

Mémoire de recherche ESIEA

Sujet du stage

Simulation de communautés de plantes Coopération inter-espèces sur du long-terme

Par

Bertrand GIBERT

Décembre 2003

Effectué au CRIP5

Centre de Recherche en Informatique de PARIS 5

Groupe de travail du LIAP5

Laboratoire d'Intelligence Artificielle de PARIS 5

Composition du jury :

Président de jury Anne-Marie KEMPF

Suiveur Claude LATTAUD

Rapporteur Michel LE DEIST

Remerciements

Je remercie vivement Jean-Marc LABAT, directeur du CRIP5 et responsable de la filière III du DEA MIASH, pour m'avoir permis de préparer ce DEA.

Norbert COT, directeur du LIAP5, pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Je remercie tout particulièrement mon responsable de stage, Claude LATTAUD, pour ses conseils et remarques à la fois amicales et critiques qui m'ont aidé à progresser. Ainsi que pour le temps qu'il a bien voulu m'accorder, que ce soit pour la relecture de mon rapport ou la préparation de ma soutenance.

Je remercie également les membres du LIAP5 pour leur chaleureux accueil dans l'équipe.

Toute ma gratitude à Michel LE DEIST pour avoir accepté d'être le rapporteur de mon mémoire d'ingénieur et pour sa disponibilité.

Et enfin ma famille pour son soutien à tout moment.

Résumé

Dans ce projet, les plantes artificielles, de même que les communautés de plantes, évoluent dans un environnement virtuel 3D. Chaque plante y est vue comme une organisation d'agents organes (racine, tige, houppier) interagissant avec l'environnement et interdépendants pour leur survie. La méthodologie multi-agents est ainsi utilisée afin de modéliser l'ensemble des diverses espèces, mais aussi les plantes elles-mêmes.

Ce travail a pour objectif d'étudier les dynamiques de co-évolution inter-espèces au fil de plusieurs générations et s'axe tout particulièrement sur l'aspect coopératif inter-espèces. Un modèle d'allélopathie, à savoir l'échange de substances chimiques entre différentes plantes, a été développé sur la plate-forme de simulation à cet effet. Afin d'étendre les possibilités de coopérations des plantes entre elles, nous avons modélisé au cours de ce travail d'autres types de plantes tels que les champignons, ainsi que leurs fonctions comme le parasitisme.

Nous avons pu mettre en évidence au cours des simulations et grâce à ces modèles d'interaction plante à plante, des stratégies de coopération pour l'exploitation des ressources. Ainsi la mycorhize, ou association entre un champignon et les racines d'une plante, est un exemple de symbiose dont le rôle a été et est toujours crucial pour l'évolution des plantes terrestres.

Mots clés : Vie Artificielle, Communauté de plantes, Coopération, Co-évolution, Mycorhize, Systèmes Multi-Agents.

Abstract

In this project, artificial plants just like plants communities evolve in a simplified 3D environment. Every plant there is viewed as an organization of organs (root, stem, crown) interacting with environment and interdependent for their survival. This multi-agents approach is used in order to model the various species, but also plants themselves.

The purpose of this work is to study the co-evolution between species through several generations and it makes a particular interest in cooperative aspect. A model of allelopathy, namely the exchange of chemical between different plants, has been developed on the platform in this way. In order to enhance plants cooperation capacity, we modeled during this work others plants type such as mushrooms, as well as their functions like parasitism.

With this plant to plant interaction model, we were able to highlight during simulations cooperative strategies for nutriments assimilation. The mycorrhizae, or association between mushroom and plant roots, is an example of crucial symbiosis for earthly plants evolution.

Keywords : Artificial Life, Plant Community, Cooperation, co-evolution, Mycorrhizae, Multi-Agents Systems.

Table des matières

Introduction.....	9
Contexte.....	9
Problématique.....	9
Présentation du mémoire.....	9
Chapitre 1 Etat de l'art.....	11
1.1 Modèles de plantes individuelles.....	11
1.1.1 Les L-systèmes.....	11
1.1.2 Graphes entité-relation.....	12
1.2 Modèles de communautés de plantes.....	13
1.3 Discussion.....	13
Chapitre 2 Agents et Systèmes Multi-Agents	15
2.1 Définitions.....	15
2.1.1 Les Agents.....	15
2.1.2 Systèmes Multi-Agents.....	15
2.2 Les différentes approches.....	16
2.2.1 L'approche cognitive.....	16
2.2.2 L'approche réactive.....	16
2.3 Types d'agents.....	17
2.3.1 Agents communicants.....	17
2.3.2 Agents situés.....	17
2.4 Organisation Multi-Agents.....	17
2.5 Interactions entre agents.....	18
2.5.1 Paramètres d'interaction.....	18
2.5.2 Types d'interaction.....	19
2.6 Communications.....	19
Chapitre 3 Modèle utilisé sur la plate-forme.....	21
3.1 Modélisation agent.....	21
3.2 L'environnement.....	21
3.2.1 Le sol.....	22
3.2.2 Le ciel.....	22
3.3 Modèle individuel de la plante.....	23
3.3.1 Modèle génétique.....	23
3.3.2 Les différents organes.....	24
3.3.3 Les phases de la vie d'une plante.....	26
3.4 Limites du modèle.....	26
Chapitre 4 Les interactions chez les plantes.....	28
4.1 Types d'interactions.....	28
4.1.1 Présentation des associations.....	28
4.1.2 Communauté de plantes.....	28
4.2 Interactions coopératives.....	29
4.2.1 L'allélopathie.....	29
4.2.2 Le mutualisme.....	29
4.3 Parasitisme fongique.....	30
4.4 Conclusion.....	30
Chapitre 5 Extension du modèle.....	32
5.1 Modifications apportées à l'environnement.....	32
5.1.1 Le sol.....	32
5.1.2 Assimilation des ressources et échanges dans la plante.....	33
5.1.3 Modèle de pluviométrie.....	33
5.2 Ajout de nouveaux types de plantes.....	34
5.2.1 Modèle du champignon.....	35

5.2.2	Le saprophytisme	37
5.2.3	Le parasitisme	37
Chapitre 6	Expériences.....	38
6.1	Expérience 1 : Validation du nouveau système de diffusion.....	38
6.1.1	Objectif.....	38
6.1.2	Discussion des résultats obtenus	38
6.1.3	Conclusion.....	40
6.2	Expérience 2 : Validation du modèle de saprophytisme	41
6.2.1	Objectif.....	41
6.2.2	Discussion des résultats obtenus	41
6.2.3	Conclusion.....	43
6.3	Expérience 3 : Comparaison du développement séparé et symbiotique d'une plante et d'un champignon	44
6.3.1	Objectif.....	44
6.3.2	Exposé des résultats d'expériences	44
6.3.3	Conclusion.....	47
6.4	Expérience 4 : Évolution d'un environnement composé de champignons et plantes sur plusieurs générations.	48
6.4.1	Objectif.....	48
6.4.2	Exposé des résultats d'expériences	48
6.4.3	Conclusion.....	50
Conclusion	51
La plate-forme		51
Perspectives		51
Bilan personnel		52
Annexe A : Équations	53
1)	Assimilation des nouvelles ressources du sol.....	53
2)	Échange de ressources dans la plante.....	53
3)	Diffusion des substances dans le sol	53
4)	Le saprophytisme	54
Annexe B : Paramètres Expériences	55
1)	Paramètres expérience 1	55
2)	Paramètres expérience 2	55
3)	Paramètres expérience 3	55
4)	Paramètres expérience 4.....	56
5)	Paramètres Arbre.....	56
6)	Paramètres Champignon.....	57
Annexe C : Documentation technique.....	58
I.	Objectif	59
II.	Architecture de la plate-forme	59
III.	Organisation des sources.....	60
IV.	Manuel d'utilisation	63
V.	Glossaire	71
Annexe D : Organigramme du CRIP5.....	72
Bibliographie	73

Table des Illustrations

Figure 1 : Exemple d'utilisation des L-systèmes sur le développement d'une plante	11
Figure 2 : Graphe des entités	13
Figure 3 : Graphe des relations	13
Figure 4 : Représentation des niveaux d'organisation.....	18
Figure 5 : Tableau des situations d'interaction.....	19
Figure 6 : Distinction entre interaction avec l'environnement et communication entre agents	20
Figure 7 : Architecture de l'environnement.....	21
Figure 8 : Représentation du sol discrétisé en voxels	22
Figure 9 : Calcul de la photosynthèse	22
Figure 10 : Interactions entre agents dans l'environnement.....	23
Figure 11 : Cycle de fonctionnement d'un agent organe.....	24
Figure 12 : Comparaison du modèle de notre réseau racinaire à droite avec une représentation 3D réaliste à gauche.	25
Figure 13 : Tige d'une plante se courbant pour optimiser son ensoleillement.....	25
Figure 14 : Houppier dont les branches poussent à différentes vitesses	26
Figure 15 : Phases de la vie d'une plante	26
Figure 16 : Associations du vivant.....	28
Figure 17 : Modèle agent représentant l'architecture ainsi que les interactions	35
Figure 18 : Phases de la vie d'un champignon.....	35
Figure 19 : Représentation graphique du champignon	36
Figure 20 : Diagramme de rétention de l'eau dans un sol réel	39
Figure 21 : Rétention de l'eau dans la simulation	39
Figure 22 : Évolution des ressources du sol au niveau d'une plante au cours d'une expérience typique	39
Figure 23 : Somme cumulée des ressources en minéraux au niveau d'une plante.....	40
Figure 24 : Répartition du carbone dans le sol au cours de la simulation.....	41
Figure 25 : Moyenne sur 10 simulations de l'évolution de la matière structurale totale des champignons	42
Figure 26 : Moyenne des ressources en carbone de la couche supérieure	43
Figure 27 : Comparaison des relations de mycorhize chez l'hibiscus	44
Figure 28 : Simulation d'une relation de mycorhize	44
Figure 29 : Matière structurale produite lors d'une relation de mycorhize dans un sol classique.....	45
Figure 30 : Matière structurale produite lors d'une relation de mycorhize dans un sol riche en minéraux	46
Figure 31 : Matière structurale produite lors d'une relation de mycorhize dans un sol pauvre en minéraux.....	47
Figure 32 : Symbiose mycorhizienne entre le Tricholoma et le Pin	48
Figure 33 : Moyenne de l'évolution en matière structurale lors de la colonisation de l'environnement.....	49
Figure 34 : Vue de dessus de la simulation après 2000 pas de temps.....	49
Figure 35 : Vue latérale de la simulation après 2000 pas de temps	49

Introduction

Contexte

Ce stage d'une durée de six mois s'est déroulé au sein du laboratoire du CRIP5 (Centre de Recherche en Informatique de Paris 5) et fait à la fois office de stage de DEA et de fin d'études d'école d'ingénieurs. Ce laboratoire fait partie de l'unité de formation et de recherche en mathématiques et informatique de Paris 5, il a été créé le 1^{er} janvier 1998. En fait, le centre de recherche est le regroupement de trois entités, le laboratoire des systèmes intelligents de perception et d'intelligence artificielle, l'équipe d'informatique et communication et enfin le groupe de psychologie mathématique. Cette association a permis de rassembler des forces vives de recherche en informatique et de consolider des thématiques déjà présentes sous des formes voisines ou complémentaires dans les trois entités.

Le centre de recherche est maintenant reconfiguré en trois équipes (voir organigramme annexe D) dont les dominantes sont respectivement : systèmes d'information et applications réparties, signal parole image réseaux et enfin intelligence artificielle et applications. Cette dernière est encore composée de trois groupes de travail qui s'intéressent plus particulièrement aux : systèmes d'assistance pour la formation et l'éducation (SAFE), systèmes à base de connaissance (SBC) et l'intelligence artificielle (LIAP5).

J'ai été accueilli dans le groupe du LIAP5 (Laboratoire d'Intelligence Artificielle de Paris 5) dirigé par Norbert COT et j'étais sous la responsabilité de Claude LATTAUD. Une salle informatique de l'Université contenant trois PC nous était réservée. Ces machines étaient équipées du système d'exploitation Windows 2000 et d'outils de développement pré-installés tels que Delphi 5 Professionnel que j'ai utilisé pour mon projet.

Problématique

Le cadre de mon travail se situe dans le domaine des systèmes multi-agents appliqués à l'évolution de communautés de plantes. En effet, bien qu'il existe déjà des modèles de plantes reconnus, certains demandent de nombreuses données biologiques, d'autres ont des temps de calcul trop importants pour effectuer des simulations sur du long terme, et enfin d'autres ont une modélisation qui ne leur permet pas de représenter les interactions entre plantes. Ainsi, une modélisation de l'écosystème utilisant la méthodologie multi-agents peut permettre d'observer l'influence des stratégies mises en place par une plante au niveau individuel sur la capacité de survie de son espèce en général.

Une plate-forme de simulation a déjà été créée au cours d'un stage antérieur utilisant cette approche. L'objectif de mon travail s'axe sur l'aspect coopération inter-espèces sur plusieurs générations en se basant sur les modèles, méthodes et outils du travail précédent. La problématique est alors d'étudier l'émergence de comportements particuliers coopératifs dans ces communautés de plantes, puis de définir pourquoi des stratégies de ce type apparaissent.

Présentation du mémoire

Pour mieux comprendre la suite de mon exposé, je donne ici en vue d'ensemble le plan suivi et la séquence des raisonnements établis.

Dans un premier chapitre est présenté un état de l'art des différentes modélisations de plantes et de communautés de plantes les plus utilisées, leur fonctionnement est expliqué brièvement avant de commenter leur intérêt dans une simulation de communautés de plantes. Le deuxième chapitre introduit la méthodologie multi-agents. Après quelques définitions, les types d'interactions et les

modes de communication entre agents sont détaillés. Le chapitre suivant rappelle le modèle utilisé sur la plate-forme, décrit l'environnement, le modèle de plante individuelle et traite des limites du modèle. Lors du quatrième chapitre sont présentées les différentes interactions qui existent dans la nature entre les plantes et leur environnement, et entre les plantes elles-mêmes. Le cinquième chapitre présente les extensions apportées au modèle au cours du stage. Le choix de chaque nouveau modèle y est détaillé puis commenté. Le dernier chapitre traite des différentes expériences de validation effectuées. Ces expériences sont décrites, les résultats sont discutés avant d'en tirer des conclusions.

Enfin je termine par quelques éléments de discussion qui introduisent des perspectives nouvelles.

Chapitre 1 Etat de l'art

Il existe plusieurs modèles permettant de simuler le développement de plantes et de communautés de plantes. Cependant, ils ne font pas tous ressortir les mêmes aspects de ces développements.

Dans ce chapitre nous présentons des modèles de plantes individuelles, puis des modèles de communautés de plantes pour enfin finir par une discussion sur leurs avantages et inconvénients.

1.1 Modèles de plantes individuelles

Afin de pouvoir traiter de façon générale la modélisation d'un écosystème dans une simulation, nous nous intéressons en premier aux modèles permettant de décrire explicitement le développement architectural de chacun des individus au cours de leur croissance. Les deux formalismes les plus employées dans ce domaine sont : les L-systèmes et les graphes entité-relation.

1.1.1 Les L-systèmes

Les L-systèmes sont un formalisme créé par Lindenmayer en 1968 [2] et se définissent dans le cadre des grammaires formelles. Une grammaire consiste en un ensemble de règles, s'appliquant à des entités élémentaires, pour pouvoir former des chaînes de caractères. Dans le cas de la modélisation d'une plante individuelle, la chaîne de caractères représente une plante tandis que chaque caractère représente une sous-unité de cette plante telle qu'une branche, une feuille, etc. Nous pouvons alors comparer le développement de cette plante à un procédé de génération de chaîne.

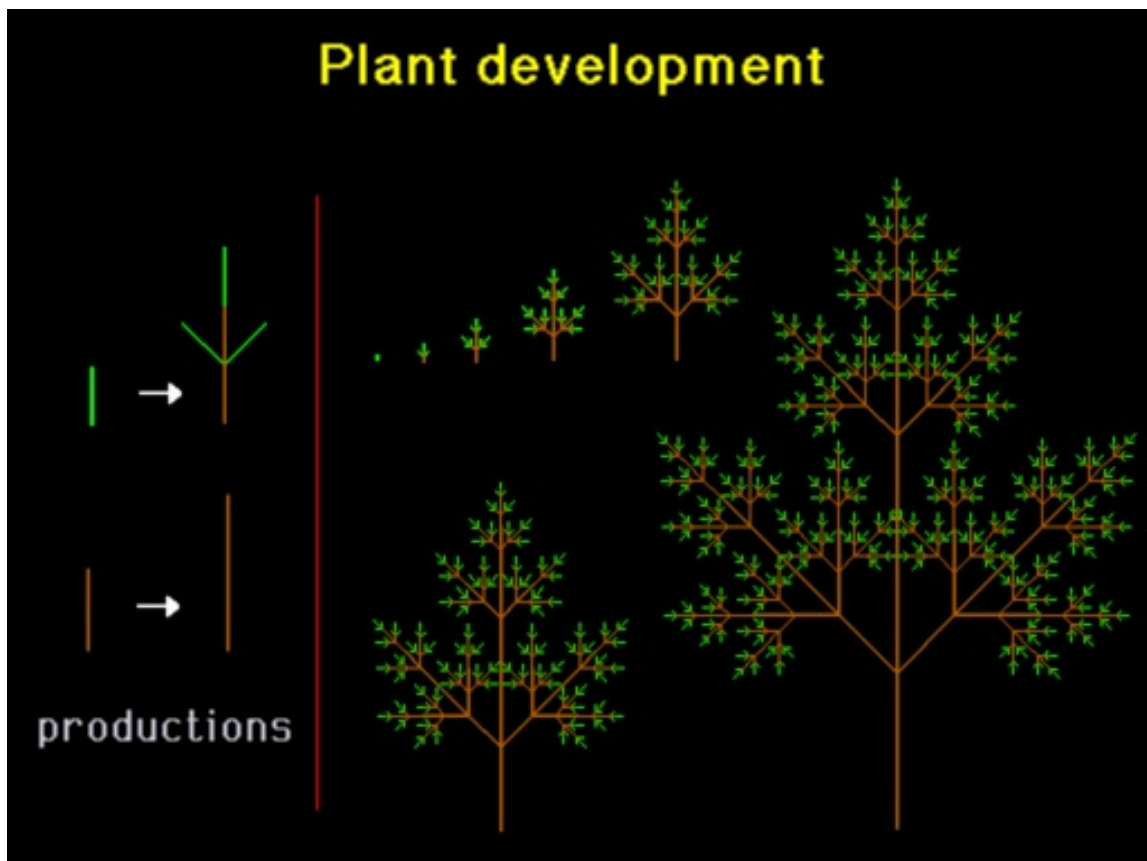


Figure 1 : Exemple d'utilisation des L-systèmes sur le développement d'une plante

Un L-système simple peut être représenté par un triplet $\{\Sigma, P, \omega\}$ dont les différents éléments sont définis ainsi :

- Σ est un alphabet, c'est-à-dire un ensemble fini de caractères représentant les différents états des sous-unités.

- P est l'ensemble des règles de production, spécifiant les transitions possibles. Chaque règle de production est composée d'un prédécesseur et d'un successeur qui représentent respectivement la chaîne à remplacer et la chaîne de remplacement.

- ω est l'axiome, ou mot de départ, représentant la structure initiale.

Une chaîne est alors une suite de caractères de l'alphabet représentant une structure. Des informations sur la position des sous-unités entre elles peuvent être ajoutées, par exemple avec l'utilisation de « [» , «] » pour noter une ramification.

Exemple d'application :

Soit le triplet $\{(a,b)(R,P_2)a\}$ dont les règles de production sont :

$$R : a \rightarrow b[+a][-a]ba$$

$$P_2 : b \rightarrow bb$$

La figure 1 montre le résultat obtenu après plusieurs itérations et nous retrouvons des similitudes avec les branches d'un arbre réel. Des règles relativement simples peuvent ainsi produire des structures proches de celles rencontrées chez les végétaux.

Différentes extensions de ce formalisme de base ont par la suite été proposées de manière à rendre compte des différents processus du développement. Une première extension a consisté à associer des paramètres aux symboles afin de caractériser l'état des sous-unités et leur fonctionnement. Une autre extension a quant à elle utilisé des processus stochastiques afin d'engendrer une certaine variabilité des plantes produites en associant à chaque règle de production une probabilité de déclenchement [3]. Il existe aussi des L-systèmes qui permettent de tenir compte des interactions de la plante avec l'environnement au cours de son développement. Ainsi, les L-systèmes ouverts [4] ne considèrent plus l'environnement comme une simple fonction mais comme un processus actif qui peut réagir aux informations de la plante.

1.1.2 Graphes entité-relation

Ce modèle a été développé au CIRAD dans le cadre de l'AMAP (Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes) [1], il concerne plus particulièrement les arbres et est basé sur la description du fonctionnement des bourgeons par des processus stochastiques.

Une plante y est définie par un graphe des entités et un graphe des relations. Dans le premier graphe, la plante est vue comme un ensemble d'entités que l'on peut séparer en axe, unité et entrenœud. Le deuxième graphe quant à lui décrit les relations de succession, de parenté ou d'échelle qui lient les entités entre elles (voir figure 2 et 3).

Cette modélisation demande de nombreuses données botaniques afin de déterminer les états et les probabilités de transitions dans les processus stochastiques à base de chaînes de Markov, mais elle permet de modéliser précisément une grande variété de plantes.

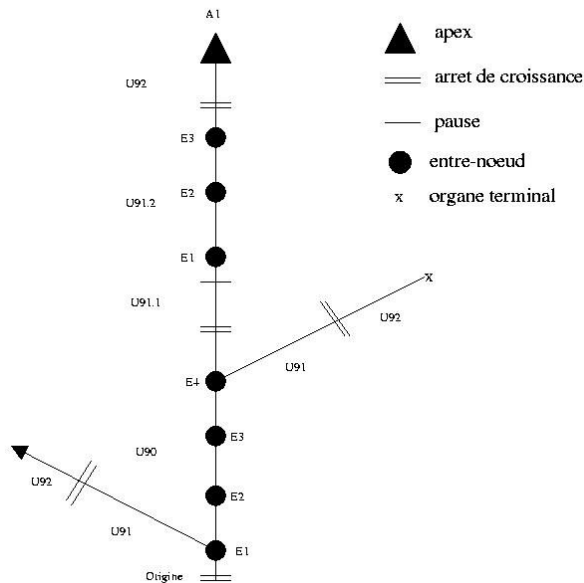


Figure 2 : Graphe des entités

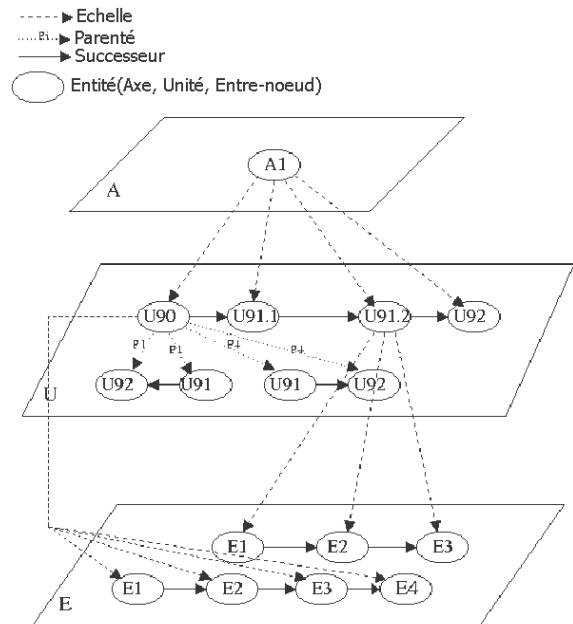


Figure 3 : Graphe des relations

1.2 Modèles de communautés de plantes

La plupart des modèles de communautés de plantes simulent le développement individuel de chaque plante avant d'effectuer des calculs donnant des informations sur la communauté dans son ensemble. Parmi les modèles basés sur l'individu, certains tiennent compte de la place de la plante dans son milieu et d'autres non. Parmi les modèles indépendants des distances, on peut parler du système PROGNOSIS [5]. Ce logiciel est actuellement utilisé pour prédire le développement de forêts et modélise chaque plante grâce à son diamètre, sa taille et sa couronne, un sous modèle s'occupe alors de la mortalité des arbres. Cependant, il ne rend pas compte précisément des mécanismes de coopération et de compétition qui existent entre individus puisqu'il ignore leurs coordonnées. Les modèles dépendants des distances quant à eux ont l'avantage de pouvoir simuler la compétition ou la coopération entre les individus, que ce soit pour l'espace, la lumière ou les ressources de façon générale. Ils sont donc particulièrement intéressants dans le domaine de la recherche.

