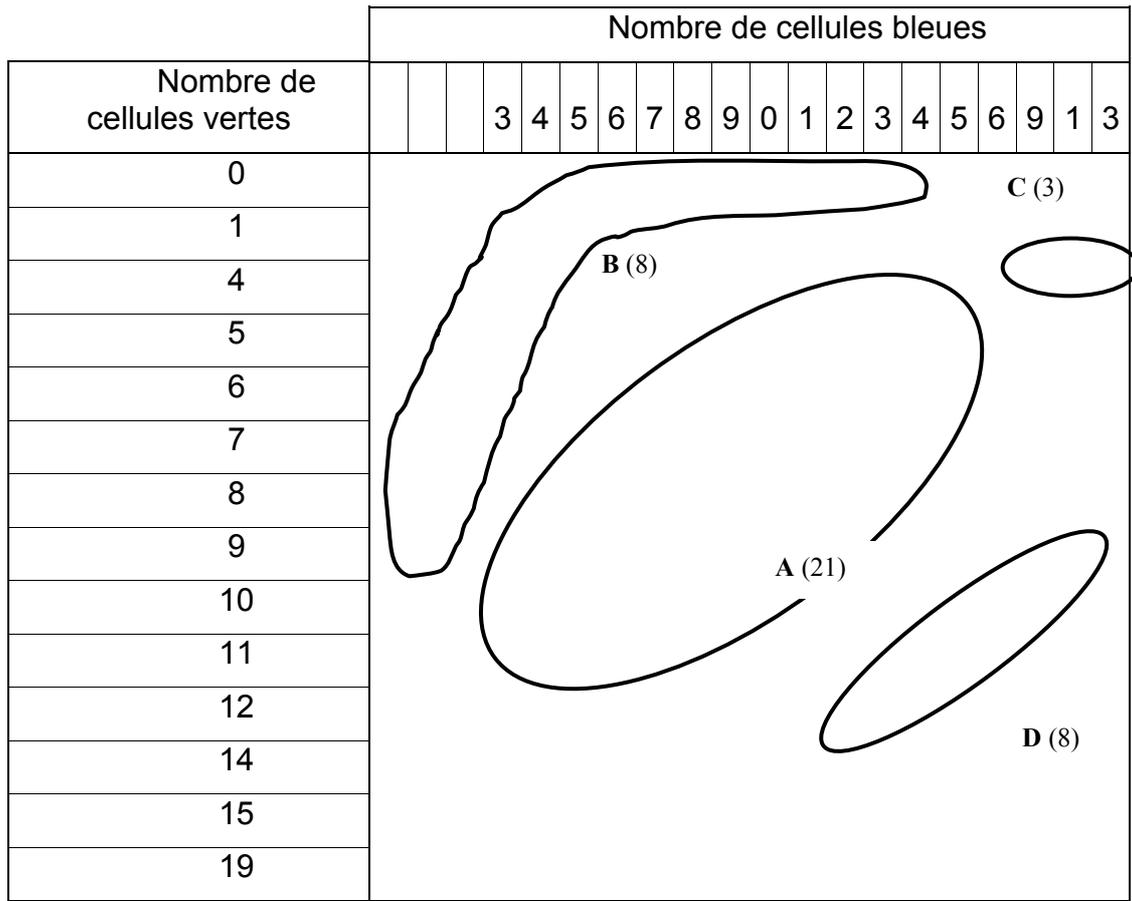
Les chiffres dans le tableau correspondent au nombre de parties observées pour chacune des combinaisons (effectif du troupeau \* capital)

Chaque groupe de valeurs est englobé dans une ellipse désignée par une lettre et son effectif.

**Figure 5 : Relation entre le capital du berger et l'effectif du troupeau en fin de partie**

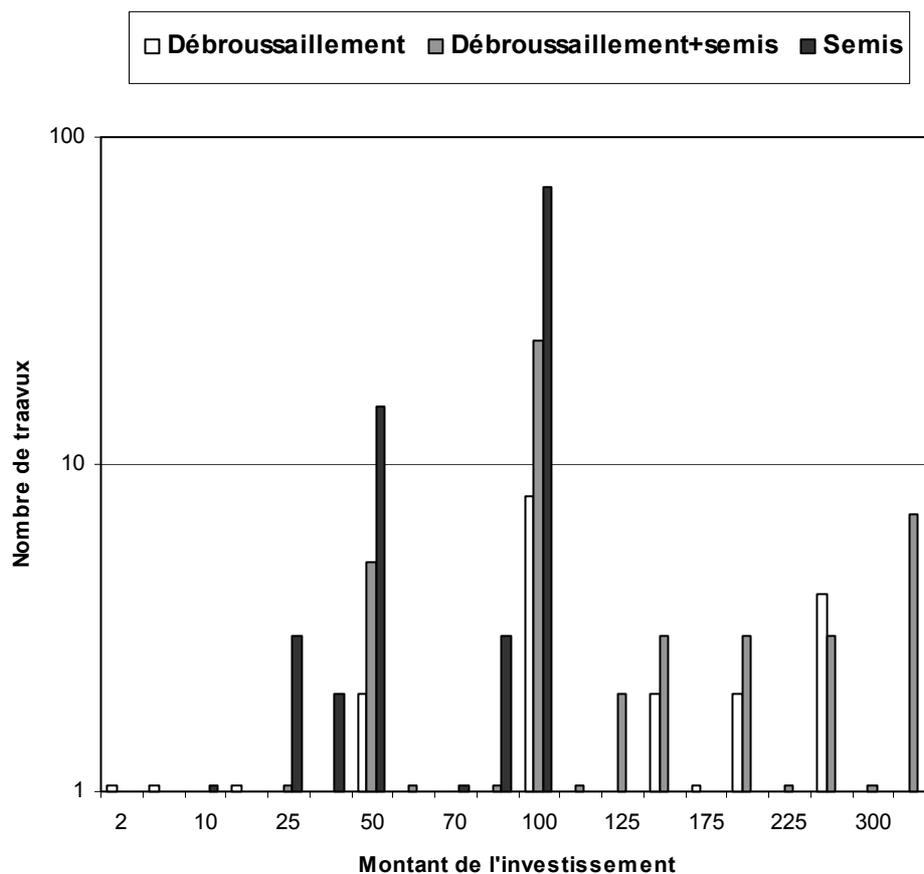


**Figure 7 : Type de travaux réalisés sur les cellules qui ont été le plus souvent aménagées au cours de toutes les parties analysées**



Les chiffres dans le tableau correspondent au nombre de parties observées pour chacune des combinaisons (effectif du troupeau \* capital)  
 Chaque groupe de valeurs est englobé dans une ellipse désignée par une lettre et son effectif.

**Figure 8 : Relation entre le nombre de cellules bleues (arbre seul) et le nombre de cellules vertes (arbre et herbe) dans la forêt en fin de partie**



**Figure 9 : Répartition des travaux financés par le berger en fonction de son niveau d'investissement sur l'ensemble des parties analysées**

**Tableau 1 : Travaux payés et réalisés par le forestier sur l'ensemble des parties analysées**

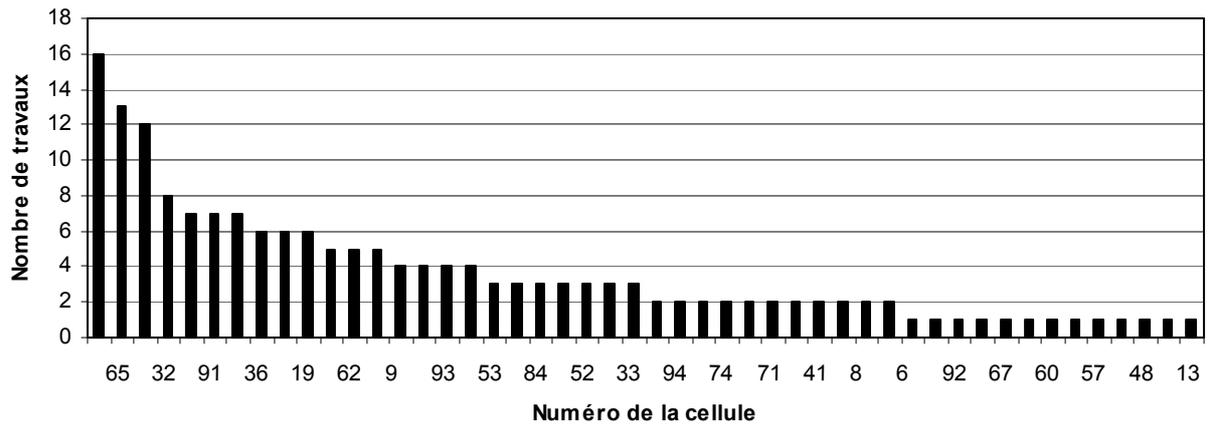
| Type de travail       | Formation végétale |     |     |       |         |      |         | Nombre de chaque type de travail |
|-----------------------|--------------------|-----|-----|-------|---------|------|---------|----------------------------------|
|                       | LH                 | LB  | H   | LH+LB | LH+LB+H | LB+H | Solvide |                                  |
| Débroussaillage       | 25                 |     | 223 | 44    | 56      |      |         | 348                              |
| Débroussaillage-Semis |                    | 114 |     | 142   |         |      |         | 256                              |
| reboisement           |                    |     | 1   |       |         |      |         | 1                                |
| Semis                 | 188                | 157 |     | 89    |         |      | 1       | 435                              |