Nous trouvons également des modèles de communautés qui se passent tout à fait des modèles individuels. On notera par exemple le modèle Whole stand (évoqué dans [5]) où la croissance et le développement d'une communauté de plantes sont vus comme un tout. Utile pour décrire l'évolution d'une plantation, ce modèle trouve vite ses limites dès qu'il s'agit de représenter plusieurs espèces différentes. De plus, il ne peut fournir aucun détail sur un individu particulier de la communauté.

1.3 Discussion

L'outil informatique associé à des modèles de développement de plantes et de communautés de plantes a suscité un certain intérêt, ceci pour la simple raison qu'il permet d'effectuer des simulations rapides concernant des processus qui dans la nature mettent des mois ou des années à se réaliser. Il autorise donc la réalisation de prévisions et d'aide à la décision dans la gestion de communautés de plantes. Il permet également de vérifier la validité du modèle.

La plupart des modèles de communautés de plantes et leur implémentation ont été conçus dans un objectif d'aménagement du territoire ou de gestion des ressources car les communautés de plantes

sont des ressources largement exploitées dans notre société. Pour ce genre de réalisation, ce sont les modèles indépendants des distances qui sont le plus fréquemment utilisés [5].

Les modèles dépendants des distances sont, quant à eux, surtout utilisés dans le domaine agricole pour observer le niveau de développement qu'atteignent les individus dans une plantation. Ce type de modèle demande néanmoins des connaissances approfondies sur le processus de fonctionnement de la plante et fait appel à des techniques complexes pour les implémenter. Ainsi le modèle de plante individuelle représente peut être très bien l'architecture d'une plante réelle [3], mais de part sa complexité, son utilisation augmente considérablement les temps de calcul dans le cadre de simulation de communautés de plantes.

Actuellement, l'acquisition de données de plus en plus importantes au niveau biologique et géographique dans ce domaine semble favoriser l'utilisation de systèmes multi-agents.

Chapitre 2 Agents et Systèmes Multi-Agents

Les systèmes multi-agents forment un vaste domaine qu'il est difficile d'analyser exhaustivement. Nous présentons dans ce chapitre les fonctionnalités importantes des systèmes multi-agents utilisées par la suite dans notre modèle. Les notions d'agents et systèmes multi-agents vont d'abord être introduits, puis les différents types d'agents existants. Nous exposerons ensuite les concepts de base que sont les organisations et les interactions avant de terminer par les modes de communications.

2.1 Définitions

2.1.1 Les Agents

Le concept agent a été l'objet d'études dans différentes disciplines depuis le début des années 70, pourtant aucun consensus n'existe sur sa définition. On trouve ainsi une multitude de définitions qui se ressemblent toutes mais diffèrent selon le type d'application pour lequel est conçu l'agent. L'une des premières définitions et certainement la plus complète vient de Ferber [6] :

« Un agent est une entité physique ou virtuelle

- Qui est capable d'agir dans un environnement,
- Qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- Qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voir de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- Qui possède des ressources propres,
- Qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
- Qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- Qui possède des compétences et offre des services,
- Qui peut éventuellement se reproduire,
- Dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit. »

Bien que chacun des termes soit important, nous pouvons retenir de cette définition qu'un agent est une entité à laquelle est attribuée un certain objectif qu'il est capable d'accomplir de manière autonome et en coopération avec d'autres agents. Il est d'ailleurs rare qu'un agent soit seul dans un environnement.

2.1.2 Systèmes Multi-Agents

L'approche multi-agents est au carrefour entre l'Intelligence Artificielle Distribuée et la Vie Artificielle. Ainsi, avant les années 1980, la recherche en Intelligence Artificielle s'est plutôt concentrée sur les diverses composantes d'un agent. Cependant, un agent en tant qu'entité individuelle est d'un usage limité dans bien des cas. Les applications distribuées actuelles sont composées d'un ensemble d'agents qui mettent en commun leurs compétences et connaissances. Ceux-ci forment alors des systèmes multi-agents où les agents interagissent entre eux selon des modes de coopération, de concurrence ou de coexistence. Pour Ferber, un système multi-agents est :

« Un système composé des éléments suivants :

- Un environnement E , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers $A \subset O$, lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relation R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O .
- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers. »

Ainsi, un système multi-agents peut être vu comme un ensemble d'entités actives, appelées agents, interagissant dans un même environnement.

2.2 Les différentes approches

Le concept agent a été utilisé dans différentes disciplines, que ce soit dans le domaine de l'intelligence artificielle, mais aussi dans des disciplines comme la psychologie [7]. Deux grandes écoles se sont alors formées en fonction de l'approche utilisée lors de l'utilisation de systèmes multi-agents. La première voit les systèmes multi-agents comme un ensemble d'agents cognitifs et la deuxième comme un ensemble d'agents réactifs. Leur distinction se fera essentiellement sur la capacité d'anticipation des événements futurs.

2.2.1 L'approche cognitive

L'approche cognitive provient en partie des travaux sur l'intelligence artificielle classique qui s'est concentrée très tôt sur l'expression du comportement délibératif d'un agent en fonction de ses croyances et de ses buts [7]. Elle trouve son origine dans la volonté de faire coopérer et communiquer des systèmes experts classiques [6]. Les systèmes multi-agents y sont vus comme une composition d'un petit nombre d'agents « intelligents » et « intentionnels », chacun ayant des buts et des plans explicites leur permettant de les accomplir.

2.2.2 L'approche réactive

L'approche réactive, quant à elle, est basée sur l'émergence de comportements collectifs à partir de comportements individuels relativement simples. Ainsi, l'utilisation d'agents intelligents n'est pas nécessaire à l'obtention d'un comportement global intelligent. La résolution d'un problème peut être effectuée uniquement par des mécanismes de réaction aux événements sans qu'il y ait d'explication des buts à atteindre, ou de planification. Certains systèmes issus des sociétés animales, comme la fourmilière [39], en sont un parfait exemple.

On distingue dans cette approche deux types d'agents, les agents pulsionnels et les agents tropiques [6].

- Un agent est dit pulsionnel lorsqu'il a besoin de satisfaire un besoin interne tel que maintenir son niveau d'énergie.
- Un agent est dit tropique lorsqu'il n'agit qu'en fonction des stimuli provenant de l'environnement.

Cependant, la distinction entre eux peut parfois être difficile car un agent peut être à la fois guidé par des pulsions internes et des stimuli externes.

2.3 Types d'agents

En plus de l'approche choisie lors de l'utilisation des systèmes multi-agents, les agents peuvent être classés suivant plusieurs types. Chaque type confère des propriétés supplémentaires à l'agent qui peuvent lui être indispensables lors de certaines applications. Il existe ainsi des agents communicants que l'on retrouve essentiellement dans les réseaux informatiques, ainsi que des agents situés que l'on retrouve souvent dans des simulations d'écosystèmes.

2.3.1 Agents communicants

Un agent communicant est une entité informatique qui se trouve dans un système ouvert (ensemble d'applications, de réseaux et de système hétérogènes). Il peut communiquer avec d'autres agents et est mû par un ensemble d'objectifs propres. Il ne dispose en général que d'une représentation partielle des autres agents mais possède des compétences et services qu'il peut leur offrir. Son comportement a tendance à satisfaire ses objectifs en tenant compte des ressources et des compétences dont il dispose.

Un agent purement communicant se distingue alors de la notion d'agent en général par le fait qu'il ne possède pas de perception des autres agents et qu'il n'agit pas dans un environnement.

2.3.2 Agents situés

Un agent situé est une entité physique ou informatique qui se trouve situé dans un environnement. Il possède des ressources propres et est mû par une fonction qu'il tente d'optimiser. Il ne possède pratiquement aucune représentation de son environnement et peut éventuellement se reproduire.

Un agent purement situé se distingue alors des autres agents par sa capacité de représentation quasiment nulle et son mode de communication effectué par le biais de perceptions et d'actions dans l'environnement.

2.4 Organisation Multi-Agents

L'organisation est l'un des concepts de base des systèmes multi-agents. Elle peut être définie comme un agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité ou système dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. L'organisation lie de façon interrelationnelle des éléments ou événements ou individus divers qui dès lors deviennent les composants d'un tout [40].

L'intérêt de la notion d'organisation est de pouvoir intégrer à la fois la notion d'agent et celle de système multi-agents. En effet, un agent peut être considéré comme un individu ou un assemblage de composants, tandis qu'un système multi-agents peut être considéré comme une unité ou une composition d'agents. La notion de niveau d'organisation permet ainsi de comprendre l'emboîtement d'un niveau dans l'autre. Une organisation pouvant être vue comme une agrégation d'éléments de niveau inférieur qui sera considérée comme une entité individuelle dans une organisation de niveau supérieur (voir figure 4).

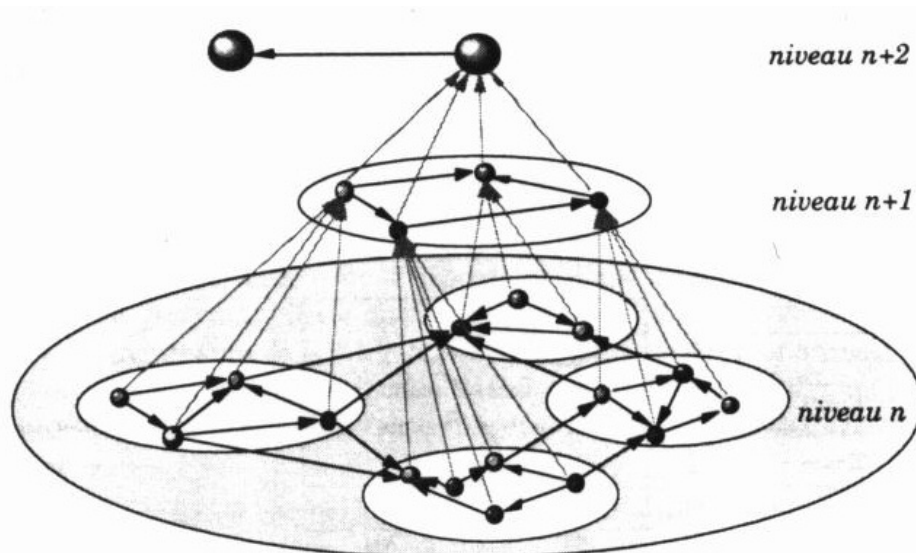


Figure 4 : Représentation des niveaux d'organisation

Ainsi, un agent composé lui-même d'un ensemble d'agents sera considéré à un certain niveau comme une organisation individuelle et, au niveau inférieur, comme une organisation collective. Chaque organisation pouvant être le lieu d'interactions entre agents.

2.5 Interactions entre agents

La notion d'interaction est au centre de la problématique des systèmes multi-agents. Elle est à la base de la constitution des organisations et consiste à mettre en relation dynamiquement plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Chaque agent d'une organisation peut alors être vu comme le nœud d'un ensemble en interaction. Les différentes interactions entre plusieurs agents forment alors des situations d'interaction.

On peut définir une situation d'interaction comme un ensemble de comportements résultant du regroupement d'agents qui doivent agir pour satisfaire leurs objectifs en tenant compte des contraintes provenant des ressources plus ou moins limitées dont ils disposent et de leurs compétences individuelles. Les différentes situations d'interaction pouvant être classées grâce à des paramètres qui les définissent.

2.5.1 Paramètres d'interaction

D'après Ferber [6], les principales situations d'interaction peuvent être classées par rapport à trois critères.

Le premier de ces critères est la concordance des objectifs. Ainsi, si la satisfaction de l'objectif d'un agent entraîne l'insatisfaction d'un autre, leur but sera considéré comme incompatible.

Le deuxième de ces critères est leurs relations aux ressources. Plusieurs agents peuvent très bien coexister dans un même environnement sans avoir besoin de partager une même ressource. Mais dès qu'un élément est convoité par plusieurs agents et qu'il ne se trouve pas en quantité suffisante pour satisfaire tous ceux qui le demande, un conflit d'accès aux ressources se forme.

Enfin, le troisième des critères concerne la capacité des agents à accomplir leur tâche. Un agent n'a pas toujours la possibilité de parvenir à son but seul, celui-ci nécessite l'action coordonnée de plusieurs d'entre eux.

À partir de ces trois composantes d'interaction que sont la nature des buts, l'accès aux ressources et les compétences des agents, il va être possible d'effectuer une typologie des situations d'interactions courantes.

2.5.2 Types d'interaction

La figure 5 montre les différentes situations d'interaction en fonction des paramètres décrits précédemment.

Buts	Ressources	Compétences	Types de situation	Catégorie
Compatible	Suffisantes	Suffisantes	Indépendance	Indifférence
Compatible	Suffisantes	Insuffisantes	Collaboration simple	Coopération
Compatible	Insuffisantes	Suffisantes	Encombrement	
Compatible	Insuffisantes	Insuffisantes	Collaboration coordonnée	
Incompatible	Suffisantes	Suffisantes	Compétition individuelle pure	Antagonisme
Incompatible	Suffisantes	Insuffisantes	Compétition collective pure	
Incompatible	Insuffisantes	Suffisantes	Conflits individuels pour des ressources	
Incompatible	Insuffisantes	Insuffisantes	Conflits collectifs pour des ressources	

Figure 5 : Tableau des situations d'interaction

Ces différents types d'interaction peuvent être regroupés en trois grandes catégories.

La première d'entre elles est l'indifférence, il s'agit d'une situation neutre d'indépendance ou l'aspect multi-agents se résume à une simple juxtaposition des actions des agents pris indépendamment.

La deuxième catégorie de coopération regroupe les situations de collaboration, les différents agents ayant besoin de communiquer pour accomplir leur tâche. C'est cette catégorie qui nous intéresse le plus dans le cadre de ce travail sur la coopération inter-espèces.

Enfin la troisième catégorie d'antagonisme regroupe les situations de compétition et de conflit, le but des différents agents étant alors incompatible.

2.6 Communications

La communication est à la base des interactions car c'est grâce à la communication que les agents peuvent coopérer. Il existe de nombreuses théories de la communication mais elles reposent essentiellement sur des variantes issues des recherches en télécommunications des années 40 développées par Shannon et Weaver [41].

On distinguera dans un système multi-agents la communication entre agents qui a pour but de provoquer un comportement spécifique, et les interactions avec l'environnement qui modifient l'état global du monde (voir figure 6). L'environnement étant alors généralement une simple structure de données dynamiques et centralisées contenant les objets partagés par les agents.

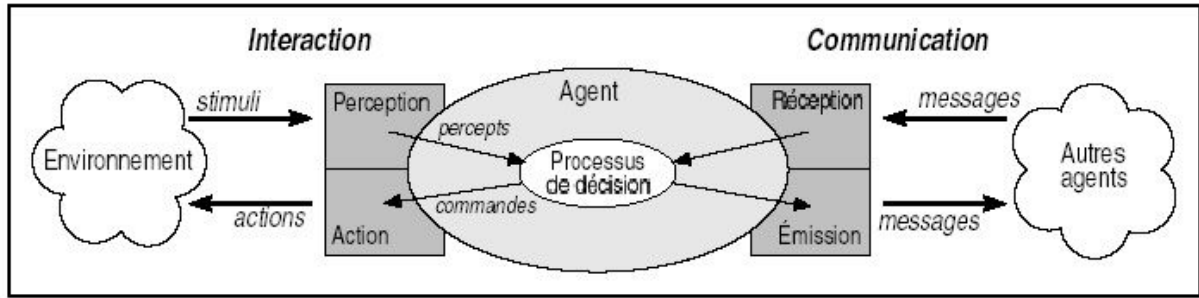


Figure 6 : Distinction entre interaction avec l'environnement et communication entre agents

Afin d'échanger des messages entre deux agents, plusieurs types de communication existent. Ces différents types dépendant essentiellement du mode de diffusion et des moyens d'acheminement. On distingue ainsi deux modes de diffusion :

- Le premier est la diffusion générale dans lequel un message est envoyé à tout un ensemble d'agents qui sont généralement dans un voisinage de l'émetteur,
- Le deuxième est un mode point à point où le destinataire est spécifié et est le seul à recevoir le message.

Les moyens d'acheminement quant à eux définissent la manière dont circule le message. On distingue, l'acheminement direct où un canal de communication est créé entre l'émetteur et le récepteur, l'acheminement par tableau d'affichage où le message est ajouté afin d'être consulté par les autres entités, et la propagation où le message est envoyé dans l'environnement en s'atténuant éventuellement en fonction de la distance à la source.

À partir de là, plusieurs combinaisons sont possibles représentant les différents types de communications. Un message diffusé peut ainsi être envoyé par acheminement direct, dans ce cas il sera envoyé à tous ses destinataires par un canal de communication distinct, ou par propagation en libérant des objets qui se déplacent dans l'environnement.

Chapitre 3 Modèle utilisé sur la plate-forme

Bien qu'il existe déjà des modèles de plantes reconnus, ceux-ci ne permettent généralement pas la mise en place de phénomènes de communication entre les différentes entités hétérogènes. Un nouveau modèle a ainsi été conçu par Fack J. et Gallet G.[8] avec pour principal objectif de maximiser les possibilités d'interactions entre les plantes, de manière à pouvoir observer le maximum de coopérations et de compétitions possibles lors des simulations.

De façon à pouvoir simuler de nombreux individus avec de fortes interactions entre eux sans pour autant rendre les temps de calculs prohibitifs, un compromis a dû être trouvé entre précision et simplicité. L'utilisation d'une méthodologie multi-agents a été retenue.

3.1 Modélisation agent

La méthodologie multi-agents a été choisie car elle permet de susciter l'émergence d'un comportement adaptatif par coopération ou concurrence entre un ensemble d'entités dont nous pouvons calibrer précisément les propriétés. Dans le but d'observer des phénomènes de conquête et partage de territoire, le modèle a été développé de manière à être basé sur les individus et dépendant des distances. Ainsi, le système multi-agents est composé d'un environnement, représenté par un agent, qui est lui-même composé d'agents plantes situés dans cet environnement. Les plantes ne disposant pas de capacités d'anticipation des événements futurs et leurs actions provenant essentiellement de pulsions internes et de stimuli externes, le modèle utilisé se trouve dans le cadre d'une approche réactive des systèmes multi-agents.

3.2 L'environnement

L'environnement est représenté par un agent qui est composé du sol, du ciel et de tous les agents plantes du système (voir figure 7). Il gère toutes les fonctionnalités qui demandent des interactions entre plantes et les synchronise en fonction des époques.

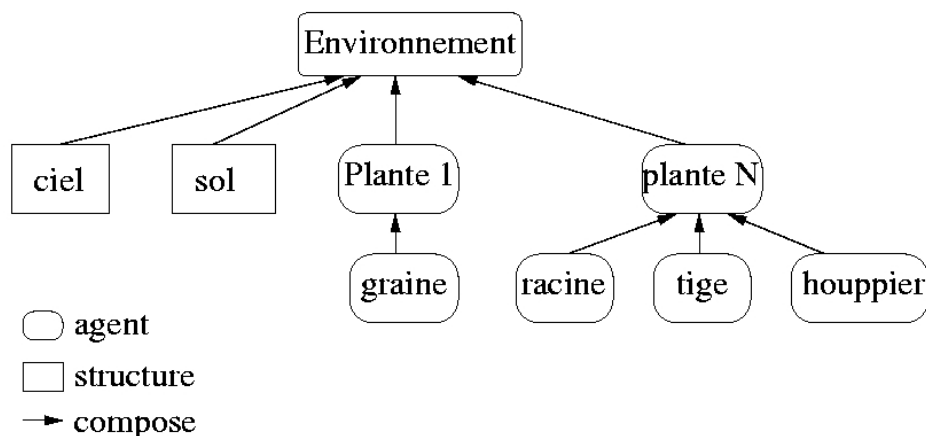


Figure 7 : Architecture de l'environnement

3.2.1 Le sol

Le sol est composé de deux couches différentes. La première, la couche de surface, correspond à l'humus du sol naturel où a lieu la décomposition des plantes mortes et la sécrétion des substances chimiques de la plante. La deuxième, représente la partie souterraine du sol qui est le lieu du renouvellement et de la diffusion des minéraux. Dans notre modèle, le sol est discrétisé en voxels de forme cubique.

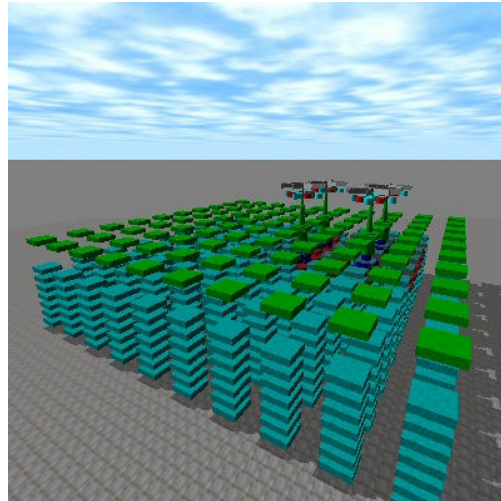


Figure 8 : Représentation du sol discrétisé en voxels

3.2.2 Le ciel

Le ciel permet de gérer la fonctionnalité de photosynthèse en gardant en mémoire la liste des coordonnées des points des plantes qui se projettent sur une hypothétique surface plane située en altitude. Une approximation de la quantité de lumière reçue est effectuée par la plante afin d'en déterminer la quantité de carbone produite (voir figure 9). Pour simuler la variation au cours de la journée de la direction des rayons du soleil, la projection est effectuée suivant trois directions différentes à chaque pas de temps.

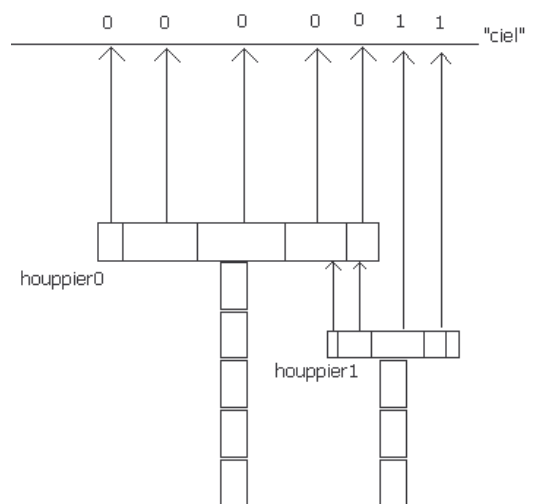


Figure 9 : Calcul de la photosynthèse

3.3 Modèle individuel de la plante

Dans ce genre de simulation, qui tient compte avec un haut niveau de précision de l'architecture de la plante et de ses phénomènes internes, les systèmes multi-agents sont encore peu utilisés. Le travail de Sikora S., Steinberg D. et Lattaud C. sur l'intégration d'un système de développement de plantes dans un monde virtuel [9-10] a cependant montré que la distribution des tâches entre différents agents pouvait permettre d'obtenir des réponses cohérentes des plantes à leur environnement et faciliter l'écriture des paramètres de réglage de leur développement.

Dans ce modèle, la méthodologie multi-agents est utilisée afin de modéliser l'ensemble des diverses espèces de plantes, mais aussi les plantes elles-mêmes découpées en organes élémentaires regroupés dans des organisations. Ainsi à un certain niveau les plantes sont considérées comme des agents individuels alors qu'à un niveau inférieur, on les voit comme une organisation d'agents organes qui communiquent en mode point à point par acheminement direct pour leur survie (voir figure 10).

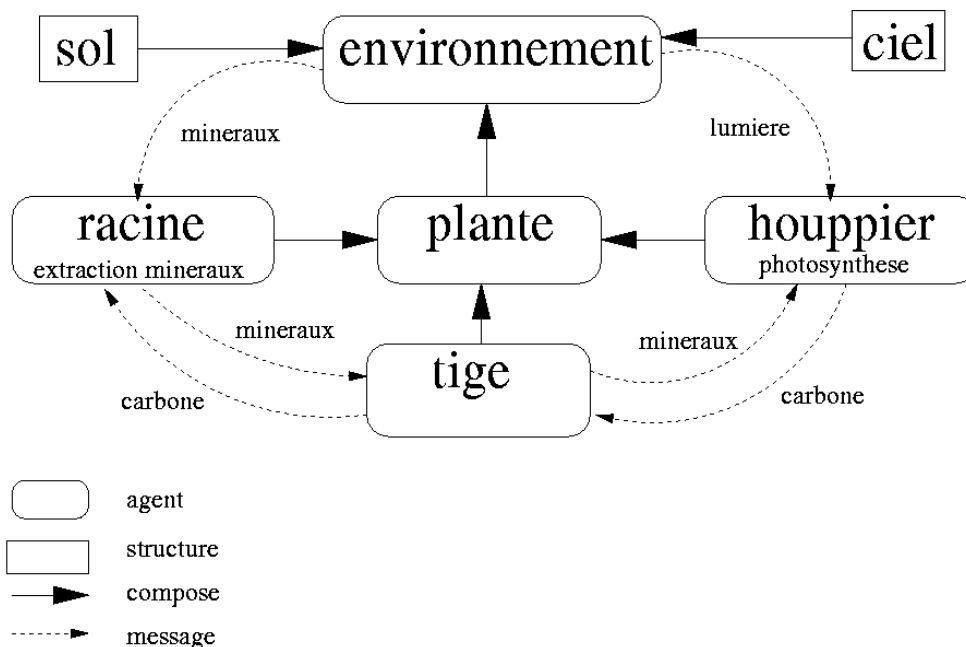


Figure 10 : Interactions entre agents dans l'environnement

Chaque organe est un agent qui a un rôle précis ce qui permet d'isoler les sources de compétition. La spécialisation de chacun d'entre eux les rend fortement dépendants les uns des autres pour survivre. La déficience d'un seul organe a donc pour conséquence naturelle la mort en quelques pas de temps de toute son organisation.

3.3.1 Modèle génétique

Dans notre modèle, chaque agent organe dispose de paramètres qui déterminent une grande partie de ses attributs et conditionnent son développement. C'est la modification de ces paramètres qui permet de modéliser des espèces différentes. Nous pouvons donc les assimiler au code génétique de la plante.

Cependant, contrairement au code génétique d'un organisme vivant, les attributs des agents de notre modèle sont définis au début d'une simulation et n'évoluent pas pendant son exécution. Ainsi,

chaque plante d'une même espèce peut être considérée comme un clone d'une autre. Néanmoins, l'utilisation d'un code génétique évolutif pourrait être utilisé sur la plate-forme par la suite.

Des exemples de paramètres génétiques sont présents dans les tableaux des annexes B-5 et B-6.

3.3.2 Les différents organes

Les organes possibles sont : graine, racine, tige et houppier. Chacun d'eux est modélisé par un agent, ils ont des possibilités différentes de perception et d'action sur l'environnement mais partagent un certain nombre de points communs. Ainsi, chaque organe compte une réserve de carbone et une réserve de minéraux proportionnelles à son volume, ils peuvent communiquer avec la plante, leur comportement dépend des interactions avec leur environnement et leur génotype, ils évoluent à chaque pas de temps suivant le même cycle de fonctionnement (voir figure 11).

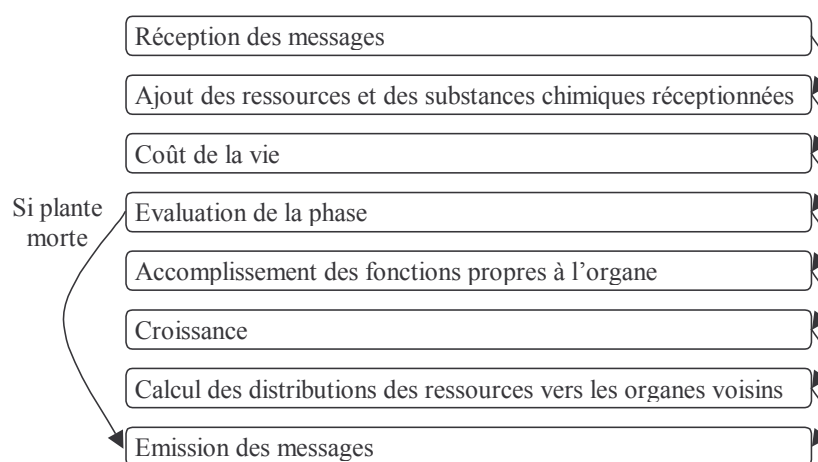


Figure 11 : Cycle de fonctionnement d'un agent organe

3.3.2.1 La graine

Avant de pouvoir se développer, une plante passe par une phase de graine pendant laquelle elle reste inactive jusqu'à ce que les conditions environnementales soient satisfaisantes pour passer à la phase suivante du cycle de sa vie. La détermination du meilleur moment pour déclencher la germination est d'ailleurs la seule fonction de la graine.

La graine dispose comme les autres organes d'une réserve en ressources, mais cette réserve ne lui sert pas directement puisque qu'elle ne consomme rien pour survivre. Par contre, ses ressources vont lui permettre de croître lorsqu'elle commencera à pousser.

3.3.2.2 Les Racines

Dans le modèle, l'organe racine joue le rôle de l'ensemble du réseau racinaire d'une véritable plante. Il est le seul organe à interagir directement avec le sol et l'ensemble des ressources et des substances chimiques qui s'y trouvent. La racine est composée d'un réseau racinaire et d'un axe qui va permettre d'étendre le réseau à une profondeur qui est fonction de son espèce. Le réseau modélisé correspond à la partie dense des racines qui ne peuvent pas cohabiter avec les racines des plantes voisines. La partie visible sur la plate-forme ne représentant qu'une moyenne des racines totales.

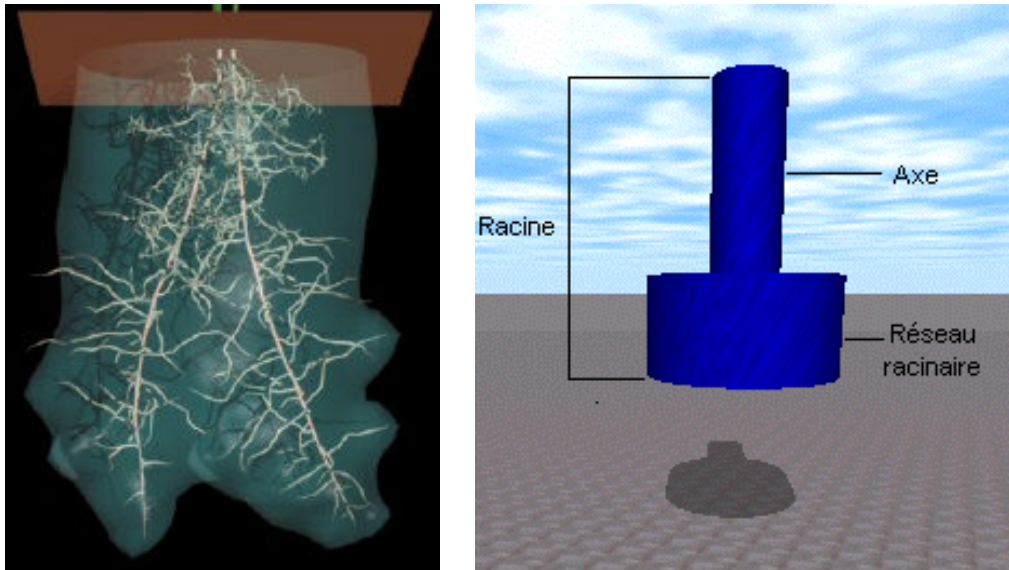


Figure 12 : Comparaison du modèle de notre réseau racinaire à droite avec une représentation 3D réaliste à gauche.

3.3.2.3 La tige

L'organe tige représente la tige de la plante. Son rôle est principalement d'assurer le transport des ressources entre la racine et le houppier. Dans le modèle, elle est unique et ne possède pas de ramification afin de maintenir une simplicité de structure qui participe à la vitesse d'exécution de nos simulations informatiques. Elle est représentée par une superposition de cylindres qui peuvent être plus ou moins épais retranscrivant ainsi la pousse en hauteur d'une plante. De plus, afin de se développer en s'exposant le plus possible à la lumière, à chaque génération d'un nouvel anneau, celui-ci est décalé suivant une direction préférentielle qui lui est communiquée par le houppier. Ceci permet de modéliser la courbure naturelle que prend une plante pour optimiser son ensoleillement (voir figure 13).

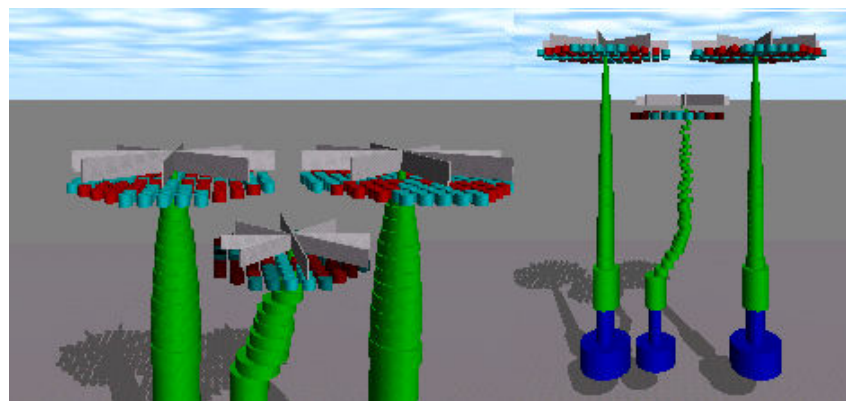


Figure 13 : Tige d'une plante se courbant pour optimiser son ensoleillement

3.3.2.4 Le houppier

Le houppier joue le rôle de l'ensemble des feuilles et des fleurs d'un herbacé. Il assume donc les fonctions de photosynthèse et de reproduction. Il se situe dans le modèle au sommet de la tige des plantes afin d'accentuer l'effet de la compétition pour la lumière. Dans le but de traduire la pousse

irrégulière des branches suivant un gradient de lumière et de gêne physique, la couronne est divisée en huit portions qui peuvent croître indépendamment (voir figure 14). Le houppier peut ainsi être vu dans le modèle comme une organisation de huit branches.

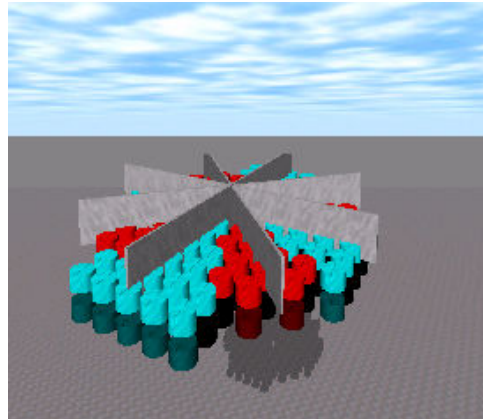


Figure 14 : Houppier dont les branches poussent à différentes vitesses

3.3.3 Les phases de la vie d'une plante

Afin de réguler la structure multi-agents de la plante, son rythme de reproduction et son espérance de vie, sa vie a été divisée en plusieurs phases qui sont la graine, la croissance, la maturité sexuelle et la mort. La figure 15 nous montre les différentes étapes prises par une plante classique dans un cas de développement optimal.

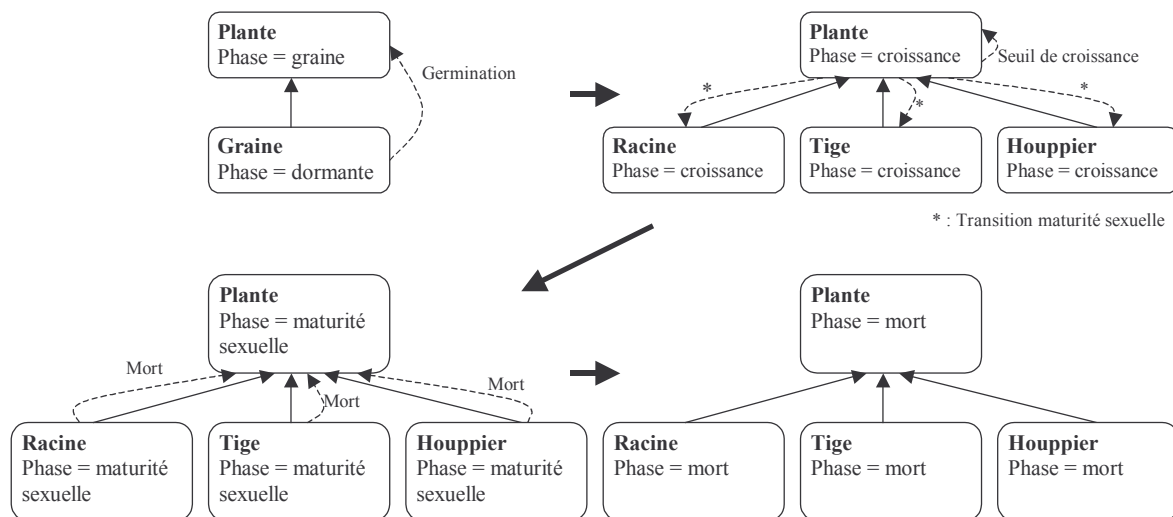


Figure 15 : Phases de la vie d'une plante

3.4 Limites du modèle

La validation de ce modèle a été effectuée grâce à l'exécution d'expériences et la comparaison de leurs résultats avec ceux observés sur des sites naturels. Ainsi, le modèle compétitif a été validé par la modélisation de la compétition entre le chêne et le hêtre pour l'exploitation de la lumière [11-38], tandis que le modèle coopératif a été validé par la modélisation de la succession cyclique d'une population d'épicéas, de hêtres et de sapins grâce à la sécrétion de substances chimiques [38] (p65).

Cependant, ce modèle ne permet de montrer qu'une partie seulement des interactions qui peuvent exister dans la nature. Par exemple, le système coopératif entre plantes du modèle se restreint à la limitation ou l'autorisation de certaines actions par des substances chimiques. Il existe bien d'autres types d'interactions dans la nature comme la coopération pour l'assimilation des ressources. Des modèles biologiques d'interactions sont donc présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 Les interactions chez les plantes

4.1 Types d'interactions

4.1.1 Présentation des associations

Le monde vivant actuel nous donne une magnifique illustration de toute une panoplie d'associations entre espèces : depuis les espèces qui ne peuvent plus vivre les unes sans les autres jusqu'aux espèces qui vivent les unes aux dépens des autres. Le tableau de la figure 16 présente les cas les plus courants d'associations du vivant.

La colonne « Relation » représente le type d'action qu'exerce respectivement un individu sur l'autre, ces actions peuvent être positives « + », négatives « - » ou indifférentes « ϕ ».

Associations	Relation		Présentation	Exemples
Compétition	-	-	Relation négative entre espèces qui témoigne d'une incompatibilité biologique. Origine de la sélection naturelle.	Chêne/Hêtre
Prédation Parasitisme	-	+	Relation où une des entités vit aux dépens de sa proie ou de son hôte.	Gui/Chêne
Amensalisme Antibiose	-	ϕ	Un espèce empêche une autre de se développer, le plus souvent par sécrétion de substances chimiques.	Allélopathie
Commensalisme	+	ϕ	Le commensalisme fonctionne à sens unique et l'espèce qui le pratique ne nuit pas à celle dont elle profite.	Orchidées/Broméliacées
Mutualisme Symbiose	+	+	Des espèces en symbiose tirent avantage réciproquement à vivre ensemble. Les exemples de telles associations sont nombreux dans la nature.	Mycorhizes Lichens

Figure 16 : Associations du vivant

4.1.2 Communauté de plantes

D'après Cléments et al.(1926) & Allee et al.(1949) une communauté est une combinaison d'interactions positives et négatives entre plusieurs espèces. Une des interactions les plus étudiées jusqu'à maintenant est la compétition. L'idée générale remonte à Darwin qui parlait de « survie du plus apte ». En effet, les différentes espèces consomment des ressources, ce qui réduit par conséquent celles disponibles aux autres. Les espèces assimilant le mieux les ressources prennent alors l'avantage.

Afin de mieux comprendre l'évolution de la compétition entre espèces, il est important de définir la notion de niche. Une niche est un endroit où une espèce est capable de maintenir une population viable. Dans une zone donnée, plusieurs espèces en compétition peuvent alors coexister à condition de disposer chacune d'une niche.

Il y aura exclusion, c'est-à-dire disparition d'une espèce à cause de la présence d'une autre dans l'environnement, uniquement si l'une d'elles est capable de s'imposer dans la niche de l'autre. Pour autant, les différentes niches d'une zone donnée peuvent très bien fluctuer dans le temps en fonction de la saison ou du cycle de renouvellement des nutriments.

Alors que les recherches sur la compétition se sont surtout portées jusqu'à présent sur des environnements très favorables au développement, les recherches sur les aspects positifs que peuvent apporter une communauté de plantes à une autre se sont surtout orientées vers des environnements assez rudes. On notera par exemple le syndrome de la plante nurse. Dans des lieux difficiles où les ressources sont en quantité limitée, des plantes matures peuvent aider des plantes plus jeunes pendant les premières phases de leur croissance [12].

Ce syndrome apparaît souvent lors de la conquête de nouveaux territoires. Des plantes étant capables de se développer dans des conditions extrêmes commencent par coloniser ces nouvelles terres et améliorent progressivement l'environnement en apportant des nutriments. D'autres plantes pourront alors s'y installer grâce à l'action des premières. Ensuite l'environnement rentre dans une phase de compétition pour les ressources où les plantes conquérantes perdent leur avantage et disparaissent progressivement.

Les interactions de compétition et de coopération existent à différents niveaux dans les écosystèmes. Mais s'il est simple d'étudier ces interactions séparément, il est beaucoup plus délicat de les réunir dans un même modèle. L'allélopathie étant un exemple d'interaction qui peut tout aussi bien être positive ou négative.

4.2 Interactions coopératives

4.2.1 L'allélopathie

Beaucoup de plantes produisent des substances chimiques libérées dans l'environnement qui ont des influences sur les autres plantes et les animaux. Ces substances appelées substances allélopathiques ont souvent des effets inhibitifs ou contributifs sur la germination des graines et la croissance des plantes [13].

Ainsi, les substances allélopathiques peuvent agir de différentes manières et à différents niveaux sur la plante, que ce soit sur la capacité d'assimiler, de transporter ou de modifier certaines substances, mais aussi pour la protection contre certaines maladies transportées par la terre [14] ou la régulation de germination entre graines après un incendie [15]. Pour autant, quelle que soit l'action de la substance chimique dans l'écosystème, elle peut être considérée comme une inhibition ou une affectation positive au niveau de l'organe. En effet, que la racine d'une plante ne puisse plus transporter ses ressources ou ne puisse plus les assimiler, cela revient au final à une mort programmée au niveau de l'organisation de la racine.

Notre plate-forme gère déjà ces fonctionnalités, tous les organes d'une plante ont la possibilité de sécréter des substances allélopathiques qui sont déposées sur la couche de surface puis diffusées dans les couches souterraines avant d'être assimilées par les autres plantes. On parle alors de communication diffusée par propagation. Plusieurs comportements sont alors possibles pour la plante réceptrice et définis dans son génotype : dormance, mort, réduction des échanges entre organes, sécrétion réponse à une sécrétion stimuli, etc.

4.2.2 Le mutualisme

Les relations de mutualisme sont très communes dans la nature. On peut prendre les exemples de pollinisation des fleurs par des insectes, des bactéries qui aident à la digestion ou encore des champignons échangeant des ressources avec des plantes. Ces relations bénéficient ainsi aux deux entités qui rentrent alors en symbiose [34]. On peut cependant séparer le mutualisme en deux catégories. La première est un mutualisme facultatif où les différents individus peuvent se développer séparément. Dans ce cas, l'aide se situe surtout au niveau de la croissance. La deuxième est un

mutualisme obligatoire où l'absence d'un des deux individus dans un écosystème entraîne la mort de l'autre. On retrouve ainsi respectivement les types d'interaction des systèmes multi-agents en coopération simple et coopération coordonnée.

Parmi les relations de mutualisme facultatif, on trouve la mycorhize ou association entre un champignon et la racine d'une plante. Cette relation qui à la base est un parasitisme bénéficie en fait aux deux individus. Cette relation est décrite plus en détail par la suite.

Parmi les relations de mutualisme obligatoire, la symbiose devient une nécessité pour la survie des différentes espèces. Par exemple la relation entre le Yucca et le papillon Yucca. La plante est complètement dépendante des papillons pour sa reproduction tandis que les papillons utilisent les Yucca pour pondre.

4.3 Parasitisme fongique

Un parasite est un organisme qui détourne une partie des ressources de son hôte à son profit. Dans le cas du parasitisme fongique, le champignon, pour se nourrir, infecte une plante et provoque une décomposition physique de celle-ci.

Afin de développer une infection fongique sur une plante, le champignon doit passer par plusieurs étapes. En un premier temps, il doit adhérer à la surface de l'hôte en produisant par exemple des enzymes extracellulaires. Puis, après germination, le champignon pénètre à l'intérieur de l'hôte par action mécanique ou digestion enzymatique. Ensuite, il ne reste plus au champignon qu'à coloniser les tissus en produisant des toxines.

La plupart du temps, ces relations sont néfastes pour la plante, mais dans certains cas de parasitisme contrôlé, le champignon rentre en symbiose avec son hôte. La relation est alors appelée mycorhize [25-26].

Le terme mycorhize provient du grec mukês : champignon et rhiza : racine. Des échanges entre les deux entités se produisent, rendant l'interaction bénéfique aux deux individus. D'une part la surface de contact de la plante avec le sol est augmentée grâce au réseau racinaire du champignon, lui permettant d'assimiler plus de nutriments. D'autre part, le champignon récupère du carbone provenant de la photosynthèse de la plante (entre 4 et 20% du budget total de celle-ci).

Il est à noter que 80% des espèces de plantes ont une sorte de relation mycorhizienne [34]. Quatre types de mycorhize existent dans la nature. Les Éricales mycorhize qui sont communes dans les régions acides où le nitrogène est souvent limité. Les Ectomycorhize surtout reliées à des arbres. Les Arbuscular mycorhize qui s'associent plus avec l'herbe mais aussi la plupart des familles de plantes. Et enfin les Orchid mycorhizes qui sont le plus souvent des associations obligatoires à la survie de la plante.

Ces relations sont donc fondamentales à l'établissement d'un écosystème. Taylor et Osborne ont d'ailleurs avancé l'idée que « Les végétaux supérieurs n'auraient pu conquérir la terre ferme s'ils n'avaient été associés à des champignons mycorhiziens » [37], soulignant ainsi le rôle crucial qu'ont joué, et jouent encore, les mycorhizes dans l'évolution des plantes terrestres.

4.4 Conclusion

L'un des objectifs de ce stage était de finaliser le modèle d'allélopathie utilisé sur la plateforme. Plusieurs possibilités s'offraient à nous afin de rapprocher le modèle de la réalité, cependant elles ne permettaient de mettre en évidence que très peu d'informations supplémentaires intéressantes sur la coopération. En effet, la finalisation du modèle se serait effectuée surtout à un niveau d'organisation inférieure à l'organe, minimisant son intérêt lors d'une simulation.

Ainsi, il nous a semblé plus intéressant au cours de ce travail axé sur l'aspect coopératif inter-espèces, de développer un modèle de coopération plante à plante afin de simuler des relations de parasitisme ou de mycorhize. Cette dernière donne aux plantes de notre modèle des possibilités de coopération pour l'exploitation des ressources. Les relations de mycorhize jouent en effet un rôle crucial dans la nature.

Chapitre 5 Extension du modèle

5.1 Modifications apportées à l'environnement

L'environnement est l'ensemble des conditions extérieures susceptibles d'agir sur le fonctionnement d'un système. Dans le cas de notre environnement de simulation, il est modélisé par un agent qui contient l'ensemble des structures dynamiques avec lesquelles interagissent les agents plantes. Afin de mettre en évidence les aspects de la coopération, des modifications ont été apportées à la diffusion et aux différents types de ressources présentes dans le sol. De plus, un modèle simple de pluviométrie a été ajouté pour simuler le renouvellement de l'eau.

5.1.1 Le sol

Afin de mettre en évidence des interactions de coopération entre plantes pour l'exploitation des ressources, le nombre de ressources distinctes présentes dans le sol a été augmenté. Le but n'étant pas de modéliser chaque type de minéraux dans le sol mais de donner une plus grande importance aux capacités d'assimilation des différentes plantes et ainsi augmenter l'importance des interactions entre plantes, nous nous sommes contentés de séparer les ressources souterraines en quatre catégories. Ainsi, en plus d'une réserve de minéraux, chaque voxel du sol contient désormais aussi une réserve d'eau, une deuxième réserve de minéraux provenant de composants végétaux et une de carbone. Une explication plus détaillée des caractéristiques de chacune d'elles se trouve ci-après.