LB : arbuste

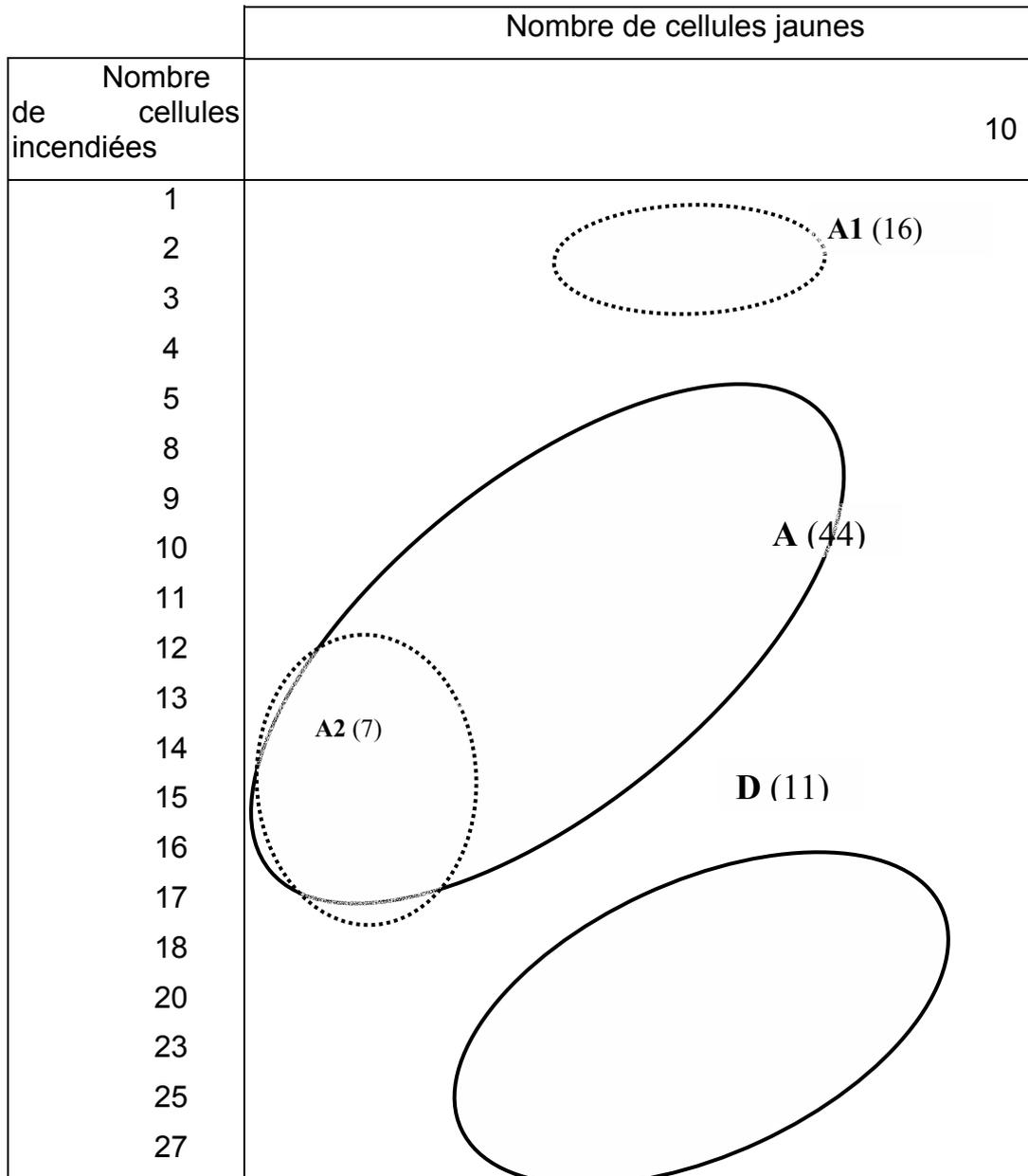
LH : arbre

H : herbe

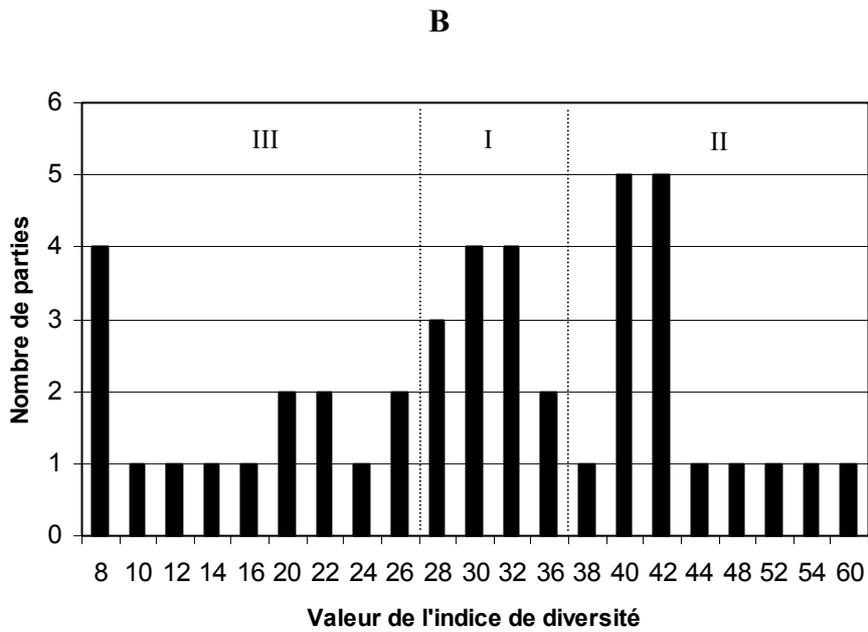
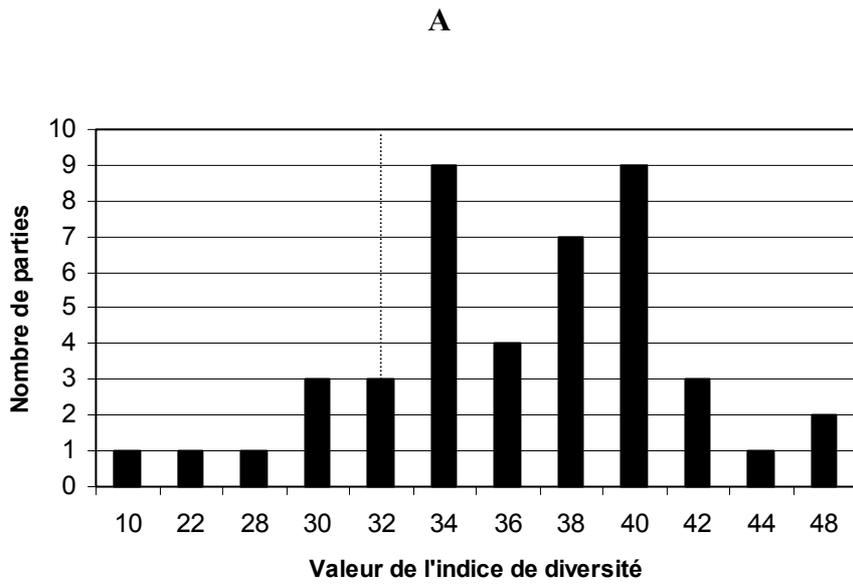
**Total : 1040**



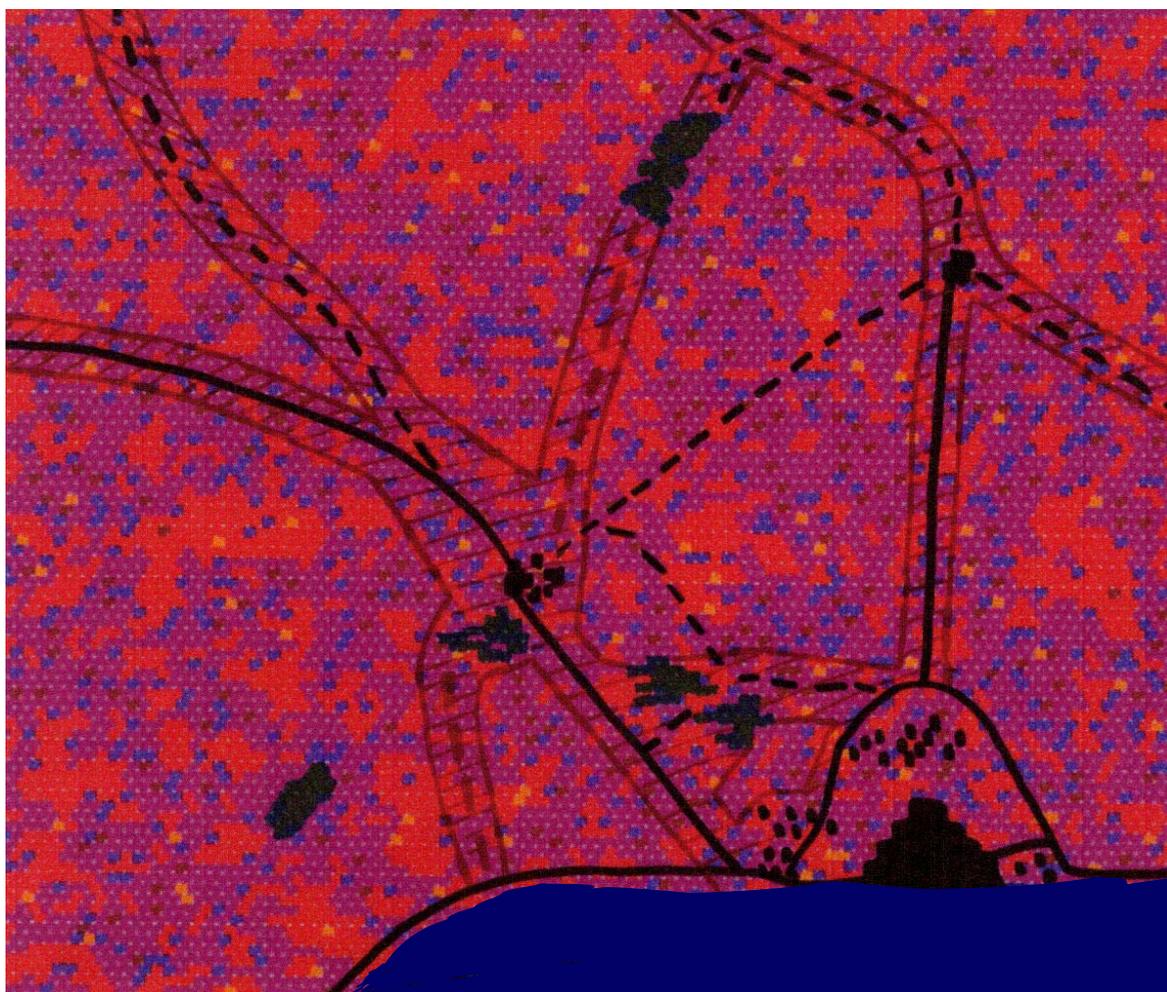
**Figure 10 : Localisation des travaux d'aménagement en prairie réalisés au cours de l'ensemble des parties analysées**



**Figure 11 : Relation entre le nombre de cellules en herbe (jaunes) et le nombre de cellules incendiées à la fin du tour 5**



**Figure 12 : Répartition des parties en fonction de la valeur de l'indice de diversité au tour 5 (A) et au tour 10 (B), avant incendie**