5.1.1.1 Azote, Phosphore et Potassium

Ce sont des macro-nutriments indispensables en grande quantité pour la survie et la croissance de la plante. Ils représentent les minéraux se diffusant et se renouvelant dans le sol. Cette ressource est déjà gérée par la plate-forme et aucune modification n'a été nécessaire afin d'en tenir compte. Ils sont assimilables par la plupart des plantes et fournissent la plus grande partie des minéraux nécessaires à la croissance et la reproduction de celles-ci.

5.1.1.2 Minéraux contenus dans les matières organiques non décomposées

Ces minéraux ne sont pas assimilables par la plante dans cet état et doivent être dégradés par un champignon en premier lieu. Ils proviennent en majeure partie de la décomposition d'autres plantes à un ratio de 70% de la quantité en minéraux de la matière structurale de la plante morte. Ce type de ressource se dissipe au cours du temps et compte tenu de sa faible diffusion, se retrouve essentiellement dans les couches les plus élevées du sol.

5.1.1.3 L'eau

L'eau est la ressource qui se diffuse le plus dans le sol, c'est d'elle que dépend la diffusion des autres substances puisque son déplacement dans le sol entraîne les autres éléments avec elle (voir 5.1.3.2 pour plus de détails sur la diffusion). Son renouvellement se fait uniquement grâce aux rosées et pluies dont le modèle utilisé est abordé en 5.1.3.1. Cette ressource est assimilable par toutes les plantes et est nécessaire à la survie de celles-ci. De plus, l'eau est consommée par la plante lors de

la réaction de photosynthèse, une carence en eau de la plante entraîne une réduction de la production de carbone.

5.1.1.4 Le carbone

Tout comme les minéraux contenus dans les matières organiques non décomposées, les ressources en carbone dans le sol proviennent des composants végétaux des plantes mortes et ne sont assimilables qu'après dégradation de celles-ci. Ce type de ressource a tendance à peu se diffuser dans le sol et se dissipe au cours du temps.

5.1.2 Assimilation des ressources et échanges dans la plante

Les modèles d'assimilation et de transfert des nutriments dans la plante n'étant appliqués qu'aux minéraux et carbone, un modèle similaire a dû être défini pour prendre en compte les nouvelles ressources du sol. En effet, les seules autres ressources présentes dans le sol jusqu'alors étaient des substances chimiques utilisées pour l'allélopathie. Ces substances étaient assimilées en permanence par la plante sans tenir compte des besoins de celle-ci ni de sa capacité maximale. Une modélisation similaire à celle utilisée pour l'assimilation des minéraux du sol a été reprise afin de servir pour les autres ressources. Les équations utilisées se trouvent en annexe A.1.

De la même manière, les échanges de ressources dans la plante s'effectuaient en permanence. Nous nous retrouvions alors rapidement avec une quantité de ressources en substance dans la plante très importante dès qu'elles étaient accessibles depuis l'environnement. Chaque organe dispose désormais dans son code génétique d'un seuil de distribution pour chaque substance. Ainsi uniquement les ressources en excès sont transmises. L'équation utilisée se trouve en annexe A.2.

De plus, un sens de circulation des nutriments a été adopté pour se rapprocher du modèle naturel de transport des ressources dans la plante. En effet, auparavant, chaque organe effectuait une demande en nutriments identique à tous ses voisins, réduisant ainsi son impact à chaque organe suivant d'une chaîne. Désormais, les demandes en minéraux s'effectuent de façon privilégiée vers les organes inférieurs tandis que les demandes en carbone s'effectuent vers les organes supérieurs.

5.1.3 Modèle de pluviométrie

Afin de gérer le renouvellement de l'eau, un modèle de pluviométrie a été ajouté à l'environnement. Pour prendre en compte la diffusion privilégiée des minéraux de l'humus vers les couches souterraines lors des averses plutôt que le renouvellement constant du sol, la diffusion des substances est devenue dépendante de l'écoulement de l'eau. La paramétrisation du mode de pluie permet ainsi tout aussi bien d'avoir un renouvellement uniforme qu'un renouvellement peu fréquent au cours des averses.

5.1.3.1 Pluie et Rosée

Le renouvellement de l'eau dans le sol se fait en même temps que celui des autres substances du sol. Il se compose d'un renouvellement faible mais régulier qui a lieu à chaque pas de temps et représente la rosée, ainsi que d'un renouvellement abondant qui se produit moins fréquemment et représentant les pluies. Trois constantes permettent de définir le mode de pluviométrie lors d'une expérience :

- L'abondance d'une rosée : C'est la quantité d'eau apportée par une rosée.
- L'abondance d'une pluie : C'est la quantité d'eau apportée lors d'une pluie.
- La fréquence d'occurrence d'une pluie : Probabilité d'occurrence d'une pluie à chaque pas de temps.

5.1.3.2 Diffusion des substances dans le sol

Dans la nature, l'eau est responsable de la diffusion des minéraux qui sont entraînés en même temps que son écoulement [22-23-24]. L'écoulement de l'eau ayant lieu à chaque fois que la capacité de saturation du sol est atteinte, l'eau se diffusant normalement dans le cas contraire. Pour tenir compte de ces différents effets, le calcul de la diffusion dans le sol s'effectue de la manière suivante :

- La fonction déjà implémentée permet le calcul de la diffusion de l'eau
- Tout eau en surplus dans un voxel donné est aussi diffusée
- Le résultat obtenu est utilisé afin de déterminer un coefficient d'entraînement de l'eau qui permettra de calculer la diffusion des autres ressources
- Le calcul de la diffusion est effectué plusieurs fois par pas de temps pour tenir compte de la vitesse d'écoulement de l'eau par rapport à la croissance de la plante.

Les équations utilisées sont présentées en annexe A.3.

5.2 Ajout de nouveaux types de plantes

Initialement, la plate-forme ne gérait qu'un seul type de plante contenant plusieurs organes. Ces organes interagissent entre eux et sont interdépendants pour la survie de la plante. Alors que les interactions entre agents organes dans le modèle individuel d'une plante s'effectuent en communication par acheminement direct, nous remarquons qu'aucune communication de ce type n'existe dans le modèle au niveau supérieur entre agents plante. En effet, le seul type de communication provient de l'allélopathie qui utilise un mode de diffusion par propagation. Pourtant, lorsque nous regardons les différents types d'interactions dans les systèmes biologiques, nous constatons que les interactions telles que le mutualisme et le parasitisme nécessitent un mode de communication en point à point.

Afin de modéliser des interactions plus complexes entre plantes, de nouveaux types de végétaux ont été modélisés tels que les champignons. Le modèle de plante individuelle a dû être étendu à ces végétaux (voir figure 17). Le choix s'est porté sur ces végétaux car n'ayant pas toujours les compétences pour survivre seuls, ils ont la nécessité de coopérer avec d'autres plantes par exemple en effectuant une symbiose. Ceci nous permet de mettre en évidence d'autres types de communication dans le modèle et ainsi faire ressortir des interactions de coopération pour l'exploitation des ressources.

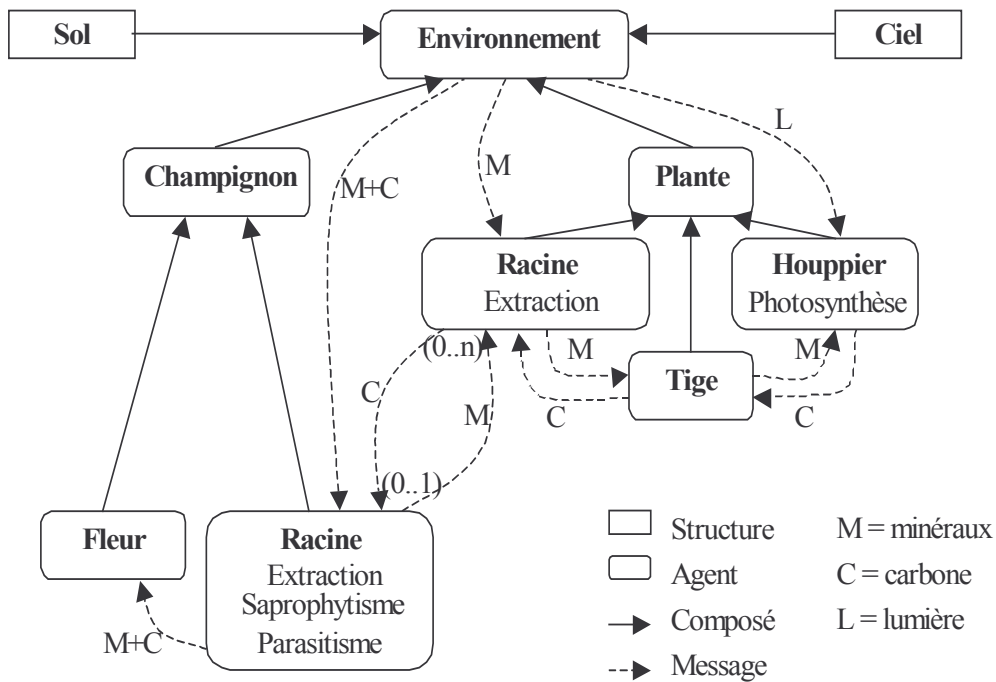


Figure 17 : Modèle agent représentant l'architecture ainsi que les interactions

5.2.1 Modèle du champignon

Le champignon est une plante à part entière mais dont les fonctions ne sont pas les mêmes que les plantes modélisées jusqu'à présent. Les phases de sa vie sont les mêmes que celles de la plante, c'est-à-dire, graine, croissance, maturité sexuelle et mort, mais ses organes sont différents (on retrouve la succession des différentes phases de sa vie dans la figure 18). En effet le champignon est essentiellement composé de racines. Pendant sa phase de croissance, c'est même son seul constituant. Par contre, dès sa maturité sexuelle, une fleur se développe et sort du sol. Cet organe sert de reproducteur au champignon. Leurs fonctions et attributs sont détaillés ci-après.

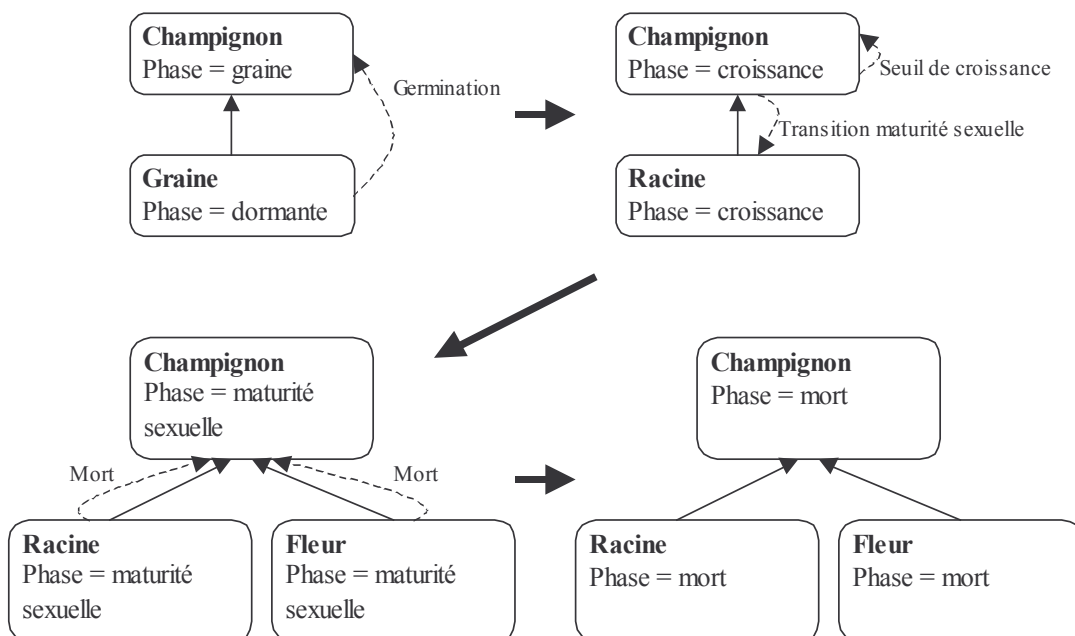


Figure 18 : Phases de la vie d'un champignon

5.2.1.1 Organe fleur

Cet organe appelé carpophore, du grec carpo : fruit et phore : porter, constitue le corps sporifère du champignon supérieur. Il s'agit de la phase visible du champignon, cet organe n'apparaît qu'à la maturité sexuelle et est donc absent pendant la phase de croissance. Il n'aide à aucun moment le champignon à l'exploitation des ressources et se contente de consommer une partie de celles-ci nécessaires au développement de graines pour la reproduction qu'il dispersera autour de lui par la suite.

Ses attributs génétiques concernent surtout la reproduction et sont donc similaires à ceux d'un organe huppier. On y retrouve ainsi le nombre de graines que le champignon peut produire en même temps, la quantité en carbone et en minéraux nécessaires afin de libérer une graine mûre dans l'environnement et la proportion de carbone et de minéraux alloués à la croissance de la graine.

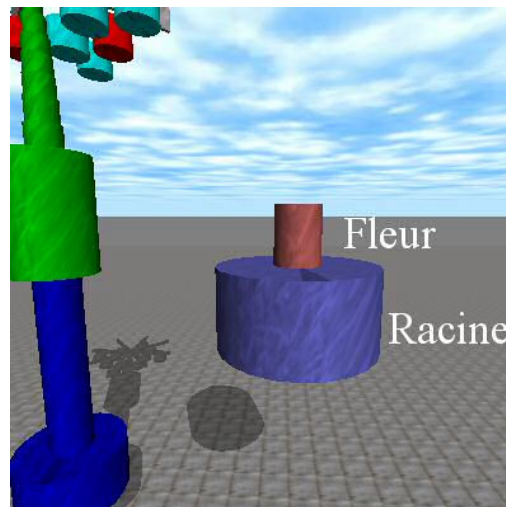


Figure 19 : Représentation graphique du champignon

La représentation graphique dans l'environnement de simulation est la plus simple possible puisque la fleur du champignon n'est composée que d'un cylindre. Ce choix a été effectué car la fleur ne pose que très peu de problèmes de place et n'a pas vraiment d'interaction avec d'autres plantes ou avec l'environnement.

5.2.1.2 Organe racine

Comme les racines d'une plante, le mycélium du champignon s'occupe d'assimiler les ressources contenues dans le sol. Cependant, deux fonctions les distinguent des racines d'une plante. Premièrement, elles sont capables de saprophytisme, c'est-à-dire qu'elles peuvent se nourrir de la décomposition de plantes mortes. Deuxièmement, elles ont la possibilité de parasiter une autre plante et ainsi d'échanger des ressources avec elle. Nous allons voir ces deux particularités plus en détail par la suite.

Les attributs définis dans le code génétique des racines de champignon permettent de déterminer la vitesse de décomposition par saprophytisme. Un coefficient de décomposition est ainsi attribué à l'organe pour le carbone et les minéraux non décomposés.

La modélisation graphique des racines du champignon diffère aussi un peu de celle des racines de plantes. En effet, le champignon ne possède pas de tige et sa strate racinaire se situe surtout sur les couches supérieures du sol. L'axe n'a ainsi pas été pris en compte et un cylindre unique modélisant la

strate racinaire commençant à même le sol suffit à le représenter. Les racines sont alors proches de la zone de décomposition des plantes mortes. De plus, afin de permettre le parasitisme des racines d'une plante, il n'y a pas de recherche de collision effectuée entre les racines des champignons et celles des plantes. Leur strate racinaire étant moins dense que celle d'une plante.

5.2.2 Le saprophytisme

Provient du grec phyte : se nourrit et sapro : pourriture. Il s'agit d'une forme de nutrition permettant à un organe végétal, le plus souvent un champignon comme l'ascomycète filamenteux [25], d'utiliser des matières organiques en décomposition. Le champignon a ainsi la possibilité d'assimiler les ressources provenant de la décomposition des plantes, c'est-à-dire les minéraux provenant de composants végétaux et le carbone contenu dans le sol, contrairement aux autres plantes. Ensuite, il accélère la décomposition des divers restes organiques en transformant une partie de ces ressources en minéraux et carbone utilisables pour son développement. Un coefficient de conversion est défini dans le génotype de la plante. L'équation utilisée pour la décomposition est présentée en annexe A.4.

5.2.3 Le parasitisme

Dans notre modèle, le parasitisme est représenté par un rapprochement des organes racines d'une plante et d'un champignon. Les deux organes peuvent alors s'échanger des ressources comme s'ils appartenaient à la même plante. Ainsi, si un champignon ne parasite pas déjà une plante, une recherche de la plus proche dans un rayon assez restreint est effectuée. Ensuite un canal de communication est ouvert entre eux permettant l'échange de ressources entre les racines. À la mort de l'une des plantes, le canal de communication est alors automatiquement fermé.

Cette phase de recherche de plante à parasiter ainsi que la phase de destruction des canaux de communication à la mort d'une des plantes n'est pas gérée par chaque plante elle-même, mais par l'environnement à la fin d'un pas de temps. Ce choix a été effectué afin de synchroniser le parasitisme entre les plantes. En effet, lorsque cette action était réalisée pendant le cycle de fonctionnement de la plante, des problèmes d'ordre d'exécution avaient lieu. Toutes les plantes n'ayant pas encore calculé leur état suivant.

Chapitre 6 Expériences

6.1 Expérience 1 : Validation du nouveau système de diffusion

6.1.1 Objectif

Dans la nature, l'écoulement de l'eau dans le sol lors des averses entraîne la diffusion des minéraux et aide ainsi au renouvellement du milieu. L'objectif de cette expérience est de valider le nouveau système de diffusion en le comparant à un système réel [22-23-24].

Plusieurs plantes, de type arbre avec une durée de vie relativement longue, sont ainsi modélisées dans un environnement sans renouvellement des ressources. Ces conditions ont été choisies afin de tenir essentiellement compte du déplacement des minéraux dans le sol et non pas de leur renouvellement naturel. Le type de pluie retenu pour cette expérience est une pluie tropicale forte mais peu fréquente pour mieux séparer les périodes humides des périodes de sécheresse. Par ailleurs, les arbres modélisés disposent de racines assez profondes afin de mieux mettre en évidence la diffusion des ressources provenant des strates supérieures.

Dans cette simulation nous vérifions l'écoulement de l'eau lors des pluies et nous mesurons la quantité de minéraux dans chaque strate du sol autour de la plante. Le détail des paramètres de l'expérience est présenté en annexe B.1.

6.1.2 Discussion des résultats obtenus

Lors des premières exécutions de cette expérience, les plantes commencent à pousser normalement jusqu'à épuisement des ressources au niveau des racines. À la première averse, une augmentation de la quantité d'eau dans la couche de surface se produit. On remarque alors que l'eau contenue dans le sol a tendance à stagner plutôt qu'à s'écouler. Ainsi la quantité d'eau dans les couches les plus profondes varie peu par rapport au début de l'expérience, tandis que les couches de surface sont complètement imbibées d'eau.

Afin de privilégier l'écoulement de l'eau, un seuil d'engorgement du sol a été défini comme dans le modèle réel (voir figure 20). Ainsi toute quantité d'eau supérieure à ce seuil est diffusée et ceci même si le voxel voisin contient plus d'eau. Lors des exécutions suivantes de la simulation, l'eau ne stagne plus au niveau des couches de surface mais s'écoule progressivement d'un niveau à l'autre. Cependant, la vitesse de cette diffusion est d'un niveau par pas de temps, c'est-à-dire trop lente puisque la plante a la possibilité de se développer à plusieurs reprises avant que l'eau d'une averse n'arrive à ses racines.

Pour tenir compte de la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol beaucoup plus rapide dans la réalité que la croissance de la plante, le calcul de diffusion est désormais exécuté plusieurs fois en un pas de temps. Ainsi à chaque averse, l'eau s'écoule jusqu'aux couches les plus profondes du sol avant que l'évolution de la plante ne soit calculée.

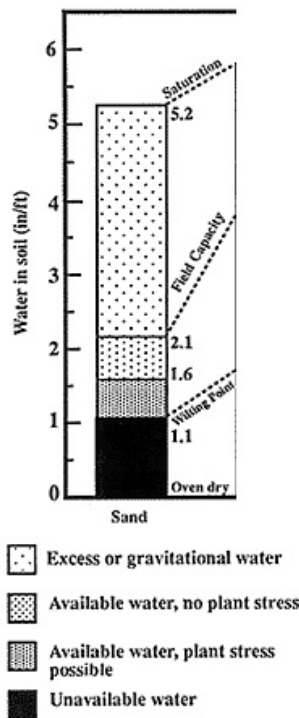


Figure 20 : Diagramme de rétention de l'eau dans un sol réel

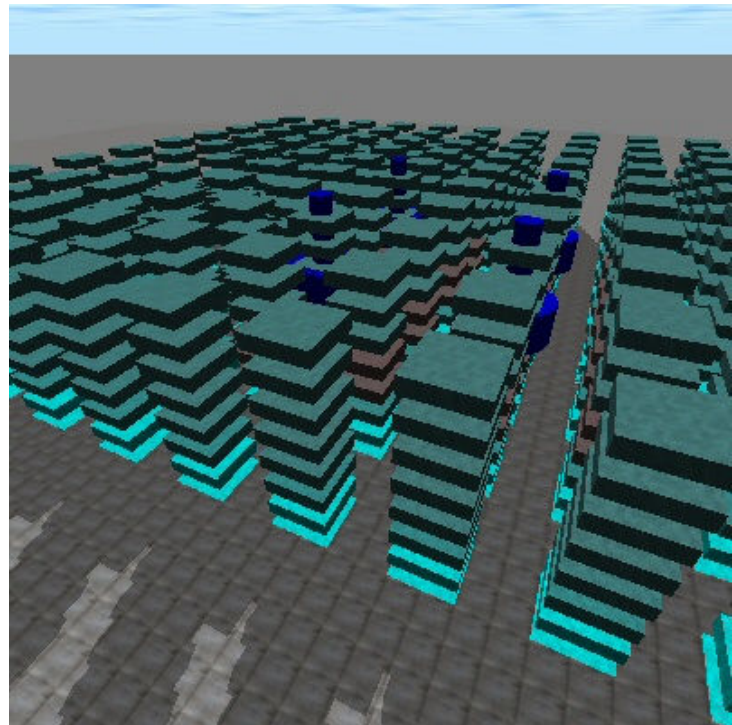


Figure 21 : Rétention de l'eau dans la simulation

(Couleur des voxels variant du rouge pour la sécheresse au bleu clair pour la saturation.)

Une fois vérifié que l'écoulement de l'eau dans la simulation correspond bien à celui observé dans la nature, l'objectif suivant est de constater que sa diffusion entraîne les autres substances du sol. La figure 22 représente ainsi la quantité en eau et en minéraux des différents niveaux souterrains, la racine de notre plante se situant aux niveaux -3 et -4.

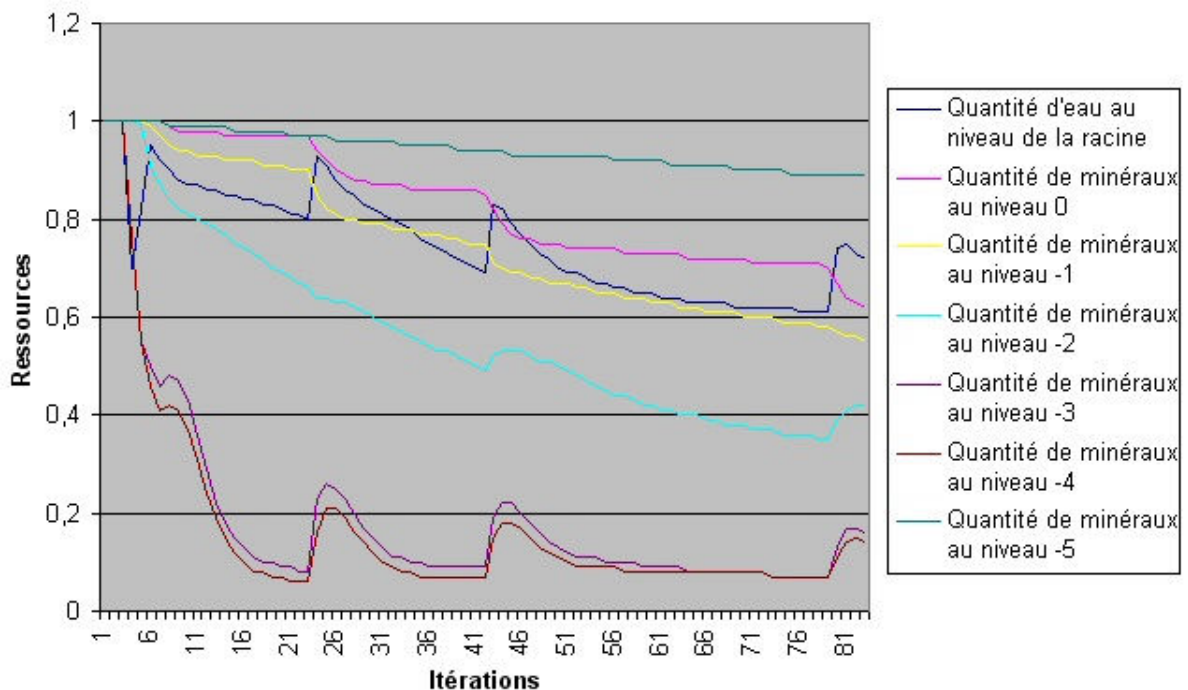


Figure 22 : Évolution des ressources du sol au niveau d'une plante au cours d'une expérience typique

La courbe représentant la quantité d'eau au niveau de la racine nous renseigne sur l'occurrence des averses. Ainsi chaque augmentation de la quantité d'eau dans le sol correspond à une pluie. On remarque alors que l'écoulement de l'eau dans le sol fait diminuer la quantité en minéraux des couches de surface afin d'augmenter celle des couches souterraines où se situent les racines. Ce résultat est encore plus visible dans la figure 23 qui représente la somme cumulée de tous les niveaux en minéraux. La phase post-mortem de la plante commence autour de l'itération 85 et libère sur la couche de surface une grande quantité de minéraux provenant de sa décomposition. Ces minéraux y restent jusqu'à la prochaine averse qui va se charger de les diffuser et les répartir uniformément dans toutes les couches souterraines.

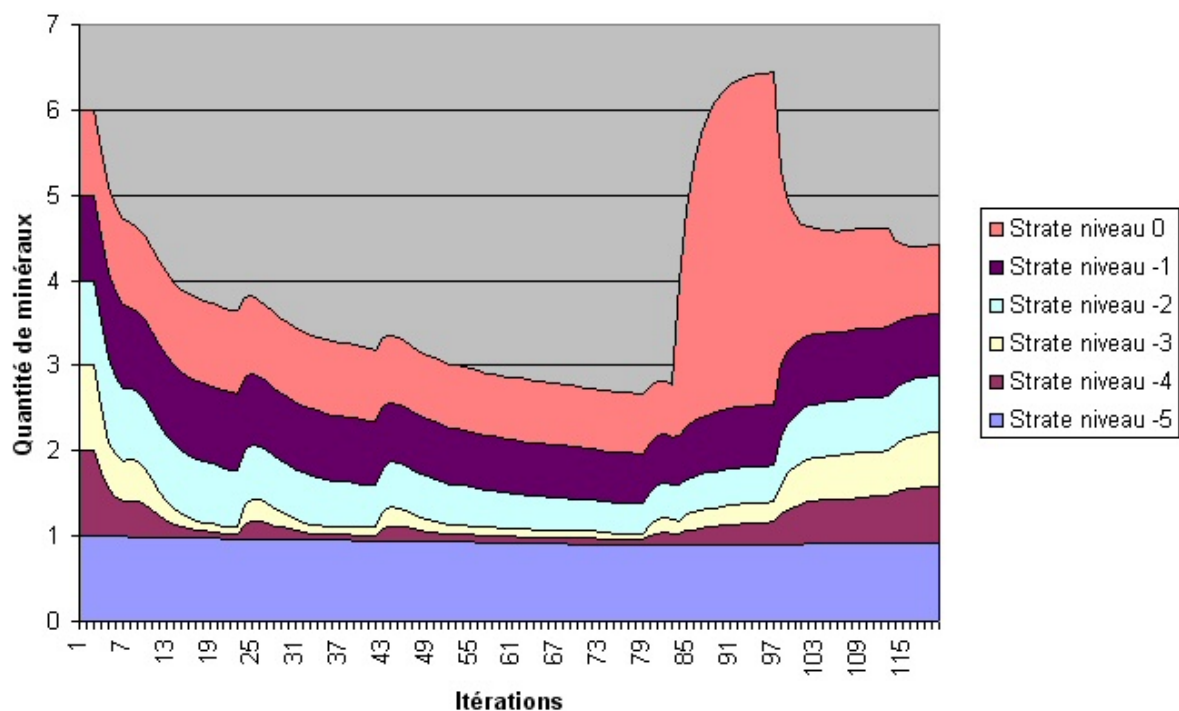


Figure 23 : Somme cumulée des ressources en minéraux au niveau d'une plante

6.1.3 Conclusion

Cette expérience nous a permis de finaliser et valider le nouveau système de diffusion par rapport au modèle d'écoulement de l'eau dans la nature. La validation de ce modèle est nécessaire avant de passer aux expériences suivantes. On notera tout de même qu'après plusieurs averses, une accumulation d'eau apparaît dans les couches les plus profondes du sol (voir figure 21). On retrouve ainsi le phénomène de création des nappes phréatiques dans notre écosystème.

6.2 Expérience 2 : Validation du modèle de saprophytisme

6.2.1 Objectif

Toutes les plantes de la nature n'assimilent pas leurs ressources de la même manière. Ainsi les champignons qui appartiennent aux espèces saprophytes ne disposent pas de photosynthèse et leur ressource en carbone provient de la décomposition d'organes morts.

L'objectif de cette expérience est de valider le modèle de saprophytisme utilisé par les champignons. À cet effet, nous avons modélisé des ascomycètes filamenteux qui produisent plusieurs enzymes leur permettant d'exploiter de nombreux types de niches [25]. Nous initialisons le sol avec une grande quantité d'organismes en décomposition puis nous suivons l'évolution du carbone sur la couche de surface en même temps que l'expansion des champignons sur plusieurs générations.

Le détail des paramètres de l'expérience est présenté en annexe B.2.

6.2.2 Discussion des résultats obtenus

Au cours de la simulation, les champignons se développent en décomposant et en consommant les substances organiques qui se trouvent autour d'eux, se reproduisent, puis meurent et renouvellent ainsi les couches de surface en organismes en décomposition qui serviront à un nouveau cycle de champignons. La figure 24 met en évidence la quantité de matière en décomposition du sol dans la simulation, les zones rouges représentent les zones où toutes les substances ont été décomposées tandis que les zones bleues claires représentent les déchets des champignons morts.

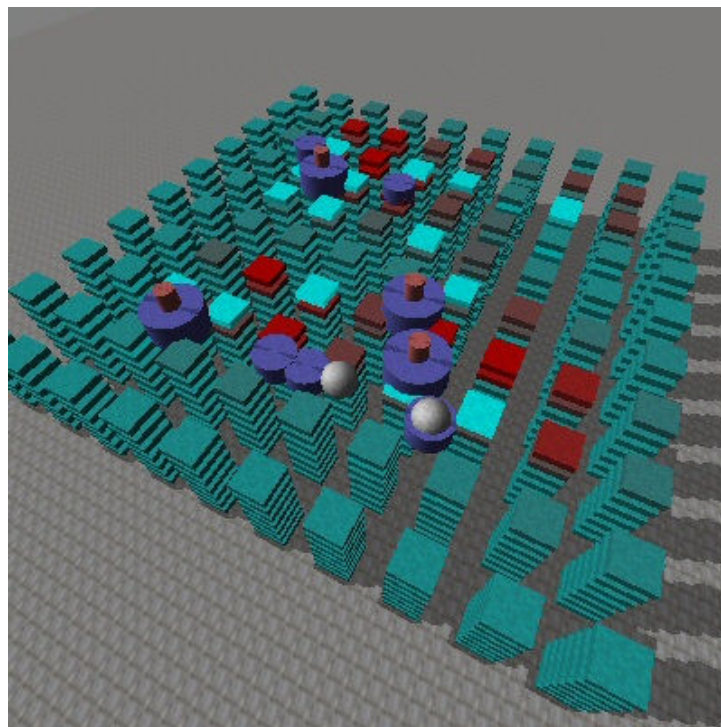


Figure 24 : Répartition du carbone dans le sol au cours de la simulation

Si l'on suit l'évolution en matière structurale totale des champignons lors de cette expérience (voir figure 25), nous remarquons que la croissance des champignons s'effectue par phase. On distingue ainsi des phases de reproduction abondante séparées par des phases de mortalité importante qui s'enchaînent de façon cyclique.

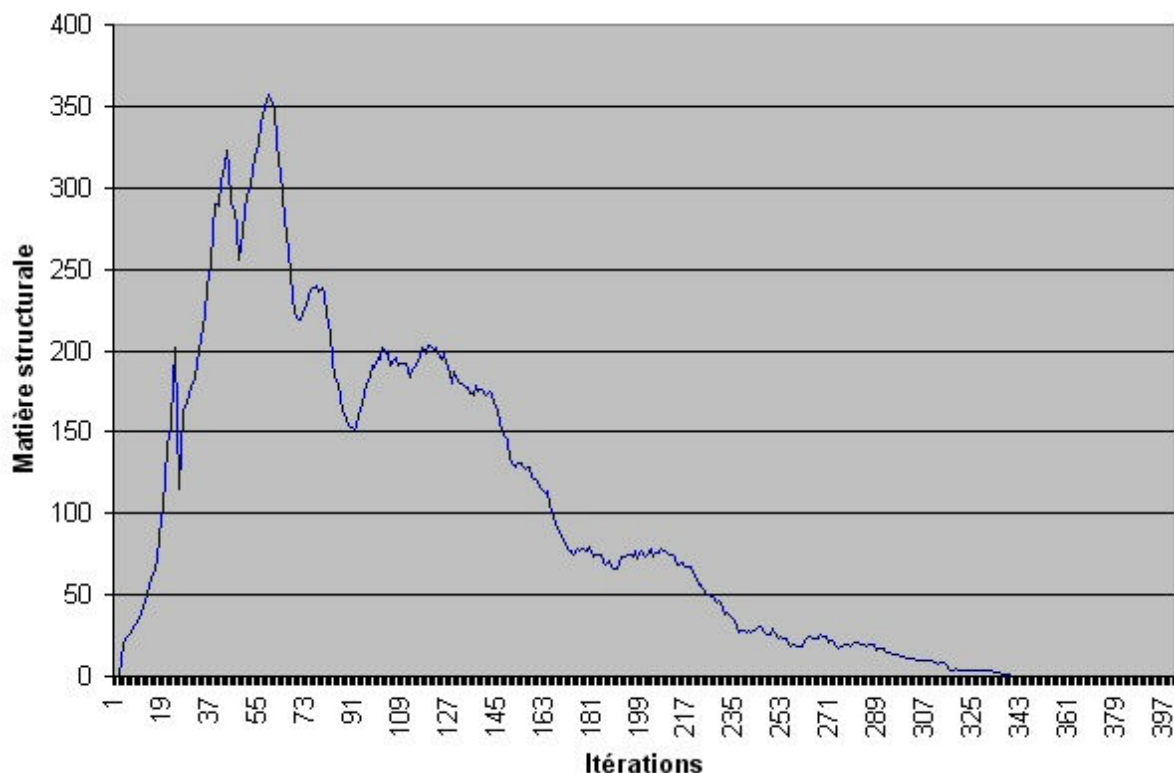


Figure 25 : Moyenne sur 10 simulations de l'évolution de la matière structurale totale des champignons

L'observation de la figure 26 représentant les ressources en carbone de la couche supérieure du sol, comparée au graphe de la figure 25, nous permet de faire l'hypothèse que la reprise de la prolifération des champignons après une phase de mortalité est due justement à la décomposition des champignons de la génération précédente. Nous retrouvons alors une similitude avec le mode d'interaction qui existe dans le monde animal, notamment entre proie et prédateur. Plusieurs études montrent d'ailleurs que le champignon n'est pas vraiment une plante mais se situe plutôt entre la plante et l'animal. Par exemple, Francis Hallé écrit : « Le champignon présente plusieurs caractères animaux : l'absence de chlorophylle va de pair avec la pratique d'un mode de vie hétérotrophe¹, aux dépens de matières organiques préexistantes » [33].

À chaque cycle, la quantité de matière structurale totale produite est inférieure au cycle précédent jusqu'à la disparition totale des champignons de l'environnement qui s'effectue suivant la simulation en 3 à 5 cycles. Ceci est dû à la dispersion progressive des substances organiques et à leur renouvellement trop faible provenant uniquement de la mort des champignons.

¹ Se dit d'un être vivant qui se nourrit de substances organiques.

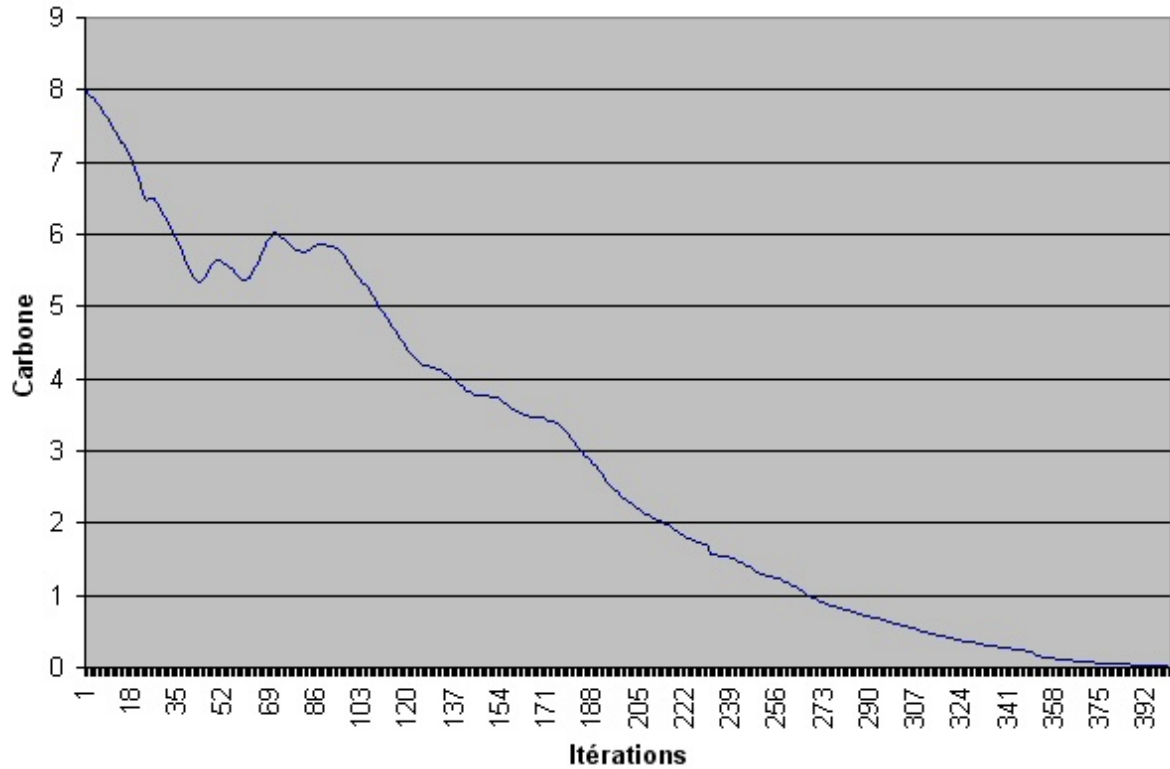


Figure 26 : Moyenne des ressources en carbone de la couche supérieure

6.2.3 Conclusion

Cette expérience nous a permis de mettre en évidence l'importance de la décomposition des plantes mortes dans la prolifération des champignons saprophytes. Cependant, cette simulation a été effectuée dans un environnement exempt de toute autre plante pour mieux suivre le développement des champignons. Ceci a eu pour effet de priver les champignons d'apport en matière végétale autre que celle provenant de leur propre mort. Le renouvellement de l'humus n'est alors pas suffisant pour assurer la pérennité de l'espèce. Dans la nature, le champignon nécessite d'être dans un écosystème contenant des plantes qu'il pourra dégrader.

6.3 Expérience 3 : Comparaison du développement séparé et symbiotique d'une plante et d'un champignon

6.3.1 Objectif

Outre le saprophytisme, le champignon peut contracter afin de se développer d'autres relations plus ou moins étroites avec d'autres organismes. Parmi ces relations, la symbiose et le parasitisme sont deux types d'associations avec une plante vivante qui se distinguent par leur action sur la plante hôte.

L'objectif de cette expérience est de comparer d'une part les développements séparés d'une plante et d'un champignon, et d'autre part leur développement symbiotique, les résultats sont alors mis en parallèle avec ceux d'un modèle réel. À cet effet, nous avons choisi de rapprocher la simulation du développement d'une plante d'hibiscus avec et sans relation de mycorhize, [34], (voir figure 27). Deux plantes A et B ainsi que deux champignons C et D sont modélisés dans un environnement, le champignon C parasite la plante B (voir figure 28). La reproduction des plantes a été volontairement supprimée dans le but d'éviter toute interférence provenant d'autres plantes. De plus, le sol a été initialisé avec une faible quantité d'organismes en décomposition pour éviter toute influence du saprophytisme au cours de la simulation.

Le détail des paramètres de l'expérience est présenté en annexe B.3.

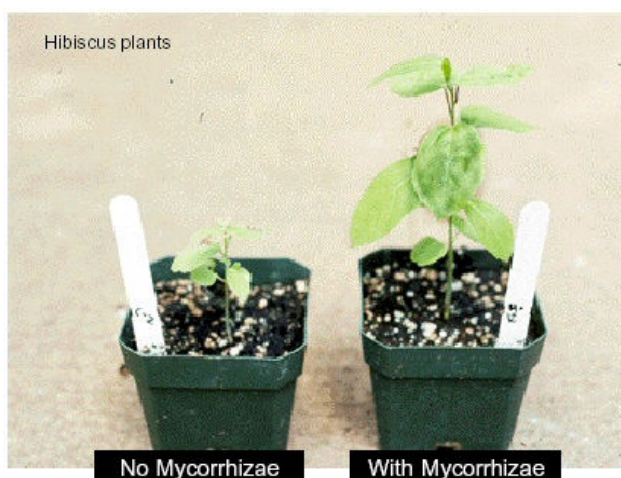


Figure 27 : Comparaison des relations de mycorhize chez l'hibiscus

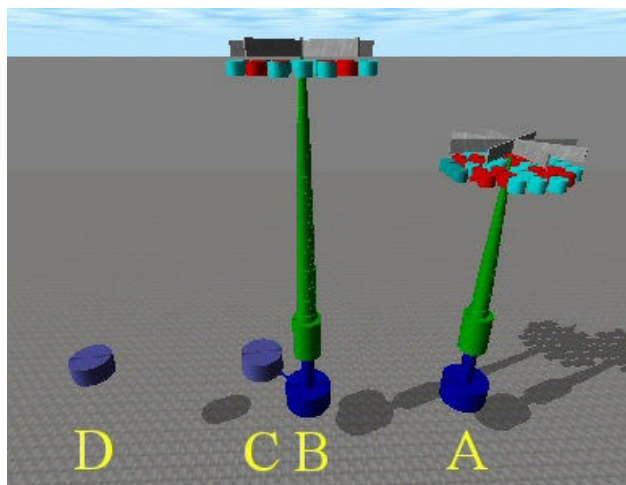


Figure 28 : Simulation d'une relation de mycorhize

6.3.2 Exposé des résultats d'expériences

6.3.2.1 Simulation lancée avec un sol normalement pourvu en minéraux

La figure 29 représente l'évolution en matière structurale des différentes plantes au cours du temps dans un cas typique. Il ressort de chaque simulation que la croissance des plantes en symbiose est favorisée sur le long terme tandis que la plante seule est favorisée sur le court terme. Ceci peut être expliqué par l'abondance des ressources dans le sol. En effet, au début de la simulation, la plante A est capable de récupérer par elle-même toutes les ressources nécessaires à son développement

contrairement à la plante B qui est ralentie par la présence du champignon C se nourrissant à ses dépens. À la fin de la simulation par contre, les ressources du sol sont moindres ralentissant la croissance de la plante A. La plante B, par contre, bénéficie de la strate racinaire du champignon C qui la parasite augmentant ainsi sa surface d'échange avec le sol.

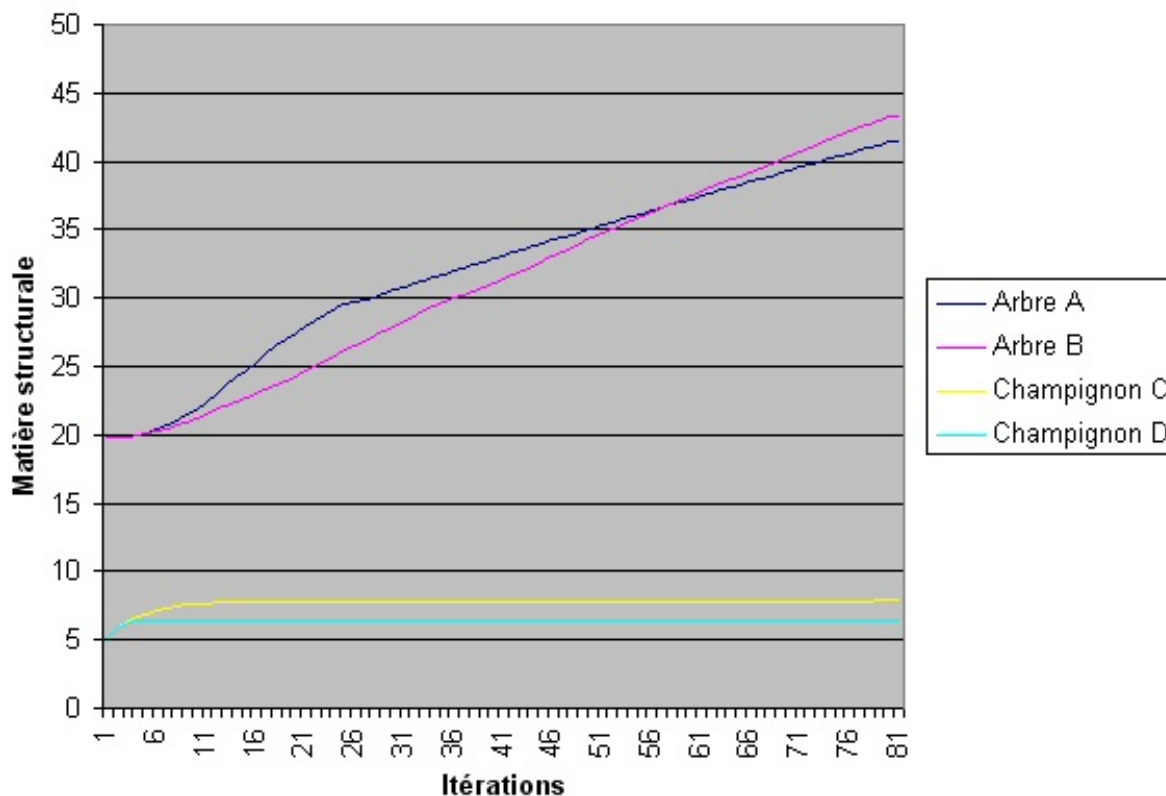


Figure 29 : Matière structurale produite lors d'une relation de mycorhize dans un sol classique

Afin de vérifier la limite entre le mutualisme et le parasitisme lors d'une relation de mycorhize, deux nouvelles expériences sont lancées reprenant les conditions initiales précédentes mais en modifiant les ressources contenues dans le sol.

6.3.2.2 Simulation lancée avec un sol riche en minéraux

La figure 30 représente l'évolution en matière structurale des différentes plantes au cours du temps dans un sol riche en minéraux. Nous remarquons ainsi que la plante A est capable à tout moment de subvenir à ses besoins seule. La plante B, quant à elle, perd une partie des ressources en carbone qu'elle aurait pu utiliser pour sa croissance à nourrir le champignon C. La relation de mycorhize qui existe entre la plante B et le champignon C est alors considérée comme du parasitisme pur. L'écart de croissance lors des simulations entre les deux plantes peut atteindre 20% suivant la quantité de ressource initiale. Nous retrouvons ces valeurs dans le modèle réel de symbiose avec l'hibiscus, la relation de mycorhize ayant un coût en carbone sur la plante de 4 à 20%.