%

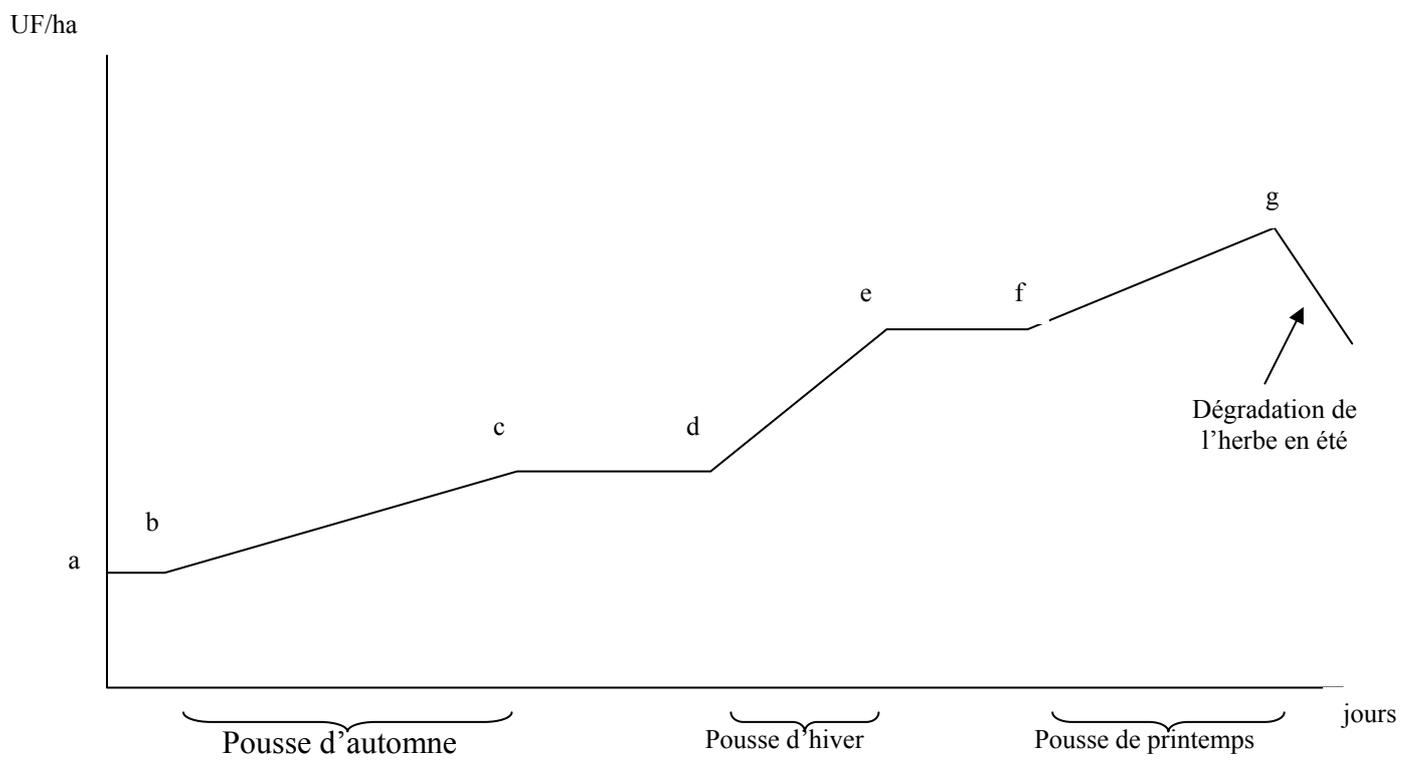
Vent dominant : NO-SE

- routes existantes
- - - pistes existantes
- - - pistes à créer
- ▨ coupure
- zone agricole
- habitation
- mer

Figure 13 : Travail sur carte réalisé par la technicienne de la DDAF du Var chargée des aménagements DFCI, lors d'un entretien

**Tableau 2 : Eléments mentionnés par les personnes interviewées pour raisonner l'implantation d'une coupure de combustible**

|                    | Eléments cités par tout le monde   | Eléments particuliers à un département  |
|--------------------|--|---|
| Eléments manquants | <ul style="list-style-type: none"> <li>- le relief</li> <li>- les aménagements DFCI existants</li> <li>- des ensembles de végétation plus homogènes</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- le propriétaire des terrains (Var)</li> <li>- les potentialités agricoles (Corse, Aude)</li> <li>- des zones agricoles en bordure de village (Var)</li> <li>- les droits de plantation de vignes (Aude)</li> <li>- les maisons isolées (Var)</li> <li>- l'entretien des châtaigneraies (Gard)</li> </ul> |
| Eléments présents  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vent dominant</li> <li>- les voies de communications</li> <li>- les zones agricoles</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- la végétation (Gard, Var)</li> <li>- la localisation des habitations (Gard)</li> <li>- la présence d'ensembles boisés à valeur patrimoniale (Aude)</li> </ul>  |



Les lettres font référence aux points d'inflexion de la courbe, dont les modalités de calcul sont explicitées en annexe 7.

**Figure 14 : Modèle de la courbe de croissance de l'herbe utilisé dans Sylvopast**

**Tableau 3 : Mode de détermination de la liste de cellules à aménager en fonction du type de relation entre le berger et le forestier**

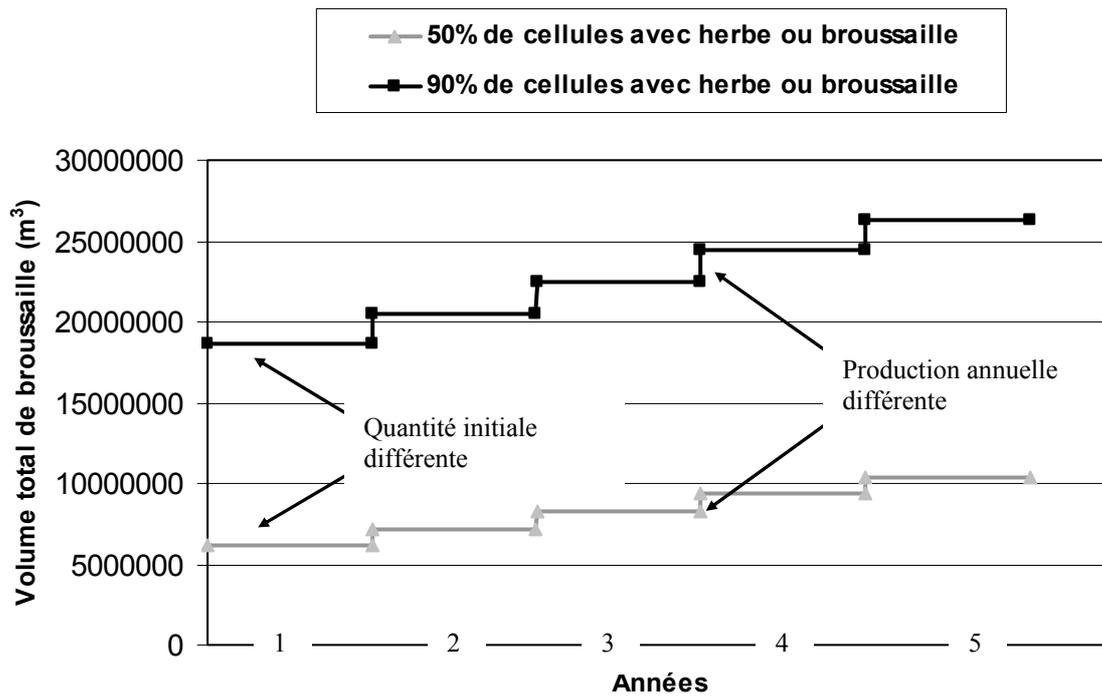
| Type de relation | Ordre de comparaison des collections   | Collections dans lesquelles prélever des cellules si les comparaisons ne fournissent aucune cellule commune |
|------------------|--|---|
| AF               | collecFB ⇔ collecI<br>collecFB ⇔ collecV<br>collecFB ⇔ collecJ<br>collecFB ⇔ collecO   | collecMU<br>collecFB  |
| AS               | collecI ⇔ collecFB<br>collecI ⇔ collecDC<br>collecV ⇔ collecFB<br>collecV ⇔ collecDC<br>collecJ ⇔ collecFB<br>collecJ ⇔ collecDC<br>collecO ⇔ collecFB<br>collecO ⇔ collecDC | collecMU<br>collecFB  |
| FD               | collecFB ⇔ collecO + collecJ +<br>collecV + collecI  | collecMU<br>collecFB  |
| SD               | collecI ⇔ collecFB<br>collecI ⇔ collecMU<br>collecI ⇔ collecDC   | collecI<br>collecV<br>collecJ   |

Collections du berger :

- collecI : collection des cellules à améliorer dans les unités de pâturage
- collecV : collection des cellules transformables en cellules vertes pour agrandir des quartiers ou diminuer les déplacements du circuit
- collecJ : collection des cellules transformables en cellules jaunes pour agrandir des quartiers ou diminuer les déplacements du circuit
- collecO : collection des cellules de la forêt transformables en cellules vertes

Collection du forestier :

- collecFB : collection des cellules à améliorer pour protéger les unités de gestion
- collecMU : collection des cellules à améliorer dans les unités de gestion protégées
- collecDC : collection des cellules de la forêt n'appartenant pas à collecFB ni aux unités de gestion



**Figure 16 : Influence de la structure de la végétation sur la dynamique d'embroussaillage de la forêt dans le scénario 'témoin'**

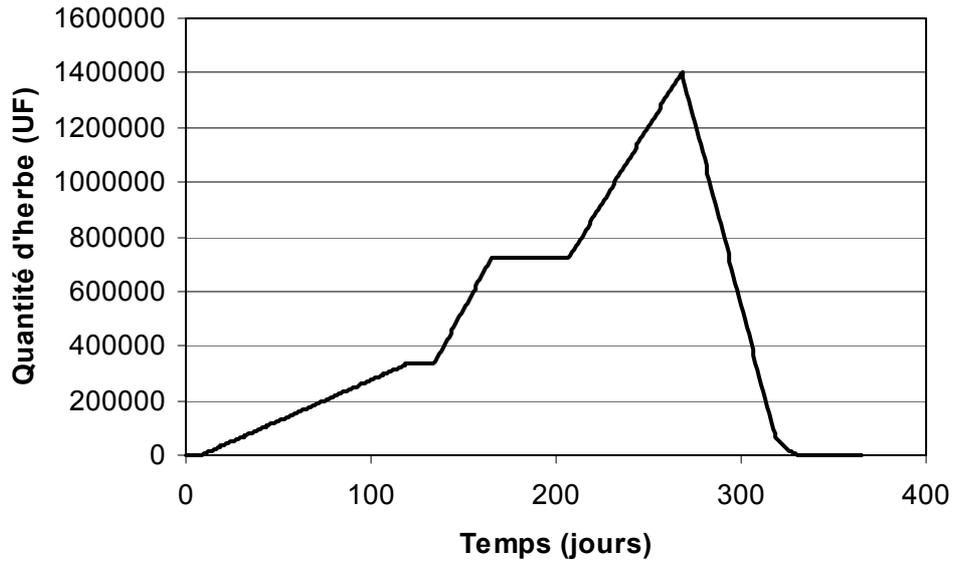


Figure 18 : Courbe de production d'herbe annuelle générée par le modèle dans le scénario 'témoin'