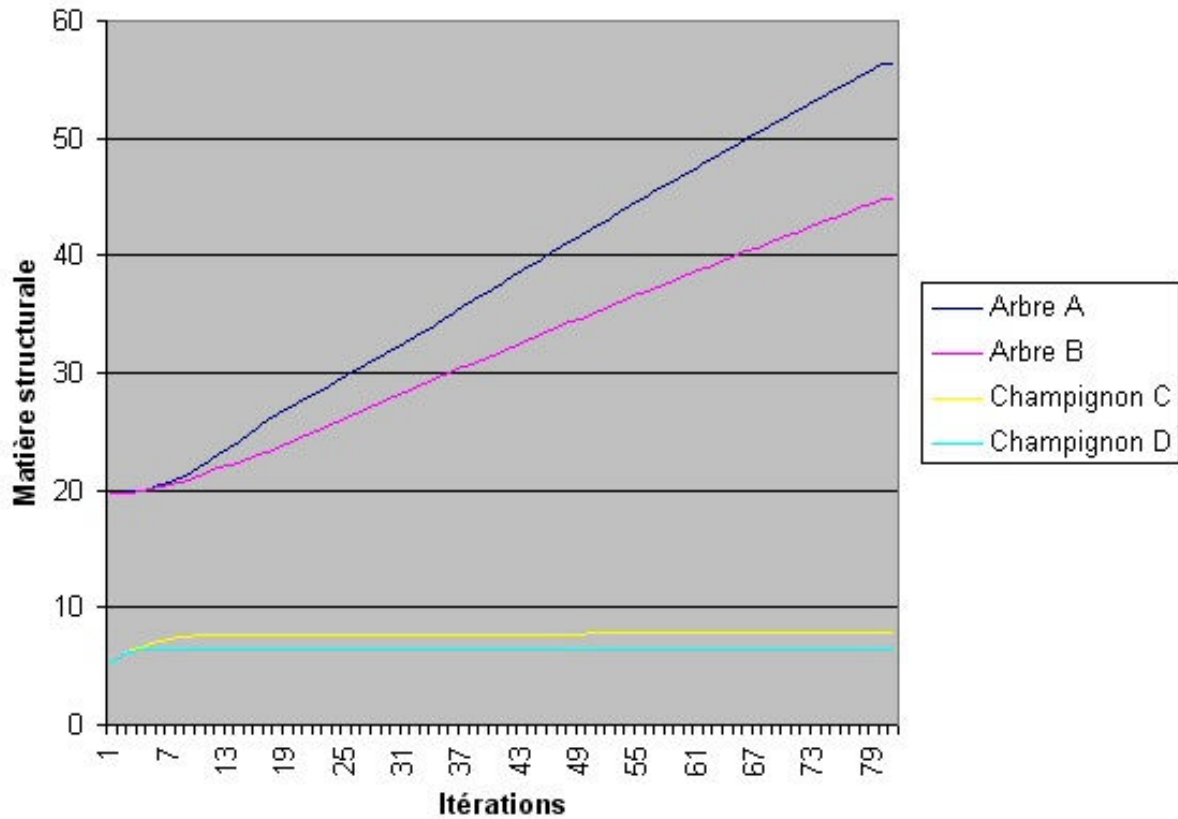


Figure 30 : Matière structurale produite lors d'une relation de mycorhize dans un sol riche en minéraux

6.3.2.3 Simulation lancée avec un sol pauvre en minéraux

La figure 31 représente l'évolution en matière structurale des différentes plantes au cours du temps dans un sol pauvre en minéraux. Nous remarquons que la plante A a beaucoup de mal à se développer seule du fait de la faible quantité de minéraux dans le sol. La plante B, quant à elle, dispose d'une surface racinaire plus importante grâce au champignon lui permettant d'avoir accès à une quantité de minéraux beaucoup plus grande, et ceci dès le début de la simulation lui permettant de croître plus vite. La relation entre la plante B et le champignon C est alors considérée comme une symbiose pure.

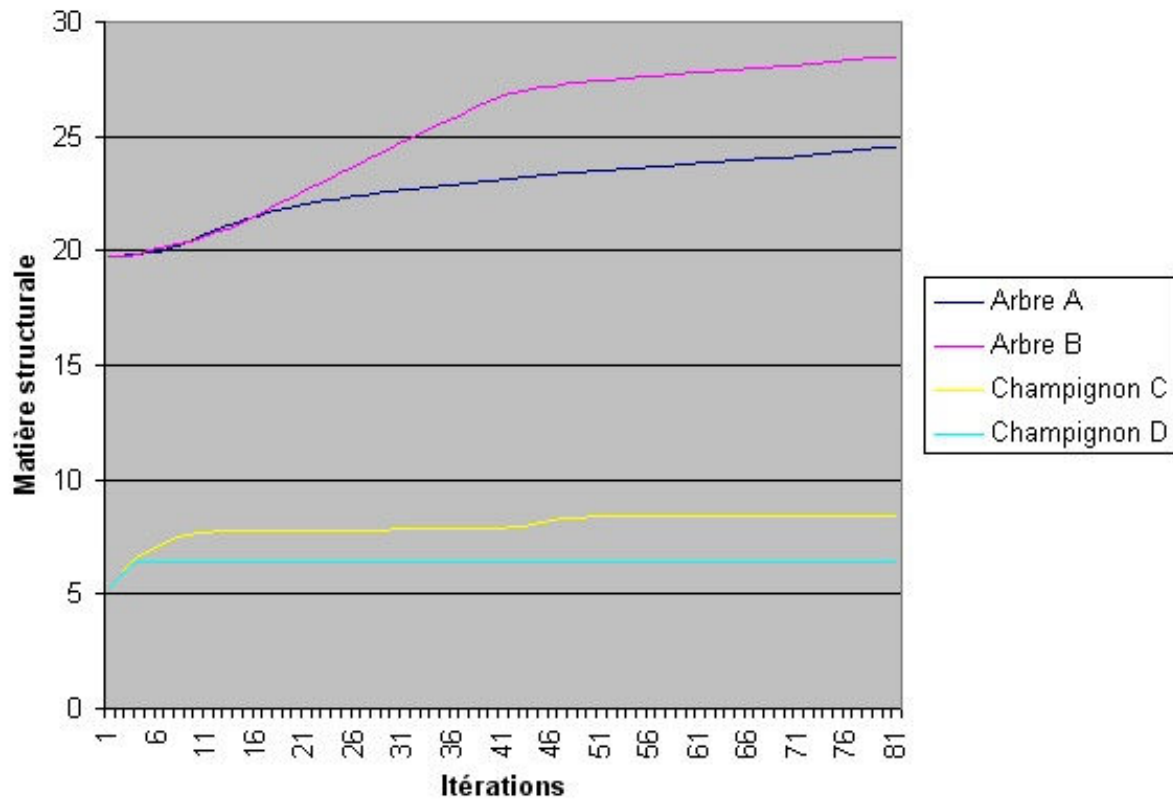


Figure 31 : Matière structurale produite lors d'une relation de mycorhize dans un sol pauvre en minéraux

6.3.3 Conclusion

Cette expérience nous a permis de mettre en évidence la limite assez étroite qui existe entre une relation de mutualisme et une relation de parasitisme. Comme dans la nature, cette limite est déterminée par la différence entre le coût en carbone prélevé sur la plante et le bénéfice en minéraux provenant du champignon. Ainsi, lorsque le coût dépasse le bénéfice, la relation devient parasite, alors qu'elle est symbiotique dans le cas contraire.

Maintenant que nous avons pu étudier séparément les différentes relations du champignon, nous allons les réunir dans une même expérience qui sera basée sur les effets d'interactions entre espèces pour un développement coopératif sur plusieurs générations.

6.4 Expérience 4 : Évolution d'un environnement composé de champignons et plantes sur plusieurs générations.

6.4.1 Objectif

Dans la nature, 80% des espèces de plantes peuvent avoir une relation de mycorhize avec un champignon [34]. Ces relations sont très communes dans les forêts et aident au développement des arbres, notamment lorsque le sol est faible en ressources. De plus, la présence de ces champignons favorise la décomposition des végétaux morts, bien que leur faculté de décomposition soit moins importante que celle des champignons purement saprophytes [35].

L'objectif de cette expérience est de montrer la capacité de l'environnement à gérer une situation de coopération stable sur plusieurs générations. À cet effet, nous simulons le développement d'une forêt composée d'arbres et de champignons dans un sol pauvre en minéraux et à renouvellement faible. Nous suivons son évolution sur plusieurs générations et nous comparons les résultats obtenus à ceux d'un modèle réel tel que le pin et le champignon du pin (*Tricholoma*, voir figure 32) dans les forêts de l'ouest des États-Unis [35] et du Canada [36].

Le détail des paramètres est présenté en annexe B.4.

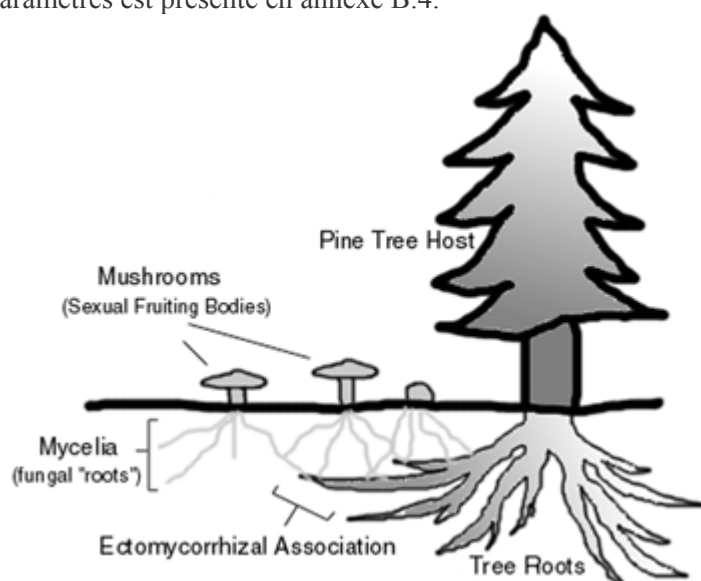


Figure 32 : Symbiose mycorhizienne entre le *Tricholoma* et le Pin

6.4.2 Exposé des résultats d'expériences

Au cours de la simulation, deux situations différentes peuvent se produire. Dans un premier cas, une des espèces de plante meurt pendant les 100 premiers pas de temps entraînant la mort de la seconde espèce par la suite. Dans un deuxième cas, par contre, les arbres et les champignons colonisent progressivement tout l'espace de simulation et un état d'équilibre se forme.

En effet, au début de la simulation, le nombre d'arbres et de champignons est relativement restreint ce qui réduit les chances de symbiose mycorhizienne. Or, en l'absence de celle-ci, le développement et la reproduction des arbres sont limités par les ressources faibles du sol ce qui peut entraîner la mort prématurée de l'espèce (voir expérience 3). Par contre, lorsque les champignons poussent suffisamment près des arbres, nous pouvons supposer que les relations de symbiose qui

s'instaurent permettent à l'espèce de croître et se reproduire formant ainsi une niche qui va s'étendre progressivement à l'ensemble de l'environnement. Dans cette niche, la densité en arbre et en champignon est telle que nous pouvons faire l'hypothèse que les symbioses mycorhiziennes ont plus de chance d'avoir lieu et permettent de faire perdurer cet état d'équilibre.

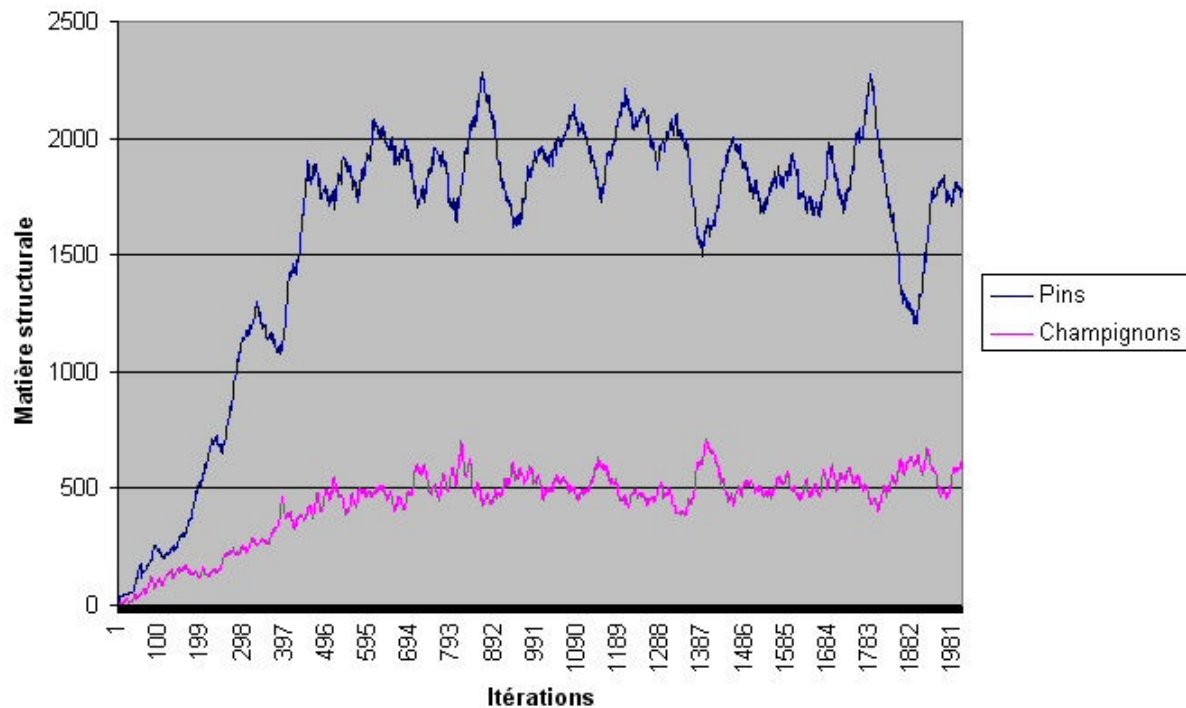


Figure 33 : Moyenne de l'évolution en matière structurale lors de la colonisation de l'environnement

Si l'on suit l'évolution en matière structurale totale des arbres et des champignons après la création d'une niche (voir figure 33), nous remarquons que les différentes plantes se développent jusqu'à atteindre effectivement un équilibre stable autour de la 500^{ème} itération qui perdure par la suite. Cette limite correspondant à la colonisation complète de l'environnement.

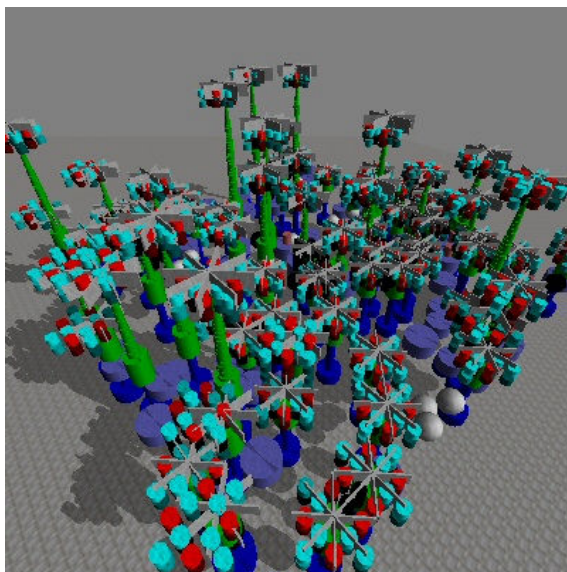


Figure 34 : Vue de dessus de la simulation après 2000 pas de temps

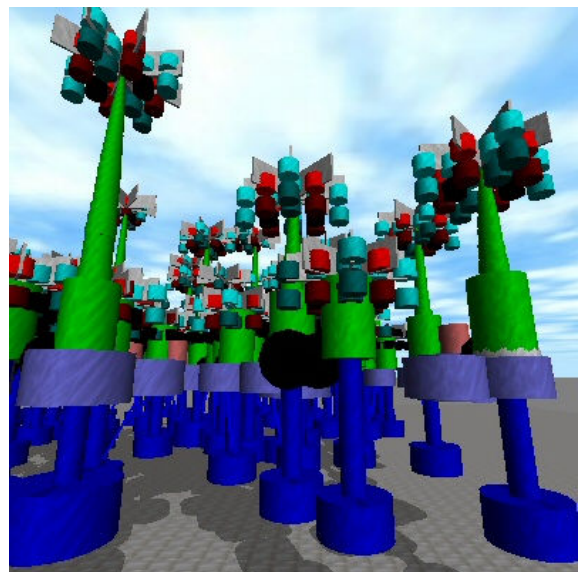


Figure 35 : Vue latérale de la simulation après 2000 pas de temps

Les figures 34 et 35 nous montrent l'espace de simulation au bout de 2000 pas de temps, nous remarquons ainsi que la forêt y est assez dense comme dans la nature [36]. En effet, le pin n'a pas un houppier large et cache faiblement le feuillage de ses voisins. Nous pouvons en déduire que la lumière n'est pas un facteur prépondérant au cours de la simulation, ce qui renforce l'hypothèse d'une coopération souterraine et explique la densité de la forêt de pins.

6.4.3 Conclusion

Lors de cette expérience, nous retrouvons dans un environnement rude la formation d'un écosystème stable grâce à la coopération de plusieurs espèces de plantes qui ne pourraient pas survivre séparément. Ces plantes entrent en coopération pour l'exploitation des ressources de la même manière que les différents organes d'une plante dépendent les uns des autres.

Nous avons pu remarquer lors de la réalisation de ces simulations que les situations de mutualisme stables sont souvent difficiles à obtenir. En effet, la variation ou l'évolution d'un paramètre de l'environnement peut facilement changer un type d'interaction. Or, dans notre plateforme, c'est à l'utilisateur de se rapprocher d'un modèle réel lors d'une simulation, alors que dans la nature ce sont les plantes qui évoluent génétiquement au cours des générations afin de maximiser leur fonction de survie. L'évolution d'un organisme en même temps que son environnement n'est actuellement pas pris en compte dans notre modèle.

Conclusion

La plate-forme

Au cours de ce stage qui s'est déroulé dans la poursuite d'un travail préexistant, la première étape fut de comprendre le fonctionnement de la plate-forme. Cette phase ne fut pas évidente à cause de l'absence de documentation technique en dehors de la description des modèles conceptuels. J'ai donc, dans l'optique d'une reprise de ce projet, rédigé une documentation qui est disponible en annexe C.

La compréhension du fonctionnement de la plate-forme a permis de déterminer les limites d'évolutivité imposées par les choix effectués. Il a ainsi été possible de mettre en évidence une mauvaise gestion de la mémoire qui limite les simulations dans la durée. Cependant, les modifications apportées à la plate-forme au cours de ce stage se sont essentiellement concentrées sur la modélisation par modification et ajout de fonctionnalités.

Dans le modèle initial, les interactions présentes étaient soit de la compétition pour l'exploitation des ressources, soit de la coopération pour le partage de ces ressources. Ainsi, le modèle de coopération, implémenté grâce à un système d'allélopathie, présentait surtout l'intérêt d'aider les plantes à gérer des problèmes d'encombrement plutôt que de réunir leurs compétences pour obtenir des nutriments. Afin d'étudier l'émergence de comportements particuliers coopératifs dans les communautés de plantes, j'ai ajouté un nouveau modèle de plante : le champignon.

Ainsi, pour des relations telles que la symbiose ou le parasitisme, un mode de communication par acheminement direct similaire à celui existant entre les organes d'une plante a été implémenté. Ce modèle m'a permis de présenter d'autres types d'interactions tels que la coopération pour l'exploitation des ressources. Il pourra être étendu par la suite à d'autres applications plus complexes comme le transfert de carbone par relation source/puits [37].

Perspectives

Lors des expérimentations utilisant ce mode de coopération, il a été constaté que la frontière qui existe entre les interactions est parfois très étroite. Le passage d'une relation de symbiose à une relation de parasitisme peut s'effectuer par une modification de l'environnement. Des expériences complémentaires pourraient être effectuées pour déterminer plus précisément le seuil entre ces relations et ainsi le comparer au modèle réel.

En augmentant les types d'interactions possibles, il a également été nécessaire d'augmenter le nombre de ressources distinctes assimilables par la plante et par conséquent le nombre de paramètres dont dépend sa survie. Or, l'accroissement du nombre de variables complique la réalisation d'une simulation, plus de données biologiques sont alors nécessaires, et il est plus délicat de déterminer les paramètres prépondérants qui la font évoluer.

Dans notre modèle, les plantes d'une même espèce sont toutes identiques entre-elles, leurs caractéristiques sont définies par l'utilisateur au début de la simulation. Dans la nature, pourtant, les espèces s'adaptent génétiquement au cours des générations en fonction de l'environnement afin de se rapprocher de situations stables de survie.

Une perspective de poursuite de ce travail serait alors d'utiliser des méthodes et algorithmes évolutionnaires aux plantes afin qu'elles s'adaptent au cours des générations. Ainsi, il serait possible de suivre l'émergence de certains comportements particuliers des plantes en communautés et tenter de comprendre pourquoi ils apparaissent.

Bilan personnel

Au cours de ce stage j'ai eu l'occasion de travailler dans une équipe composée d'enseignants chercheurs, de doctorants, ainsi que d'autres stagiaires. Cet environnement très enrichissant sur le plan personnel par les confrontations intellectuelles sur certains sujets pointus m'a permis de découvrir le monde de la recherche universitaire.

J'ai pu évoluer librement au sein du laboratoire, une grande autonomie m'était laissée pour mon travail, cependant mes bilans partiels étaient étudiés avec mon responsable de stage qui validait et orientait mes recherches vers des pistes intéressantes.

Je regrette néanmoins de ne pas avoir eu l'occasion de participer aux réunions de discussion sur les derniers articles scientifiques sortis. En effet la deuxième moitié du stage ayant eu lieu pendant les grandes vacances scolaires, l'équipe n'était jamais présente au complet pour les organiser. Pourtant ces réunions permettent de présenter et confronter les opinions sur des sujets de recherche récents. Elles sont une partie importante du travail d'une équipe dans un laboratoire d'autant que les chercheurs qui assument aussi cours et conférences ne peuvent pas suffisamment se rencontrer.

En discutant avec les autres doctorants de leurs recherches, j'ai pu me rendre compte de ce que pourrait être mon statut au cours des trois prochaines années dans l'optique d'une poursuite en thèse. Mais n'étant pas intéressé par le professorat, j'ai pu constater que la dominante de ce groupe de recherche n'était pas suffisamment dirigée vers l'entreprise, ce qui m'incite à ne pas poursuivre une thèse dans cette équipe bien que cette expérience se soit avérée intéressante.

Annexe A : Équations

1) Assimilation des nouvelles ressources du sol

$$\text{Extraction_Acceptable} = \text{MIN} (\text{Capacité_Max_Substance} * \text{Seuil_Demande_Substance} - \text{Quantité_Courante} , 0)$$

$$\text{Extraction_Effectue} = \text{MIN} (\text{Extraction_Acceptable} * \text{Coeff_Extraction} , \text{Quantité_Sol} * \text{Coeff_Max_Extraction_Sol})$$

Capacité_Max_Substance est la quantité maximale qu'un organe peut contenir en une substance.

Seuil_Demande_Substance est le pourcentage de la capacité maximale qui est souhaitable à l'organe pour se développer correctement.

À partir de la quantité actuelle en substance de l'organe (*Quantité_Courante*), il est alors possible de calculer la quantité en substance qui serait acceptable d'extraire du sol (*Extraction_Acceptable*).

L'extraction réelle (*Extraction_Effectue*) est déterminée à partir de la quantité qui serait acceptable d'extraire, la quantité en substance dans le sol proche (*Quantité_Sol*), et les coefficients d'extraction de l'organe (*Coeff_Extraction*) et maximal du sol (*Coeff_Max_Extraction_Sol*).

2) Échange de ressources dans la plante

$$\text{Distribution_Possible_Substance} = \text{MAX} (\text{Quantité_Ressource} - \text{Capacité_Max} * \text{Seuil_Distribution_Substance} , 0)$$

Seuil_Distribution_Substance est la proportion de la quantité maximale en substance de l'organe (*Capacité_Max*) qu'il doit garder pour son bon développement.

La quantité de ressource distribuée aux organes voisins (*Distribution_Possible_Substance*) correspond alors au surplus entre la quantité courante (*Quantité_Ressource*) et le seuil de distribution.

3) Diffusion des substances dans le sol

$$\text{Coeff_Entraînement_Eau} = \text{MIN} (\text{Diffusion_Eau} / \text{Seuil_Diffusion} , 1)$$

$$\text{Diffusion_Substance} = \text{Coeff_Entraînement_Eau} * \text{Coeff_Diffusion_Substance} * \text{Coeff_Gravité} * \text{Différence_Quantité_Substance}$$

Diffusion_Eau est la quantité d'eau diffusée ou écoulée d'un voxel à l'autre.

Seuil_Diffusion est une constante de diffusion qui va permettre de calculer le coefficient d'entraînement des autres substances par l'eau (*Coeff_Entraînement_Eau*). Plus la quantité d'eau diffusée entre deux voxel sera grande, plus le coefficient d'entraînement sera grand. Si la quantité d'eau diffusée est supérieure au seuil de diffusion, le coefficient sera alors égal à 1.

La quantité de substance diffusée entre deux voxels (*Diffusion_Substance*) est alors calculée à partir de *Coeff_Entraînement_Eau* entre ces mêmes voxels, mais aussi en fonction de la différence en quantité de la substance entre les voxels (*Différence_Quantité_Substance*), du coefficient de gravité

(*Coeff_Gravite*), et du coefficient de diffusion de la substance en question (*Coeff_Diffusion_Substance*).

4) Le saprophytisme

$$Substance_Decompose = \text{MIN} (Quantite_Substance * Coeff_Saprophytisme , \\ Decomposition_Max_Possible)$$

Coeff_Saprophytisme est le coefficient de conversion des substances provenant de composants végétaux.

À partir de la quantité en substance disponible (*Quantite_Substance*) et la quantité maximale de décomposition (*Decomposition_Max_Possible*) il est alors possible de calculer la quantité de substance décomposée (*Substance_Decompose*).

Annexe B : Paramètres Expériences

1) Paramètres expérience 1

Quatre plantes de type arbre(voir paramètres arbre) sont positionnées dans un environnement aux coordonnées respectives (8,8), (8,16), (16,8) et (16,16). La longueur de l'axe de leur racine est définie à « 3 » et leur reproduction est inexistante.

À l'initialisation, chaque voxel du sol contient « 1 » en ressources en minéraux et « 1 » en eau. Leur renouvellement est nul et leur coefficient de diffusion sont tous les deux à « 1 ».

Le type de pluviométrie se compose alors d'une rosée inexistante et de pluies d'une abondance de « 4 » avec une probabilité de 5%.

2) Paramètres expérience 2

Quatre plantes de type champignon(voir paramètres champignon) sont positionnées dans un environnement aux coordonnées respectives (8,8), (8,28), (28,8) et (28,28).

À l'initialisation, chaque voxel du sol contient « 1 » en ressources en minéraux, « 1 » en eau et « 8 » en matière minérale et carbonée d'origine organique. Le renouvellement des minéraux est défini à « 0,001 » tandis que la dissipation des matières organiques à « 0,002 ». Les coefficients de diffusion sont respectivement de « 1 », « 1 » et « 0,5 » pour les minéraux, l'eau et les matières organiques.

Le type de pluviométrie se compose alors d'une rosée de « 0,001 » et de pluies d'une abondance de « 0,5 » avec une probabilité de 20%.

3) Paramètres expérience 3

Quatre plantes, deux de type arbre(voir paramètres arbre) et deux de type champignon(voir paramètres champignon), sont positionnées dans un environnement aux coordonnées respectives (4,20), (15,20) pour les arbres et (18,20) et (29,20) pour les champignons. La longueur de l'axe des racines des arbres est définie à « 3 » et la reproduction de toutes les plantes est inexistante.

Trois simulations ont été exécutées au cours de cette expérience utilisant une initialisation des ressources souterraines différentes.

Dans la première simulation, chaque voxel du sol contient « 1 » en ressources en minéraux, « 1 » en eau et « 0,1 » en matière minérale et carbonée d'origine organique. Le renouvellement des minéraux est défini à « 0,002 » tandis que la dissipation des matières organiques à « 0,001 ». Les coefficients de diffusion sont respectivement de « 1 », « 1 » et « 0,5 » pour les minéraux, l'eau et les matières organiques.

Dans la deuxième simulation, chaque voxel du sol contient « 2 » en ressources en minéraux, « 1 » en eau et « 0,1 » en matière minérale et carbonée d'origine organique. Le renouvellement des minéraux est défini à « 0,01 » tandis que la dissipation des matières organiques à « 0,001 ». Les coefficients de diffusion sont respectivement de « 1 », « 1 » et « 0,5 » pour les minéraux, l'eau et les matières organiques.

Dans la troisième simulation, chaque voxel du sol contient « 0,4 » en ressources en minéraux, « 1 » en eau et « 0,1 » en matière minérale et carbonée d'origine organique. Le renouvellement des minéraux est nul tandis que la dissipation des matières organiques à « 0,001 ». Les coefficients de diffusion sont respectivement de « 1 », « 1 » et « 0,5 » pour les minéraux, l'eau et les matières organiques.

Le type de pluviométrie ne change pas et se compose d'une rosée de « 0,001 » et de pluies d'une abondance de « 0,5 » avec une probabilité de 20%.

4) Paramètres expérience 4

Trois plantes, deux de type pin (voir paramètres arbre) et deux de type champignon (voir paramètres champignon), sont positionnées dans un environnement aux coordonnées respectives (30,50), (50,20) et (47,20). Le pin ayant un houppier moins large qu'un arbre classique avec une proportion rayon/hauteur définie à « 0,5 » et une tige s'orientant plus faiblement vers la lumière.

À l'initialisation, chaque voxel du sol contient « 0,2 » en ressources en minéraux, « 1 » en eau et « 2,5 » en matière minérale et carbonée d'origine organique. Le renouvellement des minéraux est défini à « 0,0002 » tandis que la dissipation des matières organiques à « 0,0005 ». Les coefficients de diffusion sont respectivement de « 1 », « 1 » et « 0,5 » pour les minéraux, l'eau et les matières organiques.

Le type de pluviométrie se compose alors d'une rosée de « 0,2 » et de pluies d'une abondance de « 1 » avec une probabilité de 40%.

5) Paramètres Arbre

Les arbres sont initialisés avec une quantité en minéraux et en carbone de « 20 » alors que leur maturité sexuelle est atteinte à « 30 ». L'âge maximal d'un arbre est de « 50 ». Les paramètres génétiques des différents organes de l'arbres sont décrits dans le tableau suivant.

	Racine	Tige	Houppier
Investissement initial	0,5	0,5	0,5
Proportion rayon/hauteur	1	3	0,2
Seuil de distribution en carbone	0,5	0,6	0,5
Seuil de demande en carbone	0,9	0,9	0,7
Seuil de distribution en minéraux	0,6	0,6	0,8
Seuil de demande en minéraux	0,8	0,9	0,9
Seuil de croissance en carbone	0,5	0,5	0,5
Seuil de croissance en minéraux	0,5	0,5	0,5
Carbone alloué à la croissance/distribution	0,5	0,1	0,2
Minéraux alloué à la croissance/distribution	0,2	0,1	0,6
Vitesse de croissance	0,1	0,1	0,1

6) Paramètres Champignon

Les champignons sont initialisés avec une quantité en minéraux et en carbone de « 5 » alors que leur maturité sexuelle est atteinte à « 10 ». L'âge maximal d'un champignon est de « 20 ». Les paramètres génétiques des différents organes du champignon sont décrits dans le tableau suivant.

	Racine	Fleur
Investissement initial	0,5	0,5
Proportion rayon/hauteur	1	3
Seuil de distribution en carbone	0,5	0,7
Seuil de demande en carbone	0,9	0,9
Seuil de distribution en minéraux	0,5	0,7
Seuil de demande en minéraux	0,6	0,9
Seuil de croissance en carbone	0,5	0,5
Seuil de croissance en minéraux	0,5	0,5
Carbone alloué à la croissance/distribution	0,5	0,5
Minéraux alloués à la croissance/distribution	0,1	0,5
Vitesse de croissance	0,1	2

Annexe C : Documentation technique

Table des matières

I.	Objectif.....	59
II.	Architecture de la plate-forme	59
	A. Delphi.....	59
	B. Moteur Graphique.....	59
	C. Gestion de la mémoire	60
III.	Organisation des sources.....	60
	A. Modélisation Objet.....	60
	B. Les répertoires.....	61
IV.	Manuel d'utilisation.....	63
	A. Paramètres d'une expérience	63
	B. Exécution d'une simulation	66
V.	Glossaire.....	71

I. Objectif

L'objectif de ce document est de décrire le fonctionnement de la plate-forme, ainsi que d'expliquer la création et l'exécution d'une expérience.

Il s'adresse plus particulièrement aux personnes qui reprendront le projet.

L'architecture de la plate-forme est présentée, puis l'organisation des sources en classes, et enfin il se termine par le manuel d'utilisation et un glossaire.

II. Architecture de la plate-forme

Ce travail se situe dans la poursuite d'un stage précédent, ainsi un environnement de travail a déjà été créé. Un grand nombre de choix concernant l'architecture et le fonctionnement de la plate-forme ont été effectués au cours de ces travaux antérieurs, par exemple en ce qui concerne le langage utilisé ou le moteur graphique. Malheureusement, peu de documentations techniques ont été rédigées en dehors des modèles conceptuels.

Une bonne partie de mon travail au début du stage a été de comprendre les sources du projet afin de pouvoir apporter les modifications nécessaires à l'exécution de nouvelles expériences. Ce chapitre présente les choix effectués dans les outils de programmation ainsi qu'une discussion sur leur évolutivité.

A. Delphi

Delphi est un langage de développement rapide d'application (RAD) qui se base sur le principe de conception par intégration de composants dans un environnement, puis par la définition de leurs propriétés et événements associés. Ces événements exécutent des scripts écrits dans un langage de programmation qui dans le cas de Delphi est le pascal orienté objet.

Cet outil permet ainsi de créer une plate-forme de simulation sous forme d'un programme exécutable possédant une interface visuelle. Le langage de programmation est orienté objet ce qui permet de combiner au sein d'une même structure de données, appelée classes, opérations et données. Chaque instantiation d'une classe dispose ainsi de ses propres variables. Les concepts apportés par ce type de langage sont entre autres l'encapsulage, l'héritage et le polymorphisme.

Le choix d'un langage orienté objet a été préféré car il facilite la programmation utilisant une approche multi-agents. Chaque objet ou instance de classe définit alors le fonctionnement d'un agent du système. Le choix de delphi comme langage de développement a été effectué pour son grand nombre de bibliothèques disponibles et sur la préférence de mes prédécesseurs. D'autres langages auraient pu être retenus comme le C++ qui est un des plus utilisés ou le Java pour sa portabilité sous d'autres systèmes d'exploitation tels que Linux ainsi que sa gestion de la mémoire.

B. Moteur Graphique

Afin de disposer d'une représentation de l'environnement en 3D, une librairie graphique n'est pas suffisante. En effet, elle ne permet pas de gérer les déplacements et interactions des différents éléments, le choix s'est donc porté sur un moteur 3D. Mes prédécesseurs ont tout naturellement opté pour le moteur ODE (Open Dynamics Engine) qui avait déjà été utilisé pour d'autres projets. Pourtant ce moteur n'est pas le plus adapté pour notre projet.

En effet, ce moteur est en fait une librairie « open-source » pour le développement des simulateurs physiques de corps articulés. Or aucune articulation n'est utilisée ni même prévue dans la modélisation de notre environnement. Une partie des fonctionnalités de ce moteur est donc inutile. En

plus, ce moteur a été initialement codé pour le langage C++. Une importation sous Delphi utilisant une version « dll » des sources s'est avérée nécessaire.

Le problème se pose alors pour son utilisation puisque aucune documentation n'est disponible à part pour la version C++. De plus, l'importation sous Delphi ayant été seulement partielle, ce moteur n'est finalement efficace que pour la gestion de formes simples. Son évolutivité sera donc assez difficile dans le cas de demandes plus complexes au moteur graphique. J'ai aussi constaté au cours de mon stage une plus grande instabilité du moteur sur une machine équipée de Windows XP que sur une machine équipée de Windows 2000.

C. Gestion de la mémoire

En consultant les sources du projet, j'ai remarqué que certains choix critiquables concernant la gestion de la mémoire avaient été effectués. En effet, afin de réduire le temps de calcul au cours des simulations, certaines phases de la gestion de la mémoire ont été omises ou simplifiées par mes prédécesseurs. Ces choix n'ont pas eu de réelle conséquence sur les expériences réalisées jusqu'alors, mais entraînent une consommation en mémoire vive beaucoup plus importante que nécessaire. Or, avec la complexification des expériences ainsi que l'allongement de la durée des simulations, il arrive que l'ensemble de la mémoire vive de l'ordinateur soit utilisé l'obligeant ainsi à swapper sur le disque dur.

Dans l'optique d'une poursuite de ce projet, et afin qu'une simulation ne soit pas limitée par la quantité de mémoire vive disponible, deux points de gestion de la mémoire devront être modifiés :

Le premier concerne la gestion des listes, en effet elle n'est pas effectuée dynamiquement. Actuellement toute liste alloue une quantité de mémoire correspondant à 500 éléments la composant. Or dans la majorité des cas, une liste n'est composée que de 3 éléments. Une grande quantité de mémoire est donc allouée sans jamais être utilisée ce qui n'aurait pas été le cas avec une gestion de listes dynamiques. Chaque agent de la simulation utilisant ces listes, la quantité de mémoire inutile allouée est donc d'autant plus grande que la simulation contient d'agents.

Le Deuxième point concerne la libération de la mémoire inutilisée du moteur graphique. En effet, toutes les formes à afficher sont enregistrées en tant qu'objet dans le moteur graphique. Or les formes à supprimer des plantes mortes ne sont que masquées sans pour autant libérer l'espace mémoire équivalent. La mémoire vive de l'ordinateur s'encombre donc progressivement au cours de la simulation et ceci même si la quantité de formes affichées reste relativement stable. Des fonctions, afin de libérer la mémoire inutilisée, sont pourtant implémentées dans le moteur graphique sans jamais être exécutées. La correction consistera à ajouter dans le destructeur de chaque plante une fonction qui se chargera de libérer la mémoire utilisée par chaque élément graphique la composant.

III. Organisation des sources

A. Modélisation Objet

Afin de décrire les variables et les méthodes des objets similaires dans notre langage de programmation, chaque type d'objet est représenté par une classe qui hérite des attributs de ses ancêtres. Les objets sont alors des instances de ces classes. Les figures 1 et 2 présentent l'ensemble des différentes classes de la plate-forme, ainsi que les liens de parenté qui existent entre eux. Pour mieux cerner le travail réalisé au cours de ce stage, un code couleur a été adopté. Ainsi les classes qui ont été créées sont notées en rouge tandis que les classes qui ont été modifiées sont notées en orange. Les classes restantes sont notées en noir.

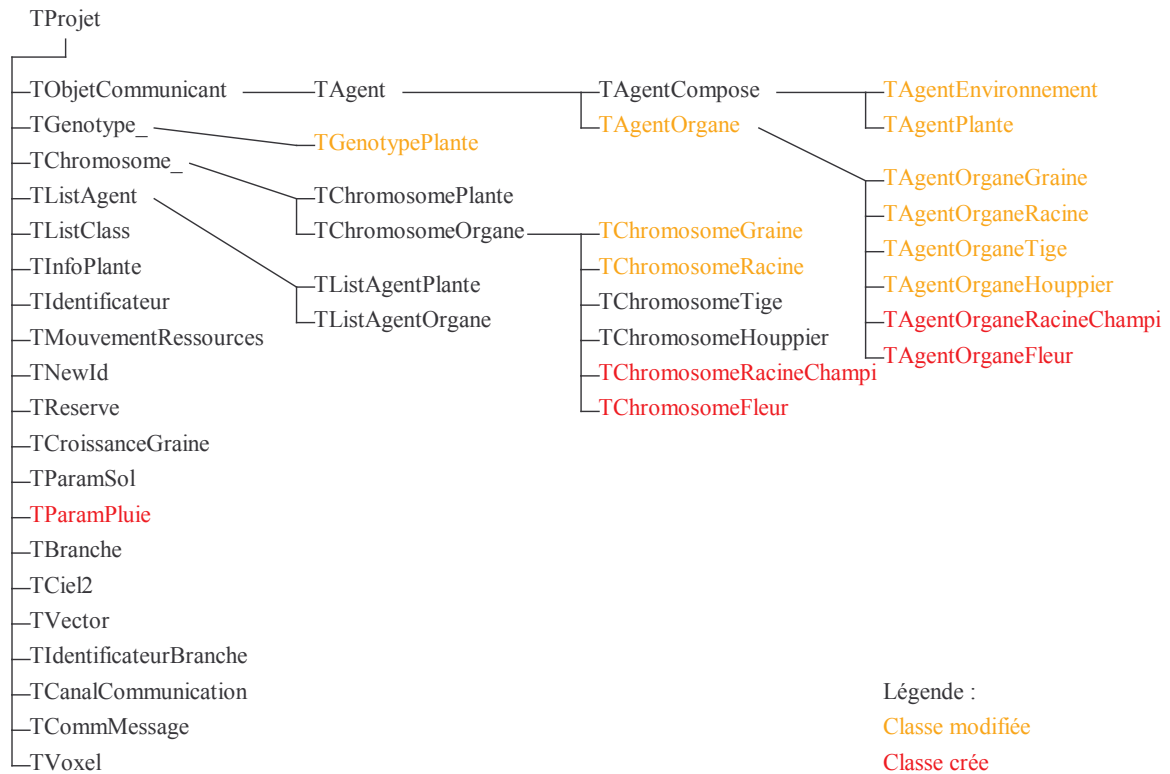


Figure 1 : Organisation des classes

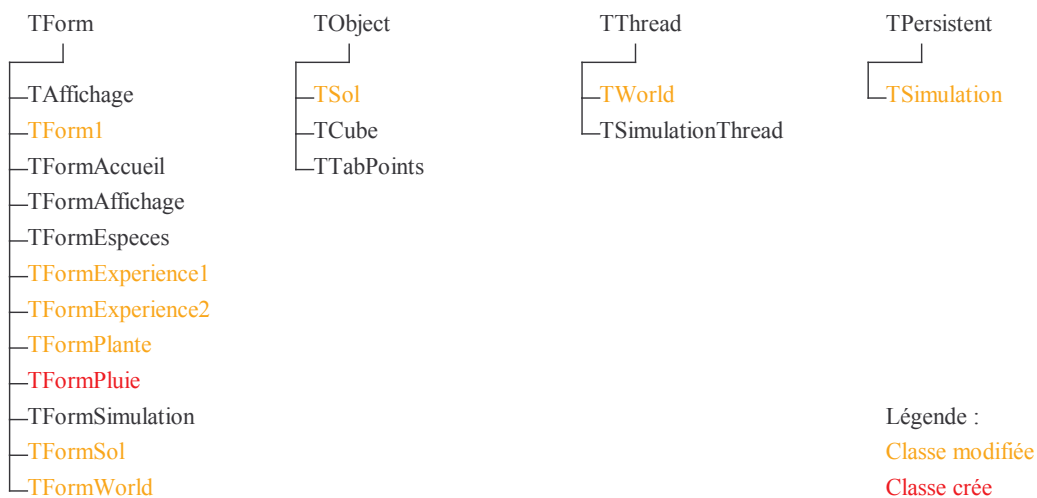


Figure 2 : Organisation des classes (suite)

B. Les répertoires

Dans un souci de clarté, chaque classe a été définie avec ses fonctions et procédures dans un fichier source différent dont le nom reprend le nom de la classe en remplaçant la première lettre « T » par la lettre « u ». Ces fichiers sont alors classés dans des répertoires pour mieux distinguer les modules. Les détails sur les répertoires et leur contenu sont décrits ci-dessous.

1. Main

Le répertoire « main » est le répertoire principal. Il contient le fichier projet reliant tous les autres fichiers sources, ainsi que les classes héritant de la classe « TForm ». Chacune de ces classes modélise une fenêtre d'interaction entre l'homme et la machine, et les actions qui sont liées. Enfin, ce répertoire comporte l'exécutable du programme et les fichiers « dll » du moteur graphique.

2. Textures

Le répertoire « textures » ne contient que trois fichiers. Ces fichiers sont des images utilisées lors du rendu graphique et appliquées sur les éléments affichés. Leur présence n'influe pas sur le résultat d'une simulation et ne fait qu'améliorer l'aspect graphique.

3. Ode

Contient essentiellement des procédures appelant les fonctions contenues dans le « dll » du moteur graphique ODE. Ces procédures peuvent être appelées par la suite par d'autres classes lors du calcul de l'affichage 3D. Les détails sur le moteur graphique ont été vus dans le chapitre II.B.

4. Photosynthèse

Classes utilisées lors du calcul de la réaction de photosynthèse par le houppier. Chaque houppier est composé de huit « TBranche » (voir 3.3.2.4) qui lui sont reliées grâce à des « TIdentificateurBranche ». Le calcul de la discrétisation de chaque branche en points est effectué par « TTabPoints » et chaque point est représenté par un « TVector ». Les projections dans le ciel de ces points sont effectuées de part « TCiel2 » (voir 3.2.2).

5. Diffusion

Ensemble des classes permettant de gérer les substances du sol ainsi que leur renouvellement et leur diffusion. Le sol est discrétisé en voxels dont « TVoxel » est la classe. Elle permet de garder les informations en quantité de ressource du sol, ainsi que les fonctions permettant aux autres classes de les récupérer. Les fonctions de gestion des ressources ainsi que des liens vers l'ensemble des voxels du sol sont donnés dans la classe « TSol ». La diffusion des substances dépendant de leur direction, un tableau des constantes de diffusion a été défini dans « TCube ».

6. Communication

Afin de permettre à plusieurs agents de communiquer entre eux, un modèle de communication point à point a été implémenté. Ainsi à chaque fois que deux agents voudront s'envoyer des messages, un canal de communication « TCanalCommunication » devra être ouvert entre eux. Ce canal permet alors de faire transiter des messages « TCommMessage ». Dans ces classes, des fonctions permettent de récupérer leur expéditeur, leur destinataire et le message transmis.

7. Agents

Ensemble des classes définissant les agents du système et leurs fonctions. Chacun d'entre eux est un descendant de « TObjetCommunicant » qui permet d'établir des canaux de communication. On en distingue 2 types, les agents composant l'écosystème dans lesquels on retrouve les plantes ainsi que l'environnement lui-même, et les agents organes qui à un niveau d'organisation inférieur représentent les différentes parties d'une plante. Ces classes sont très importantes car ce sont elles qui déterminent les actions des agents entre eux et représentent la plus grande partie du temps de calcul d'une simulation.

8. Génotype

Une analogie est effectuée entre les différents paramètres d'une plante dans notre simulation, et son génotype dans la nature. Ainsi, chaque plante est associée à un « TGenotypePlante » qui contient des liens vers les « TChromosomes » des organes de la plante. Chaque chromosome est ainsi composé de gènes représentant les paramètres de l'agent. Ces paramètres sont fonction du type de plante et définis dans le répertoire « Expériences » avant toute simulation.

9. Expériences

Ce répertoire contient l'ensemble des paramètres des expériences au format « txt » et classés dans plusieurs sous répertoires. Ainsi, le répertoire « experience1 » contient les fichiers principaux à charger en début d'expérience tandis que les paramètres du sol, des pluies et des plantes sont définis respectivement dans les répertoires « sol », « pluie » et « chromosome ». Des détails sur le format et l'utilisation de ces fichiers sont donnés dans le chapitre IV.

10. Autres

Contient l'ensemble des autres classes du projet. On notera ainsi « TIdentificateur » qui permet de donner un numéro d'identification unique à chaque objet. « TListAgent », « TListAgentOrgane » et « TListAgentPlante » qui contiennent des listes d'identificateurs d'objets. « TSimulation » qui est le thread principal de la plate-forme et permet d'exécuter les différentes actions séquentiellement. Et enfin « TWorld » qui s'occupe de l'affichage de tous les objets dans l'écosystème en appelant les procédures du moteur graphique.

IV. Manuel d'utilisation

A. Paramètres d'une expérience

À chaque expérience correspond un certain nombre de fichiers qui permettent de la définir. Ces fichiers sont au format « txt » et contiennent des données numériques ou alphanumériques représentant les paramètres. Les différents attributs de ces paramètres sont séparés par des retours à la ligne.