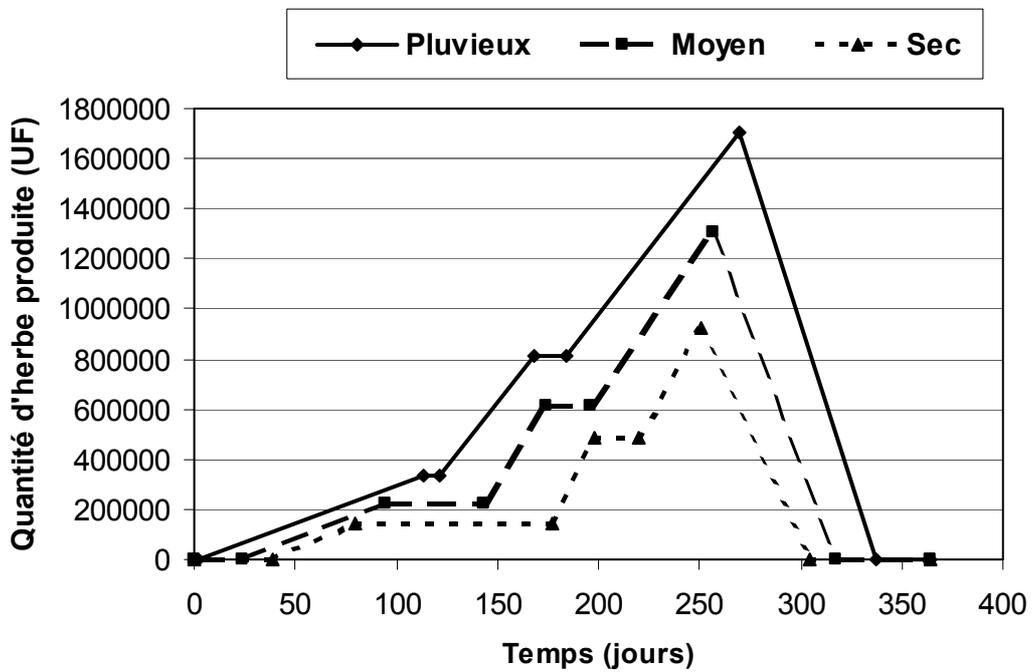
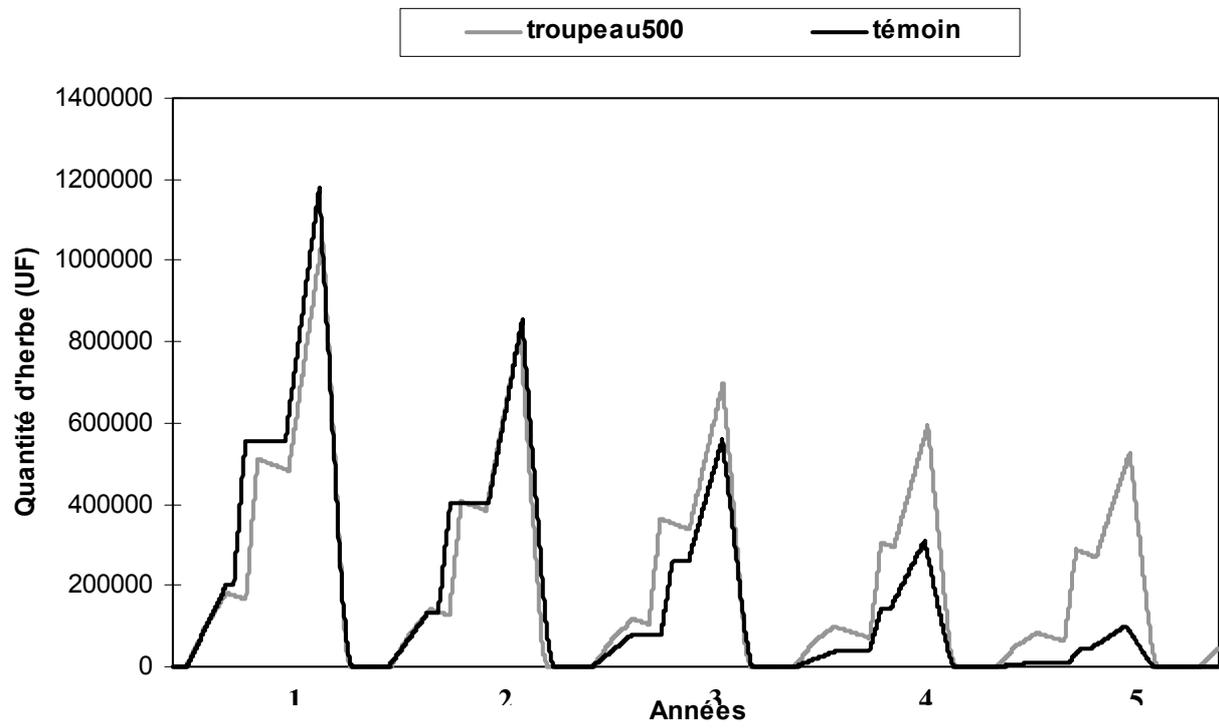


Figure 19 : Influence du climat sur la croissance de l'herbe dans le scénario 'témoin'



**Figure 21 : Comparaison de la production d'herbe selon les scénarios 'témoin' et 'troupeau500'**

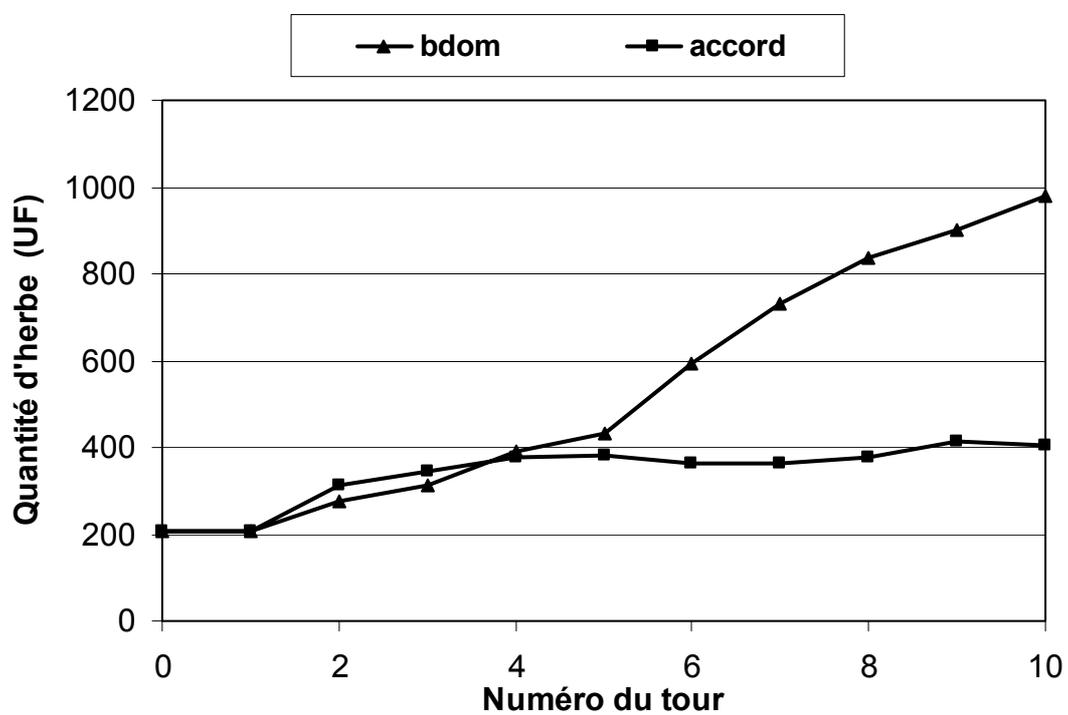
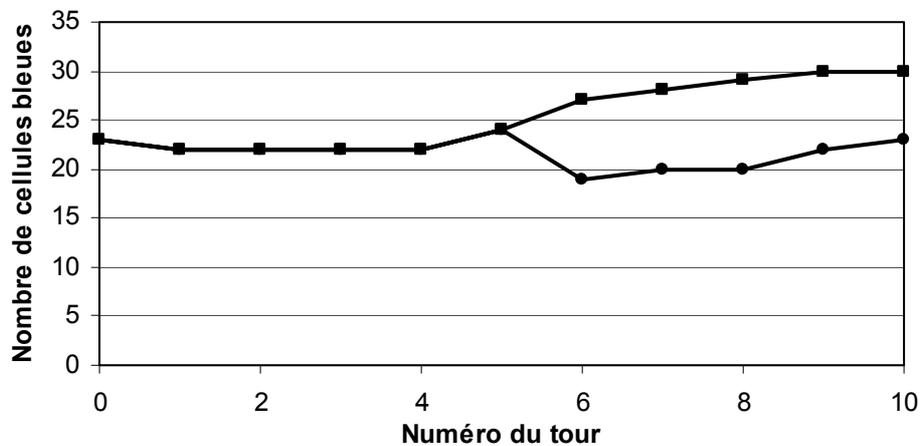


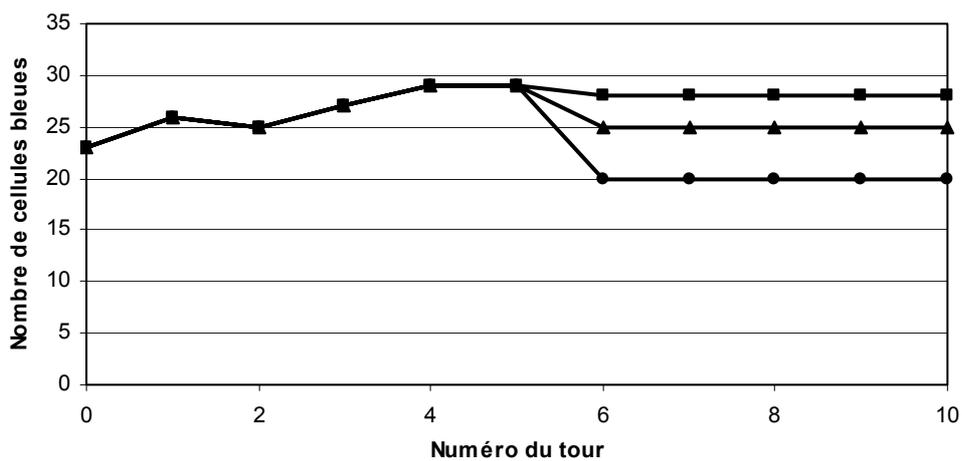
Figure 22 : Evolution de la quantité d'herbe sur 10 ans, selon les scénarios 'accord' et 'bdom'

- moins de 10 cases brûlées
- ◆ entre 10 et 25 cases brûlées
- plus de 25 cases brûlées

A



B



C

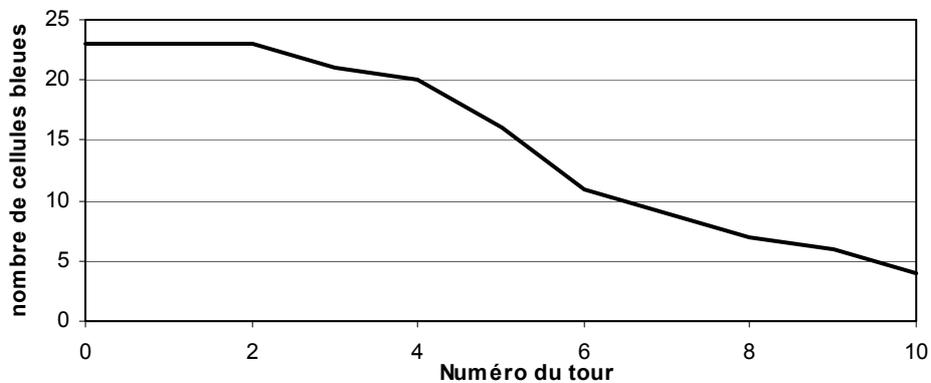
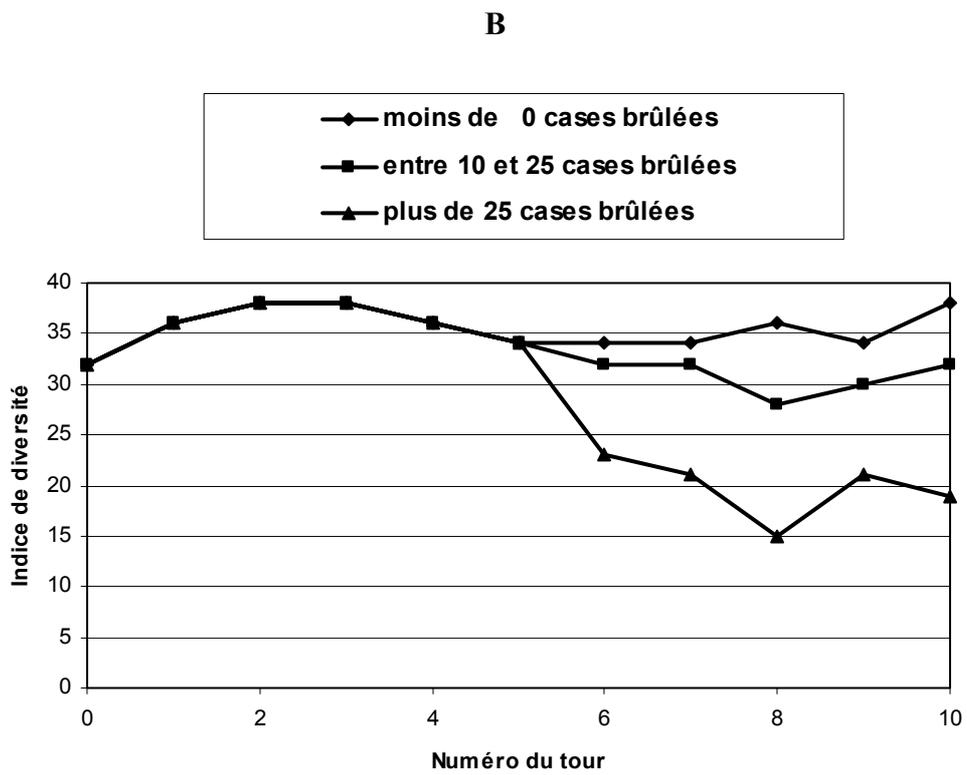
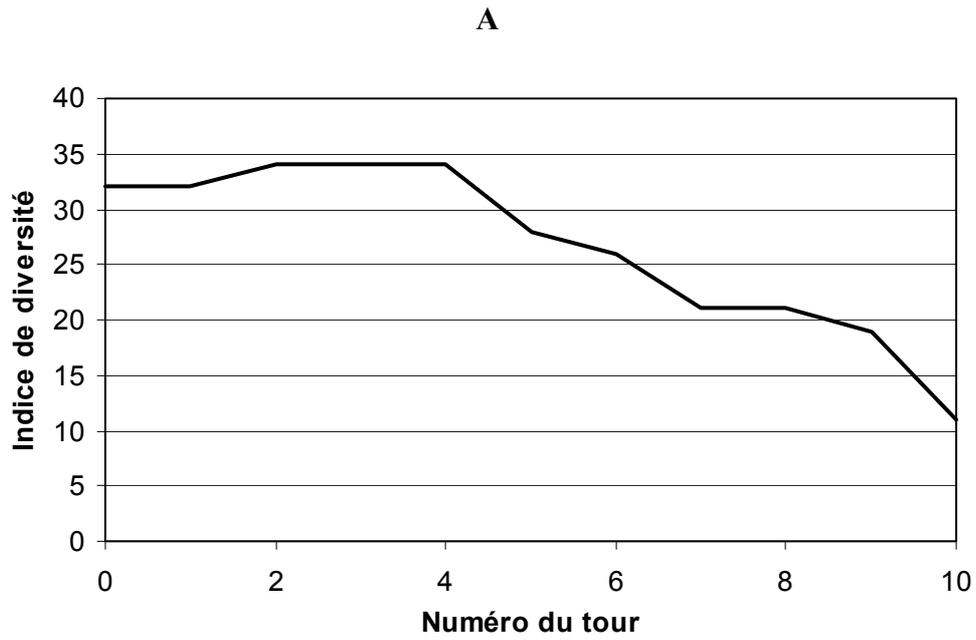


Figure 23 : Evolution sur 10 ans du nombre de cellules bleues (arbre seul) selon les scénarios 'accord' (A), 'fdom' (B) et 'bdom' (C) et en fonction de la surface incendiée



**Figure 24 : Evolution sur 10 ans de l'indice de diversité selon les scénarios 'fdom' (A) et 'accord' (B)**

C

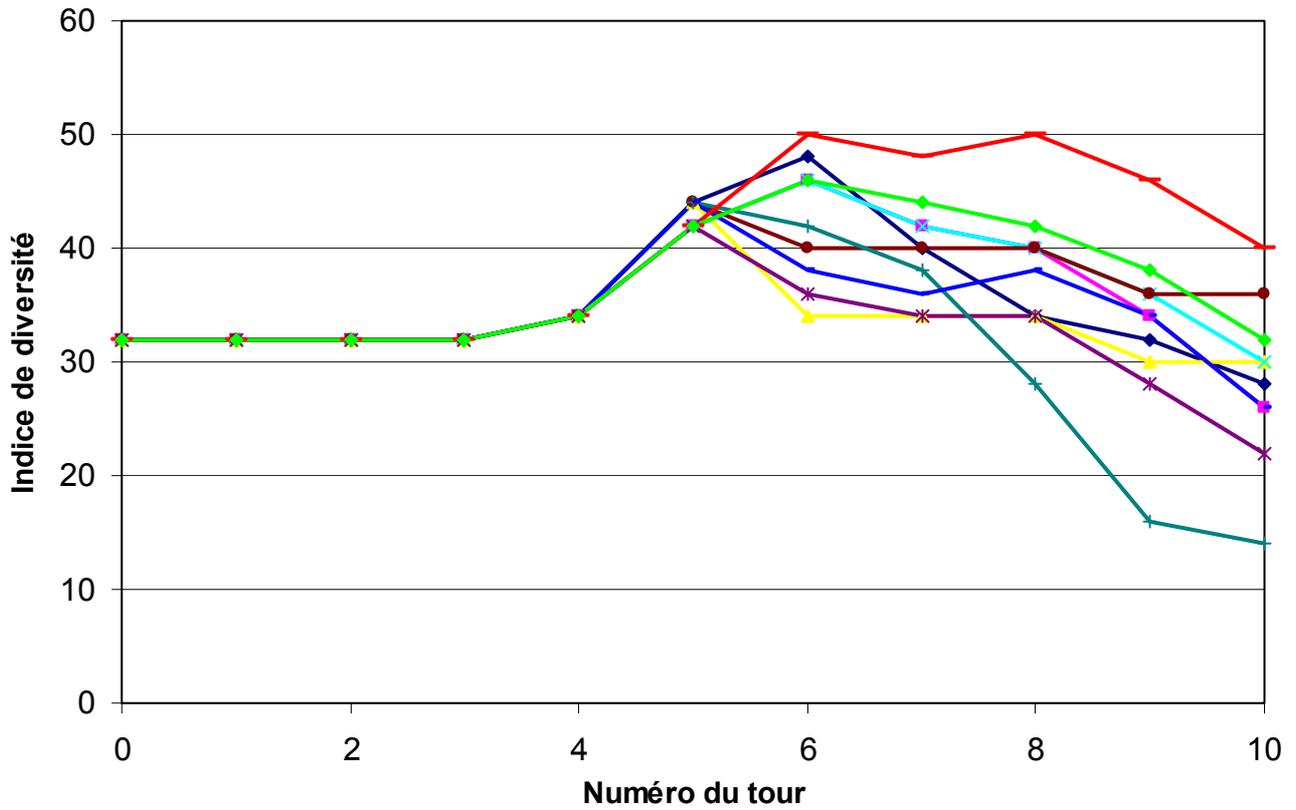


Figure 24 : Evolution sur 10 ans de l'indice de diversité observée lors de 10 simulations du scénario 'bdom' (C)

## Lexique des sigles

- CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
- CORMAS : COmmon-pool Ressources and Multi-Agents Systems
- CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière
- DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
- DFCI : Défense des Forêts Contre l'Incendie
- GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique
- INA P-G : Institut National Agronomique Paris-Grignon
- INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
- ONF : Office National des Forêts
- PACA : Provence Alpes Côte d'Azur
- PIDAF : Plan Intercommunal de Débroussaillage et d'Aménagement Forestier
- RCC : Réseau Coupures de Combustible
- SMA : Système Multi-Agents
- SDAFI : Schéma Directeur d'Aménagement des Forêts contre l'Incendie
- SDIS : Service Départemental d'Incendie et de Secours
- UF : unité fourragère

## Bibliographie

- ARMAND D., ETIENNE M., 1996, Impact of tree canopy cover on subterranean clover overseeding productivity and use in southeastern France. In *Western European silvopastoral systems*, Etienne M. (Ed), INRA Editions, Paris : pp. 71-82.
- ARNAUD M.T., DIMANCHE M., 1995, Sheep farming in sweet chestnut groves. In *Sylvopastoralism in the French Mediterranean region*, Etienne M. (Ed), Aster, Montfavet.
- ARNAUD M.T., ETIENNE M., GARDE L., HUBERT B., JULLIAN P., LECRIVAIN E., LEGRAND C., MATHEY F., MEURET M., NAPOLEONE M., PREVOST F., THAVAUD P., 1990, Espaces forestiers, élevage et incendie, Meuret M., Bonzi M. (Eds) : 9 p.
- AUSSIBAL G., BELLON S., DIMANCHE M., 1995, Cattle farming in holm oak garrigue. In *Sylvopastoralism in the French Mediterranean region*, Etienne M. (Ed), Aster, Montfavet.
- BARRETEAU O., LE PAGE C., D'AQUINO P., 2003, Role-playing games, models and negotiation processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*.
- BELLON S., GUERIN G., 1996, Silvopastoral resource management in the French Mediterranean region. In *Western European silvopastoral systems*, Etienne M. (Ed), INRA Editions, Paris : pp. 167-182.
- BOUSQUET F., BARRETEAU O., D'AQUINO P., ETIENNE M., BOISSAU S., AUBERT S., LE PAGE C., BABIN D., CASTELLA J.C., 1998, Multi-agent systems and role games : collective learning processes for ecosystem co-management. In *Complexity and ecosystem management : the theory and practice of multi-agent approaches*, Janssen M. (Ed), Elgar Publishers, Northampton : pp. 248-285.
- COUX N., 1994, La concertation appliquée à la prévention des incendies. *Pour 143* : pp. 123-135.
- CRPF Région PACA, 1990, Le milieu. Gestion et protection des espaces forestiers. In *Orientations régionales forestières*, 1 : pp. 4-68.
- DUCHE Y., RIGOLOTT E., 2000, Mises au point préliminaires. In *Conception des coupures de combustible*. Document Réseau Coupures de combustible n°4, Rigolot E., Costa M. (Eds), Edition de la Cardère, Morières : pp. 113-117.
- DUPUY J.L., 2000, Apports de la physique du feu. In *Conception des coupures de combustible*. Document Réseau Coupures de combustible n°4, Edition de la Cardère, Morières : pp. 29-40.
- ETIENNE M., 1990, a :Utilisation d'un espace forestier par un troupeau : à chaque échelle spatio-temporelle son modèle. *Mappe-monde : gestion de l'espace rural, des pratiques aux modèles*, 90 (4) : pp. 20-21.
- ETIENNE M., 1990, b :Superposition d'usages en forêt méditerranéenne soumise. *Mappe-monde : gestion de l'espace rural, des pratiques aux modèles*, 90 (4) : pp. 22-23.
- ETIENNE M., 1996, Intégrer des activités sylvopastorales et fourragères aux espaces forestiers méditerranéens pour les rendre moins combustibles. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*, 29 : pp. 169-182.
- ETIENNE M., 2002, Aménagement de la forêt méditerranéenne contre les incendies et biodiversité. *Revue Forestière française*, 53 : pp. 121-126.

---

ETIENNE M., 2003, SYLVOPAST : a multiple target role-playing game to assess negotiation processes in sylvopastoral management planning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6 (2).

ETIENNE M., ARMAND D., 2000, Dix ans d'améliorations pastorales dans un système sylvopastoral méditerranéen en France. *Cahier Options méditerranéennes*, 45 : pp. 407-410.

ETIENNE M., ARMAND D., GRUDE A., GIRARG N., NAPOLEONE M., 2002, Des moutons en forêt littorale varoise. Document Réseau Coupures de combustible n°5, Edition de la Cardère, Morières : 73 p.

ETIENNE M., ARONSON J., LE FLOC'H E., 1998, Abandoned lands and land conflicts in southern France. In *Landscape disturbance and biodiversity in Mediterranean-type ecosystems*, Rundel P., Montenegro G., Jaksic F. (Eds), Springer, Berlin : pp. 127-140.

ETIENNE M., DERZKO M., ROGOLOT E., 1996, Browse impact in silvopastoral systems participating in fire prevention in the French Mediterranean region. In *Western European silvopastoral systems*, Etienne M. (Ed), INRA Editions, Paris : pp. 93-102.

ETIENNE M., HUBERT B., LACHAUX M., COUX N., JULLIAN P., LASSEUR J., LECRIVAIN E., LEGRAND C., LEOUFFRE M.C., NAPOLEOE M., Territoire pastoral et espace forestier : essai d'analyse des pratiques de pâturage : pp. 265-267

ETIENNE M., LE PAGE C., COHEN M., 1997, A step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*.

ETIENNE M., VALEIX J., 1995, Sheep farming systems installed on wide fuel breaks. In *Sylvopastoralism in the French Mediterranean region*, Etienne M. (Ed), Aster, Montfavet.

GUITON J.L., KMIÉC L., 2000, Traitement de la végétation. In *Conception des coupures de combustible*. Document Réseau Coupures de combustible n°4, Rigolot E., Costa M. (Eds), Edition de la Cardère, Morières : pp. 41-46.

HUBERT B., RIGOLOT E., TURLAN T., 1991, Les incendies de forêt en région méditerranéenne : Nouveaux enjeux pour la recherche. *Science Technique Technologique*, 18 : pp. 8-15.

MILLAT C., THAVAUD P., DIMANCHE M., 2000, L'exemple du pastoralisme. In *Conception des coupures de combustible*. Document Réseau Coupures de combustible n°4, Rigolot E., Costa M. (Eds), Edition de la Cardère, Morières : pp. 113-117.

RIGOLOT E., ETIENNE M., 1996, Litter thickness on tree covered fuel-breaks maintained by grazing. In *Western European silvopastoral systems*, Etienne M. (Ed), INRA Editions, Paris : pp. 111-124.

SIBBALD A., 1996, Sylvopastoral systems on temperate sown pastures : a personal perspective. In *Western European silvopastoral systems*, Etienne M. (Ed), INRA Editions, Paris : 23-36.

VALETTE J.C., 1990, Inflammabilité des espèces forestières méditerranéennes. Conséquence sur la combustibilité des formations forestières. In *Revue forestière française*, 17 : pp. 76-92.

### **Sites Web**

<http://jasss.soc.surrey.ac.uk>

<http://www.ofme.org>

## **Annexe**

**Annexe 1 : Exemple de procédure écrite en Smalltalk \_\_\_\_\_ A**

**Annexe 2 : Carte des structures de végétation du modèle SylvopastJeu \_\_\_\_\_ B**

**Annexe 3 : Cartes virtuelles réalisées sur Sylvopast et utilisées lors des entretiens \_\_\_\_\_ C**

**Annexe 4 : Relation entre l'indice du risque d'incendie au tour 5 et le nombre de cellules  
brûlées lors de l'incendie du tour 5 \_\_\_\_\_ D**

**Annexe 5 : Schéma récapitulatif des actions du modèle SylvopastJeu \_\_\_\_\_ E**

**Annexe 6 : Tableaux récapitulatifs des données utilisées pour calculer la croissance de l'herbe  
\_\_\_\_\_ F**

**Annexe 7 : Détermination aléatoire du début et de la fin des saisons \_\_\_\_\_ H**

**Annexe 8 : Cartes finales des trois scénarios de SylvopastJeu, selon le point de vue de la  
végétation \_\_\_\_\_ J**

---

### Annexe 1 : Exemple de procédure écrite en Smalltalk

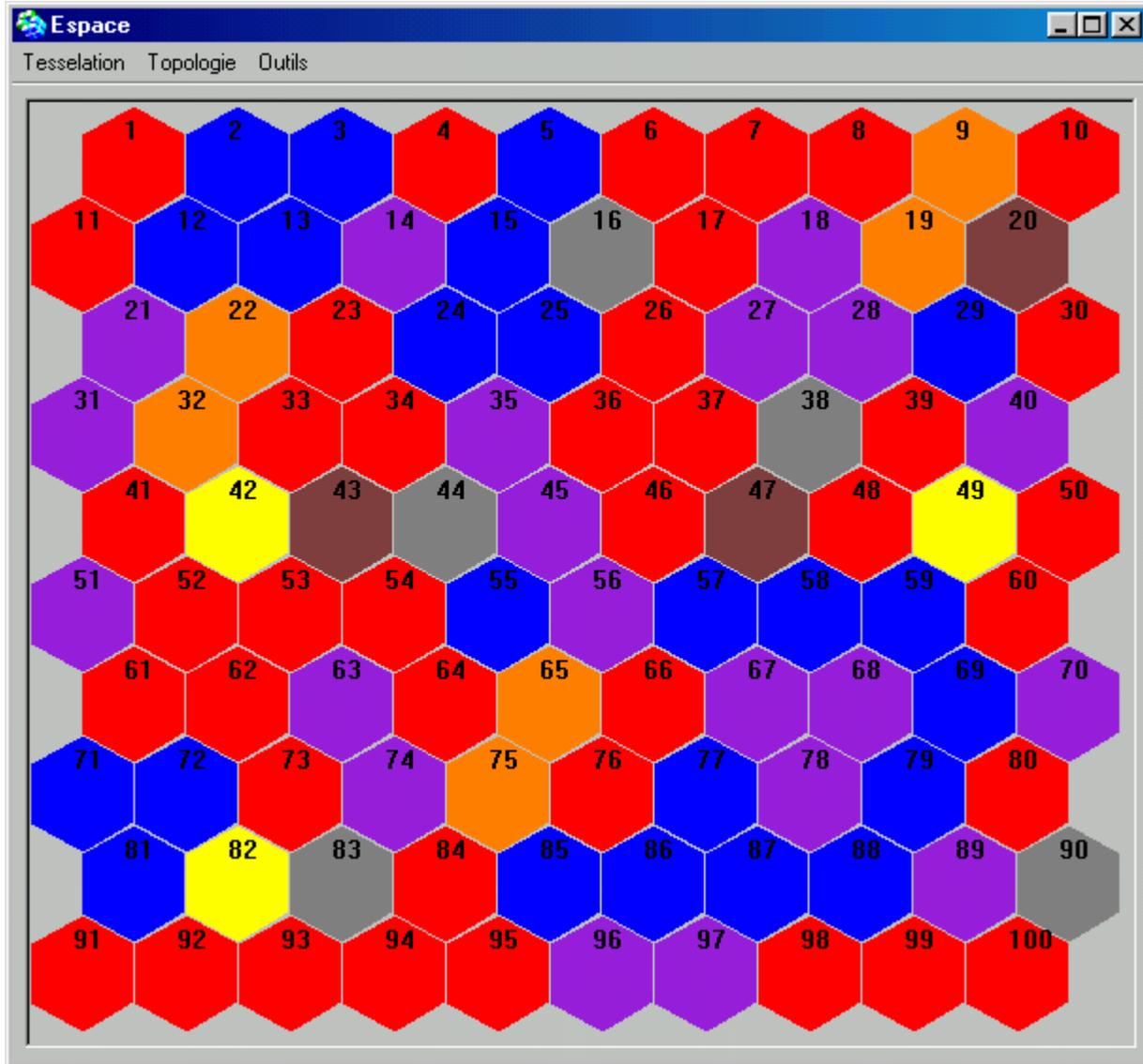
Ceci correspond au codage de la détermination du début et de la fin de saisons expliquée en annexe 7.

```
(self seasons at: 1) = $D ifTrue: [self autumnInit: 40. self autumnEnd: (self autumnInit + 40)] .
(self seasons at: 1) = $M ifTrue: [self autumnInit: (25 + (Cormas random * 5)asInteger). self autumnEnd: self autumnInit + 70].
(self seasons at: 1) = $R ifTrue: [self autumnInit: (Cormas random * 10)asInteger. self autumnEnd: self autumnInit + 110].

(self seasons at: 2) = $R ifTrue: [self winterInit: (120 + (Cormas random * 10)asInteger). self winterEnd: (self winterInit + 45)].
self seasons = 'RMR' ifTrue: [self winterInit: (120 + (Cormas random * 25)asInteger). self winterEnd: (self winterInit + 30)].
(self seasons = 'RMD' or: [self seasons = 'RMM']) ifTrue: [self winterInit: (120 + (Cormas random * 45)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 30)].
(self seasons = 'MMR' or: [self seasons = 'DMR']) ifTrue: [self winterInit: (100 + (Cormas random * 45)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 30)].
(self seasons = 'MMM' or: [self seasons = 'MMD' or: [self seasons = 'DMM' or: [self seasons = 'DMD']]]) ifTrue: [self winterInit: (100 + (Cormas random * 65)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 30)].
self seasons = 'RDR' ifTrue: [self winterInit: (120 + (Cormas random * 35)asInteger). self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'RDM' ifTrue: [self winterInit: (120 + (Cormas random * 55)asInteger). self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'RDD' ifTrue: [self winterInit: (120 + (Cormas random * 75)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'MDR' ifTrue: [self winterInit: (100 + (Cormas random * 55)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'MDM' ifTrue: [self winterInit: (100 + (Cormas random * 75)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'MDD' ifTrue: [self winterInit: (100 + (Cormas random * 95)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'DDR' ifTrue: [self winterInit: (80 + (Cormas random * 75)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'DDM' ifTrue: [self winterInit: (80 + (Cormas random * 95)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 20)].
self seasons = 'DDD' ifTrue: [self winterInit: (80 + (Cormas random * 105)asInteger).self winterEnd: (self winterInit + 20)].

(self seasons at: 3) = $R ifTrue: [self springInit: (175 + (Cormas random * 20)asInteger). self springEnd: (self springInit + 85)] .
(self seasons at: 3) = $M ifTrue: [self springInit: (195 + (Cormas random * 15)asInteger). self springEnd: (self springInit + 60)] .
(self seasons at: 3) = $D ifTrue: [self springInit: (215 + (Cormas random * 15)asInteger). self springEnd: (self springInit + 30)] .
```

**Annexe 2 : Carte des structures de végétation du modèle SylvopastJeu**

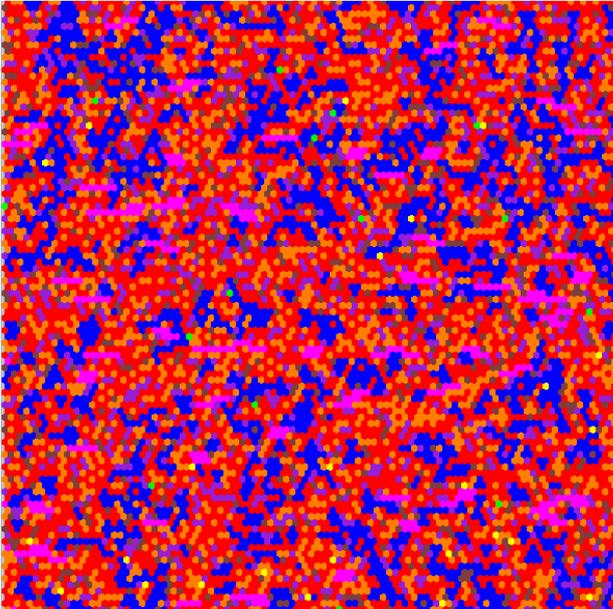


Voir la légende sur la figure 1.

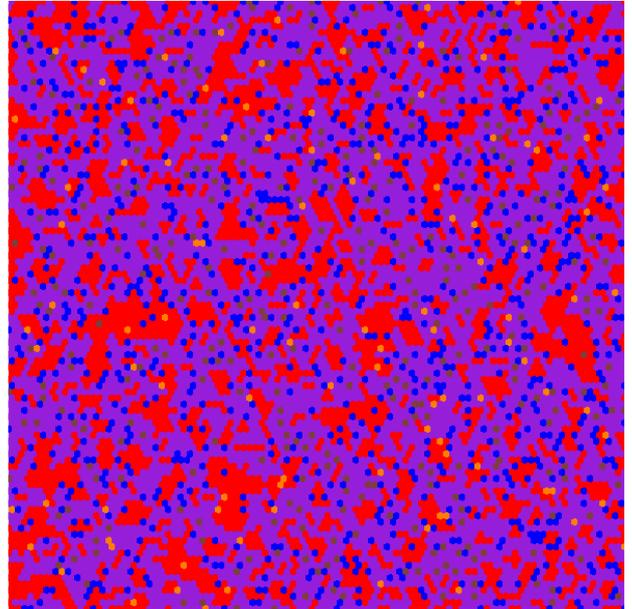
### Annexe 3 : Cartes virtuelles réalisées sur Sylvopast et utilisées lors des entretiens

La légende se trouve sur la figure 1 sauf pour les couleurs rose correspondant aux vignes et bleu turquoise aux châtaigniers.

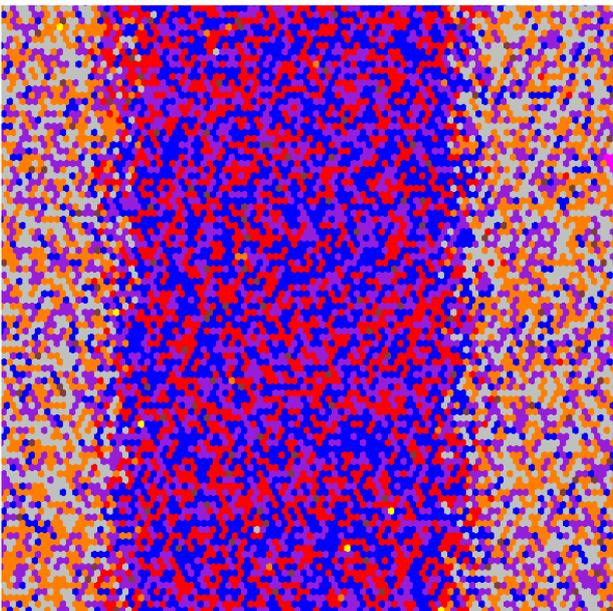
◆ *Aude*



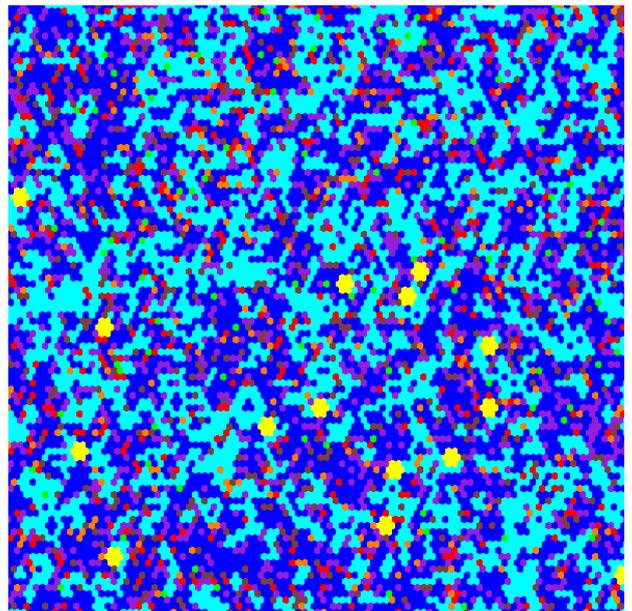
◆ *Var*



◆ *Gard (avec garrigue et rochers)*



◆ *Gard (avec châtaigniers)*

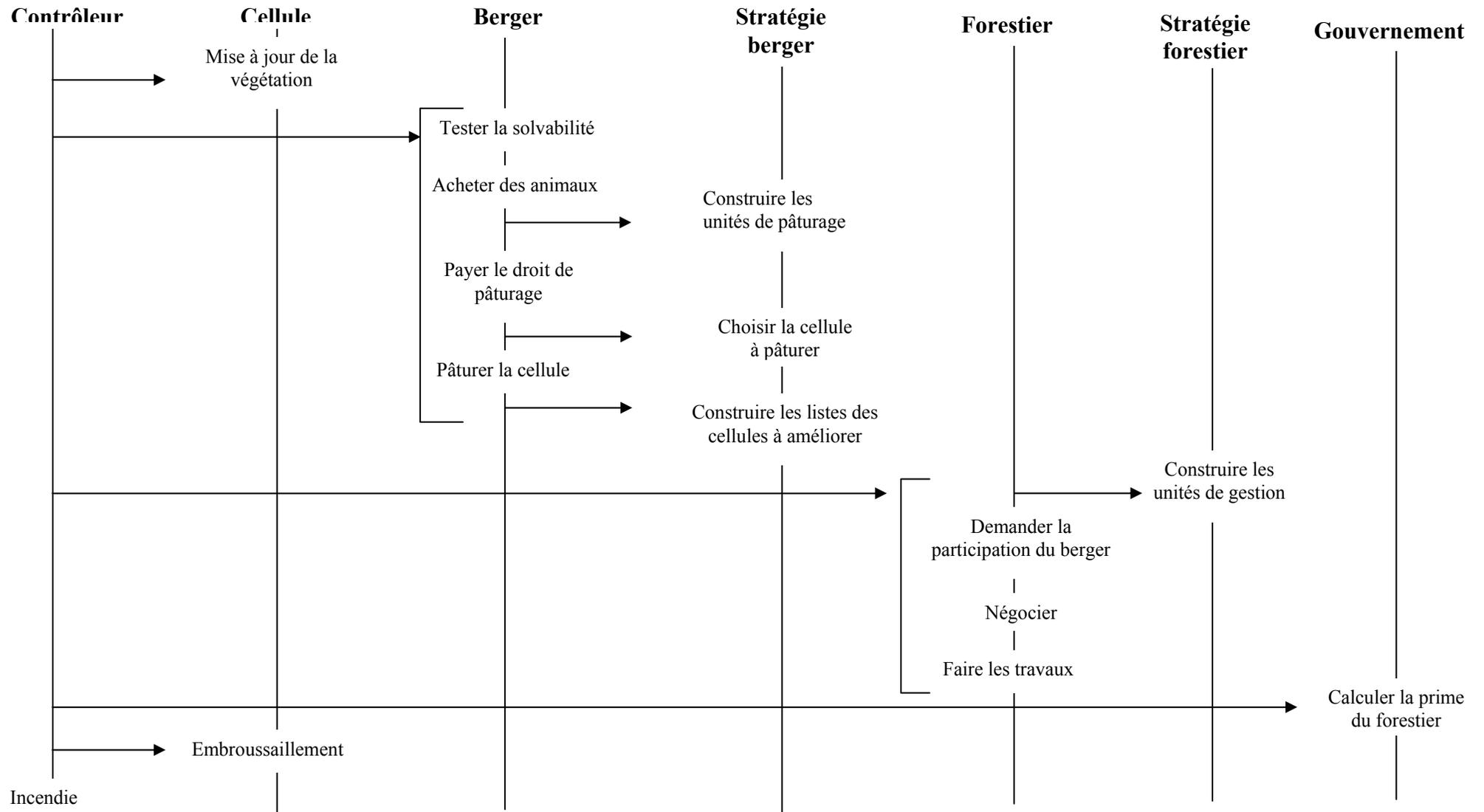




**Annexe 4 : Relation entre l'indice de risque d'incendie au tour 5 et le nombre de cellules incendiées**

| Nombre de cellules incendiées | Indice du risque d'incendies au tour 5 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                               | 178                                    | 181 | 182 | 183 | 184 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 197 | 198 | 199 | 201 | 203 | 212 | 216 |
| 1                             | 1                                      |     | 1   |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     | 1   | 1   |     | 1   |     |     |     |     |     |     |
| 2                             |  | 1   |     | 1   |     |     |     |     |     | 1   |     |     | 1   |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |
| 4                             |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 5                             |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 8                             |  | 1   |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 9                             |  |     | 1   |     |     |     | 1   | 1   | 1   | 1   | 2   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 10                            |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |
| 11                            |  |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     | 1   |     |     | 1   |     |
| 12                            |  | 1   |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     | 1   |     | 1   |
| 13                            |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 14                            |  |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |
| 15                            |  |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 18                            |  |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |
| 20                            |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 22                            |  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |
| 27                            |  |     |     | 1   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 1   |     |     |     |     |

## Annexe 5 : Modèle conceptuel des actions formalisées dans SylvopastJeu



## Annexe 6 : Tableaux récapitulatifs des données utilisées pour calculer la croissance de l'herbe

### ◆ *Nombre de jours efficaces suivant la saison et son type*

| Saison    | Type de saison |         |       |
|-----------|----------------|---------|-------|
|           | Pluvieuse      | Moyenne | Sèche |
| Automne   | 110            | 70      | 40    |
| Hiver     | 45             | 30      | 20    |
| Printemps | 85             | 60      | 30    |

### ◆ *Début des saisons suivant leur type*

Le jour 0 correspond au 240<sup>ème</sup> jour d'une année.

| Saison    | Type de saison |         |       |
|-----------|----------------|---------|-------|
|           | Pluvieuse      | Moyenne | Sèche |
| Automne   | 0              | 25      | 40    |
| Hiver     | 120            | 100     | 80    |
| Printemps | 175            | 195     | 215   |
| Eté       | 280            | 270     | 260   |

### ◆ *Croissance saisonnière de l'herbe suivant la saison et son type (UF/ha)*

| Saison    | Type de saison |         |       |
|-----------|----------------|---------|-------|
|           | Pluvieuse      | Moyenne | Sèche |
| Automne   | 900            | 400     | 140   |
| Hiver     | 1000           | 550     | 200   |
| Printemps | 1500           | 1100    | 850   |

◆ *Croissance journalière de l'herbe suivant la saison et son type (UF/ha)*

|           | Type de saison |         |       |                   |
|-----------|----------------|---------|-------|-------------------|
| Saison    | Pluvieuse      | Moyenne | Sèche | <b>Coef.moyen</b> |
| Automne   | 8,2            | 5,7     | 3,5   | <b>5,8</b>        |
| Hiver     | 22,2           | 18,3    | 10    | <b>16,8</b>       |
| Printemps | 17,6           | 18,3    | 28,3  | <b>21,4</b>       |

◆ *Effet de la présence d'arbres sur la croissance journalière de l'herbe (UF/ha)*

ufj = production journalière d'herbe seule (voir tableau précédent)

|           | Type de saison |           |           |
|-----------|----------------|-----------|-----------|
| Saison    | Pluvieuse      | Moyenne   | Sèche     |
| Automne   | ufj + 250      | ufj + 250 | ufj + 250 |
| Hiver     | 1000           | 1000      | 1000      |
| Printemps | ufj - 400      | ufj       | ufj + 400 |

## Annexe 7 : Détermination aléatoire du début et de la fin des saisons

❖  $i$  : jour de début de la courbe

$$i = 0$$

❖  $a$  : jour de début de l'automne

- si automne pluvieux :  $a = i$
- si automne moyen :  $a = i + 25$
- si automne sec :  $a = i + 40$

❖  $b$  : début de la pousse d'automne

$$b = a + x$$

$x$  est un nombre entier aléatoire compris entre 0 et (durée de l'automne – nombre de jours efficaces d'automne)

- si automne pluvieux :  $a < b < a + 10$
- si automne moyen :  $a < b < a + 5$
- si automne sec :  $b = a$

❖  $c$  : fin de la pousse d'automne

$$c = b + \text{nombre de jours efficaces d'automne}$$

- si automne pluvieux :  $c = b + 110$
- si automne moyen :  $c = b + 70$
- si automne sec :  $c = b + 40$

❖  $d$  : début de la pousse d'hiver

La pousse de l'herbe d'hiver ne démarre que lorsque l'automne est fini c'est-à-dire au jour 120 si l'automne est pluvieux, 100 si l'automne est moyen, 80 si l'automne est sec et que si l'hiver a commencé c'est-à-dire au jour 120 si l'hiver est pluvieux, 100 si l'hiver est moyen, 80 si l'hiver est sec.

- si automne pluvieux :  $d = 120 + x$

$x$  est un nombre entier aléatoire compris entre 0 et (durée de l'hiver – nombre de jours efficaces d'hiver)

- si hiver pluvieux :  $120 < d < 130$
- si hiver moyen :  $120 < d < 140$  si printemps pluvieux,  $120 < d < 165$  si printemps sec ou moyen
- si hiver sec :  $120 < d < 155$  si printemps pluvieux,  $120 < d < 175$  si printemps moyen,  $120 < d < 195$  si printemps sec
- si automne moyen :
  - si hiver pluvieux :  $d = 120 + x$  donc  $120 < d < 130$
  - sinon  $d = 100 + x$

- si hiver moyen :  $100 < d < 145$  si printemps pluvieux,  $100 < d < 165$  si printemps sec ou moyen
- si hiver sec :  $100 < d < 155$  si printemps pluvieux,  $100 < d < 175$  si printemps moyen,  $100 < d < 195$  si printemps sec
- si automne sec :
  - si hiver pluvieux :  $d = 120 + x$  donc  $120 < d < 130$
  - si hiver moyen :  $d = 100 + x$  donc  $100 < d < 145$  si printemps pluvieux et  $100 < d < 165$  si printemps sec ou moyen
  - si hiver sec :  $d = 80 + x$  donc  $80 < d < 155$  si printemps pluvieux,  $80 < d < 175$  si printemps moyen et  $80 < d < 185$  si printemps sec

❖ e : fin de la pousse d'hiver

$e = d + \text{nombre de jours efficaces d'hiver}$

- si hiver pluvieux :  $e = d + 45$
- si hiver moyen :  $e = d + 30$
- si hiver sec :  $e = d + 20$

❖ f : début de la pousse de printemps

La pousse de l'herbe de printemps ne commence que lorsque le printemps a débuté c'est-à-dire à partir du jour 175 si le printemps est pluvieux, du jour 195 si le printemps est moyen et du jour 215 si le printemps est sec.

$f = \text{jour du début du printemps} + x$

x est un nombre entier aléatoire compris entre 0 et (durée du printemps – nombre de jours efficaces du printemps)

- si printemps pluvieux :  $f = 175 + x$  donc  $175 < f < 195$
- si printemps moyen :  $f = 195 + x$  donc  $195 < f < 210$
- si printemps sec :  $f = 215 + x$  donc  $215 < f < 230$

❖ g : fin de la pousse de printemps

$g = f + \text{nombre de jours efficaces de printemps}$

- si printemps pluvieux :  $g = f + 85$
- si printemps moyen :  $g = f + 60$
- si printemps sec :  $g = f + 30$

❖ L'herbe se dégrade à partir de la fin de pousse de l'herbe de printemps. Cette dégradation se fait de 50UF/ha/j.