Pour chaque expérience, un premier fichier doit être créé dans le répertoire « experience1 ». Ce fichier contient les paramètres généraux de l'expérience ainsi que des liens vers les fichiers de génotype. Le tableau 1 présente les différents paramètres de ce fichier, le type attendu de données ainsi qu'une explication concernant ces attributs.

Paramètre	Format	Informations complémentaires
Visible	Booléen	Afficher les plantes à l'initialisation. (condition toujours vraie)
Période	Entier	Nombre de périodes entre chaque affichage.
Sauterelle	Booléen	Invasion de sauterelles.
Période Sauterelle	Entier	Période entre chaque invasion.
Caméra X1	Réel	Coordonnées cartésiennes de la caméra et angles de vue.
Caméra X2	Réel	
Caméra X3	Réel	
Caméra H1	Réel	
Caméra H2	Réel	
Caméra H3	Réel	
Nb plantes	Entier	
Sol X	Entier	Dimensions du sol.
Sol Y	Entier	
Sol Z	Entier	
Minéraux initiaux	Réel	
ParamSol	Fichier .txt	Chemin vers le fichier contenant les paramètres du sol.
ParamPluie	Fichier .txt	Chemin vers le fichier contenant les paramètres de pluviométrie.
Pour chaque plante :		
Etat Initial	Entier	Phase de la vie de la plante à l'initialisation. 0 : Graine, 1 : Croissance, 2 : Maturité, 3 : Mort
Mousse	Booléen	Présence de mousse sur la tige. (condition toujours fausse)
Plante X	Réel	Coordonnées de la plante.
Plante Y	Réel	
Plante Z	Réel	
Carbone	Réel	Quantité de carbone à l'initialisation.
Minéraux	Réel	Quantité de minéraux à l'initialisation.
Espèce	String	Nom de l'espèce.
ParamPlante	Fichier .txt	Chemin vers le fichier contenant les paramètres de la plante.

Tableau 1 : Paramètres généraux

En plus des paramètres généraux, d'autres fichiers permettent de déterminer les paramètres du sol, de la pluviométrie ainsi que de chaque espèce de plante de l'expérience. Les liens vers ces fichiers sont donnés en tant qu'attribut dans le fichier principal. Les tableaux 2, 3 et 4 présentent leurs paramètres respectifs.

Paramètre	Format	Informations complémentaires
Nb substances	Entier	Nombre de substances différentes dans le sol.
Pour chaque substance :		
Renouvellement	Réel	Vitesse de renouvellement de la substance. (négative pour un renouvellement et positive pour une dissipation)
Diffusion	Réel	Coefficient de diffusion de la substance dans le sol.
Quantité	Réel	Quantité en substance à l'initialisation.

Tableau 2 : Paramètres sol

Paramètre	Format	Informations complémentaires
Rosée	Réel	Renouvellement faible lors des rosées.
Fréquence	Réel	Probabilité d'une averse au cours d'un pas de temps.
Abondance	Réel	Abondance de cette averse.

Tableau 3 : Paramètres pluie

Paramètre	Format	Informations complémentaires
Type	Entier	Type de plante. 0 : Plante, 1 : Champignon
Pour chaque organe :		
ParamOrgane	Fichier .txt	Chemin vers le fichier contenant les paramètres de l'organe. Dans l'ordre pour une plante : Plante, Graine, Racine, Tige, Houppier. Pour un champignon : Plante, Graine, RacineChampi, Fleur.

Tableau 4 : Paramètres plante

Enfin, chaque fichier paramètre d'une plante est composé de liens vers les fichiers paramètres de ses organes. Les détails de leurs paramètres sont définis dans les tableaux 5 et 6.

Paramètre	Format	Informations complémentaires
Carbone dans racine	Réel	Proportion de carbone disponible dans la graine allouée à la racine.
Minéraux dans racine	Réel	Proportion de minéraux disponible dans la graine allouée à la racine.
Carbone dans tige	Réel	Proportion de carbone disponible dans la graine allouée à la tige.
Minéraux dans tige	Réel	Proportion de minéraux disponible dans la graine allouée à la tige.
Carbone dans houppier	Réel	Proportion de carbone disponible dans la graine allouée au houppier.
Minéraux dans houppier	Réel	Proportion de minéraux disponible dans la graine allouée au houppier.
Seuil de maturité	Réel	Seuil en matière structurale pour passer à l'état de maturité sexuelle.

Tableau 5 : Paramètres initialisation plante

Paramètre	Format	Informations complémentaires
Investissement	Réel	Proportion de matière allouée à la croissance initiale, le reste étant stocké sous forme de réserve.
Proportion	Réel	Proportion entre le rayon et la hauteur.
Distribution carbone	Réel	Seuil minimal de distribution en carbone.
Demande carbone	Réel	Seuil maximal de demande en carbone.
Distribution minéraux	Réel	Seuil minimal de distribution en minéraux.
Demande minéraux	Réel	Seuil maximal de demande en minéraux.
Croissance carbone	Réel	Seuil minimal en carbone pour croître.
Croissance minéraux	Réel	Seuil minimal en minéraux pour croître.
Rapport carbone	Réel	Proportion de carbone utilisée pour la croissance.
Rapport minéraux	Réel	Proportion de minéraux utilisée pour la croissance.
Vitesse croissance	Réel	Coefficient déterminant la vitesse de croissance.
Age max	Entier	Age maximal de l'organe.

Diminution carbone	Réel	Coefficient de diminution en carbone provoqué par des substances allélopathiques.
Diminution minéraux	Réel	Coefficient de diminution en minéraux provoqué par des substances allélopathiques.
Nb substances	Entier	Nombre de substances supplémentaires.
Pour chaque substance :		
Réaction	Entier	Entier permettant de déterminer le type de réaction induite par une substance allélopathique.
Production	Réel	Quantité de substance allélopathique produite par l'organe.
Extraction	Réel	Coefficient d'extraction en substance. (uniquement pour les organes racines)
Seuil	Réel	Seuil maximal d'extraction. (uniquement pour les organes racines)
Diminution	Réel	Coefficient de diminution en substance.
Augmentation	Réel	Coefficient d'augmentation en substance.
Distribution	Réel	Seuil de distribution en substance.
Seuil positif	Réel	Seuil minimal nécessaire à la réaction.
Seuil négatif	Réel	Seuil de réaction maximal.
Pour l'organe graine :		
Age min	Entier	Age minimal avant germination.
Carbone	Réel	Quantité de carbone.
Minéraux	Réel	Quantité de minéraux.
Pour l'organe racine :		
Axe vs Réseau	Réel	Proportion investie dans l'axe par rapport au réseau.
Longueur	Réel	Longueur de l'axe.
Pour l'organe tige :		
Sensibilité	Réel	Coefficient d'orientation de la tige.
Radius	Réel	Radius de chaque nouvel anneau.
Longueur max	Réel	Longueur maximale de la partie tige.
Pour l'organe houppier et fleur :		
Graines	Entier	Nombre de graines par cycle.
Carbone mure	Réel	Quantité de carbone nécessaire à une graine.
Minéraux mure	Réel	Quantité de minéraux nécessaire à une graine.
% Carbone	Réel	Proportion de carbone allouée à la reproduction.
% Minéraux	Réel	Proportion de minéraux allouée à la reproduction.
Pour l'organe racine champi :		
Sapro carbone	Réel	Coefficient de saprophytisme des matières en carbone.
Sapro minéraux	Réel	Coefficient de saprophytisme des matières en minéraux.

Tableau 6 : Paramètres organe

B. Exécution d'une simulation

1. Lancement de la simulation

Afin de lancer une simulation, les fichiers d'expériences dont le format est décrit dans le chapitre IV.A, doivent être définis. Une fois ceci effectué, lancez l'exécutable de la plate-forme. La figure 3 présente l'interface principale.

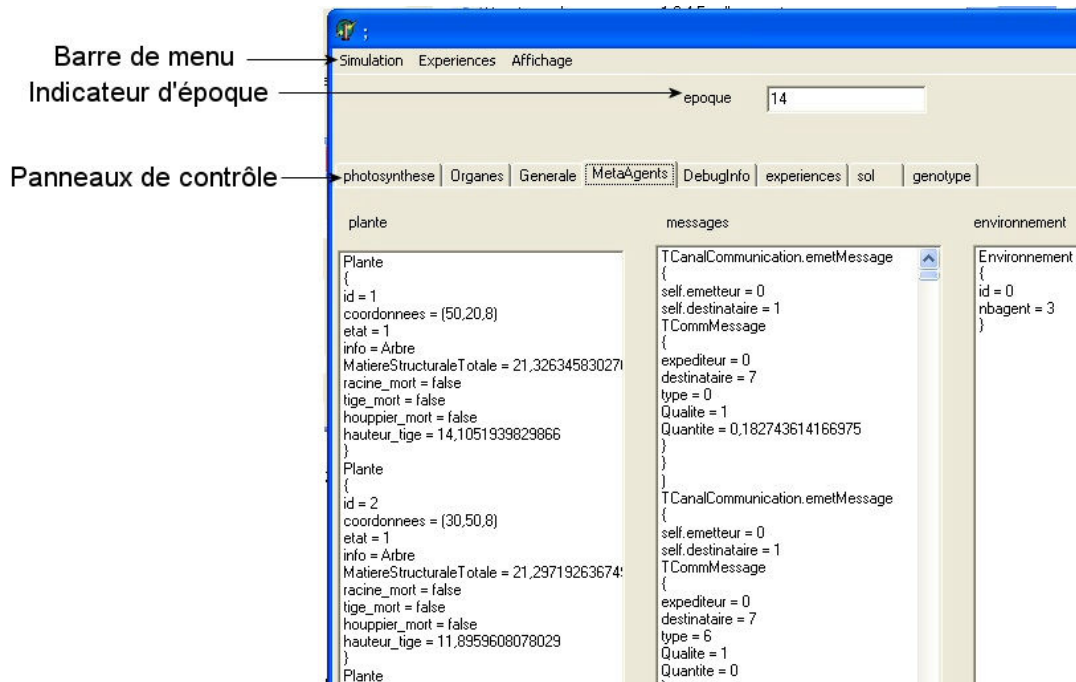


Figure 3 : Interface

Dans la barre de menu, cliquez sur « expérience1 » dans le sous menu « expériences ». Une fenêtre de navigation s'ouvrira afin que vous puissiez sélectionner le fichier d'expérience voulu. Une fois le choix effectué, les fenêtres des paramètres d'expériences s'affichent (voir figure 4). Il vous est alors possible de modifier ces différents paramètres à votre guise avant de lancer la simulation.

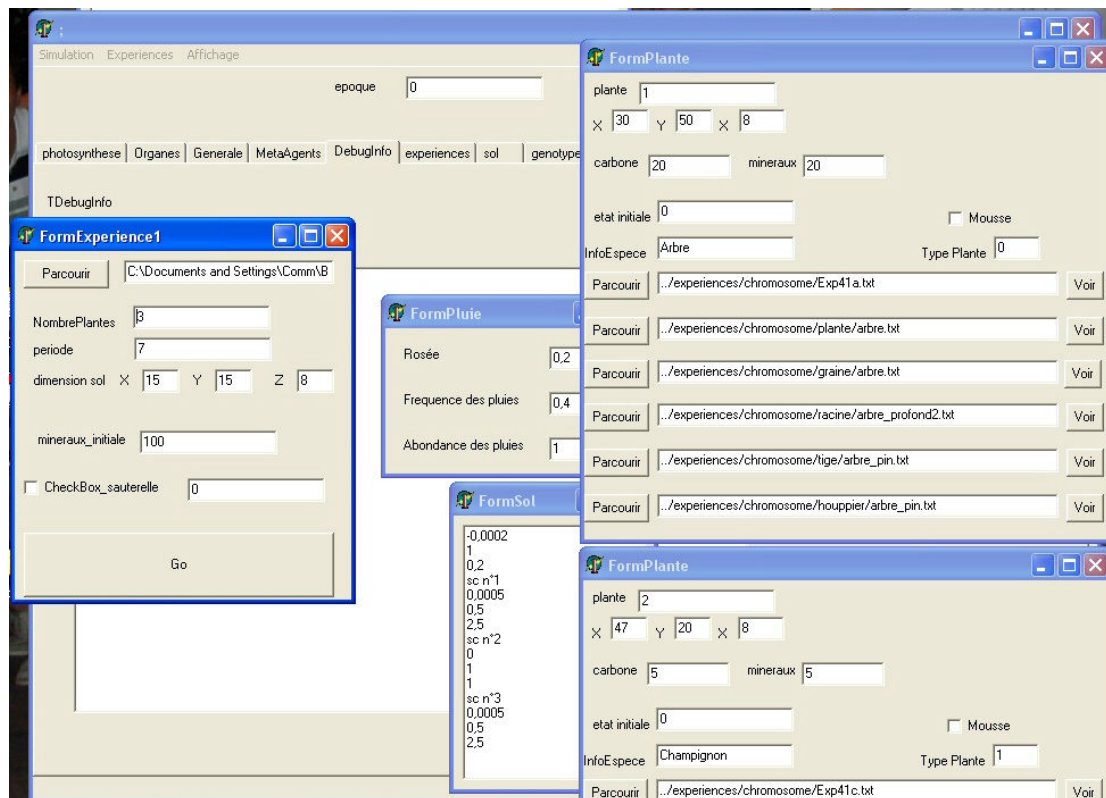


Figure 4 : Fenêtres des paramètres d'expériences

Pour lancer la simulation, cliquez sur le bouton « GO » dans « FormExperience1 ». La simulation sera alors initialisée à l'époque 0 avec les paramètres définis précédemment et une vue 3D de l'environnement s'affichera en haut à gauche de l'écran.

Pour faire avancer la simulation, deux solutions s'offrent alors à vous. Soit vous faites avancer la simulation d'un pas de temps en cliquant sur « simulation/next() » de la barre de menu (raccourci F1), soit vous choisissez d'aller à une époque spécifique en ouvrant le fenêtre de gestion de simulation (voir figure 5) grâce à « simulation/simulation ».



Figure 5 : Fenêtre de gestion de simulation

Si vous avez choisi la deuxième solution, sélectionnez juste l'époque souhaitée dans la case nombre d'époque et cliquez sur le bouton « ButtonRun ». Attention, l'époque souhaitée doit être plus grande que l'époque actuelle, il n'est pas possible de revenir en arrière au cours d'une simulation.

2. Gestion de l'affichage

La représentation 3D de l'environnement n'est calculée que si la fenêtre d'affichage n'a pas été fermée. Dans le cas contraire, uniquement l'évolution de l'environnement à chaque pas de temps est déterminée. Afin de réafficher la vue 3D, il faut cliquer dans la barre de menu sur « afficher/create() ». Il est aussi possible de déterminer dans les paramètres d'une expérience un intervalle de temps entre chaque affichage (voir VI.A).

Lorsque la représentation graphique est disponible, il est possible de s'y déplacer pour changer l'angle de vue. Tous les changements sont faits à la souris, ainsi un clic gauche change la direction de la caméra tandis qu'un clic droit modifie ses coordonnées sur un plan horizontal. Pour modifier ses coordonnées sur un plan vertical, il faut cliquer en même temps sur les boutons gauche et droit de la souris.

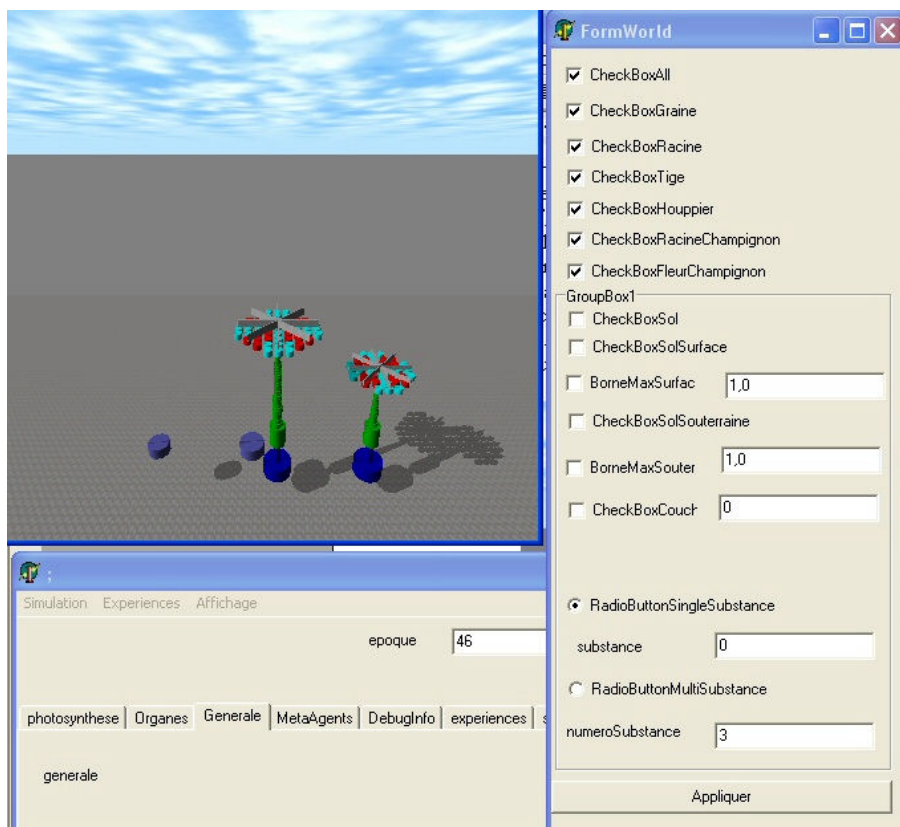


Figure 6 : Fenêtre de gestion de l'affichage

Afin de pouvoir mieux se retrouver dans la représentation graphique, une fenêtre de gestion de l'affichage est disponible à partir de la barre de menu dans « affichage/uworld ». Par défaut, tous les agents de l'environnement sont affichés et les voxels du sol cachés, mais chaque élément graphique peut être masqué ou affiché à loisir (voir figure 6 et tableau 7). Ainsi lorsque les voxels du sol sont affichés, la quantité de substance qu'ils contiennent est indiquée par leur couleur. En cochant les cases « BorneMaxSouterraine » ou « BorneMaxSurface », il est alors possible de déterminer la valeur référence en substance à partir de laquelle la couleur est calculée. Une quantité inférieure à cette référence rend le voxel rouge tandis qu'une valeur supérieure rend le voxel bleu clair.

Boîtes à cocher	Action
CheckBoxAll	Affiche/Masque toutes les formes.
CheckBoxGraine	Affiche/Masque les graines.
CheckBoxRacine	Affiche/Masque les racines des plantes.
CheckBoxTige	Affiche/Masque tous les cylindres composant les tiges.
CheckBoxHouppier	Affiche/Masque l'ensemble des houppiers.
CheckBoxRacineChampignon	Affiche/Masque les racines des champignons
CheckBoxFleurChampignon	Affiche/Masque la partie reproductrice des champignons.
CheckBoxSol	Affiche/Masque les voxels du sol.
CheckBoxSolSurface	Affiche/Masque les voxels représentant l'humus.
BorneMaxSurface	Choix de la valeur référence en substance des voxels de surface.
CheckBoxSolSouterraine	Affiche/Masque les voxels souterrains.
BorneMaxSouterraine	Choix de la valeur référence en substance des voxels souterrains.
CheckBoxCouche	Permet d'afficher un niveau souterrain et de masquer les autres.
RadioButtonSingleSubstance	Choix de la substance dont la quantité est affichée.
RadioButtonMultiSubstance	Affichage de la quantité de plusieurs substances.

Tableau 7 : Boîtes à cocher de la fenêtre de gestion de l'affichage.

3. Consultation des résultats et débogueur

La plate-forme de simulation ne permet pas seulement une représentation graphique d'une expérience, mais est aussi composée de panneaux de contrôle qui permettent de retrouver l'ensemble des paramètres de chaque agent à tout moment. Ces panneaux ont ainsi servi à traquer les différents bugs et servent encore à comprendre certains comportements inattendus lors des simulations.

Parmi ces panneaux on retrouve :

- Un panneau de contrôle de l'affichage de photosynthèse qui affiche la liste de tous les points projetés dans le ciel, ainsi que les coordonnées des points du houppier des plantes avec leur réception de lumière associée (voir figure 7 haut gauche).
- Un panneau sur les organes qui donne les informations propres à chaque organe telles que la quantité en matière structurale ou les réserves en ressource (voir figure 7 haut droit).
- Un panneau général pour l'affichage des époques et changements d'états.
- Un panneau de MétaAgents donnant des informations sur les agents plantes ainsi que les messages transmis entre agents (voir figure 7 bas gauche).
- Un panneau des ressources souterraines qui affiche la quantité de chaque voxel en chaque substance (voir figure 7 bas droit).

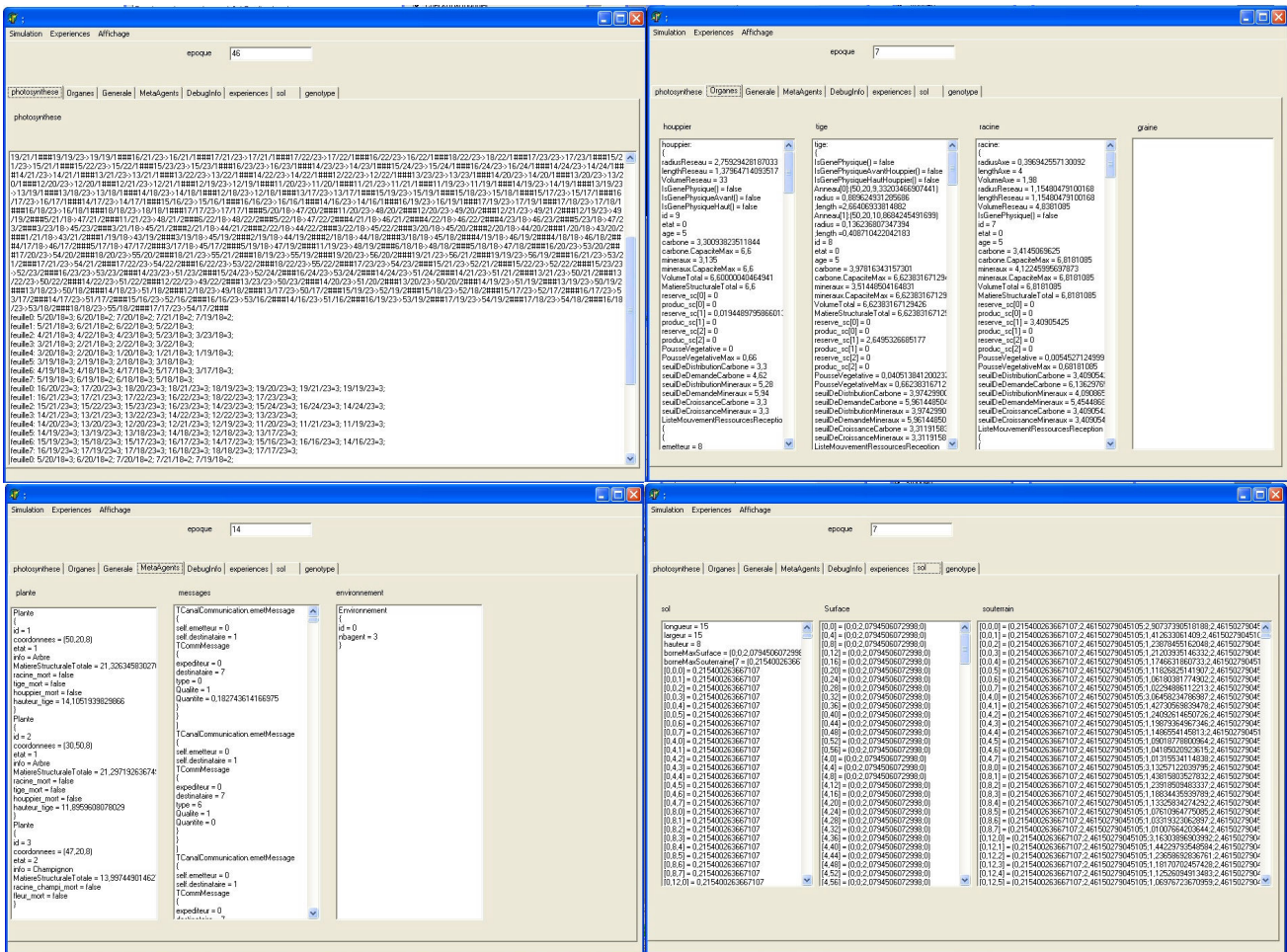
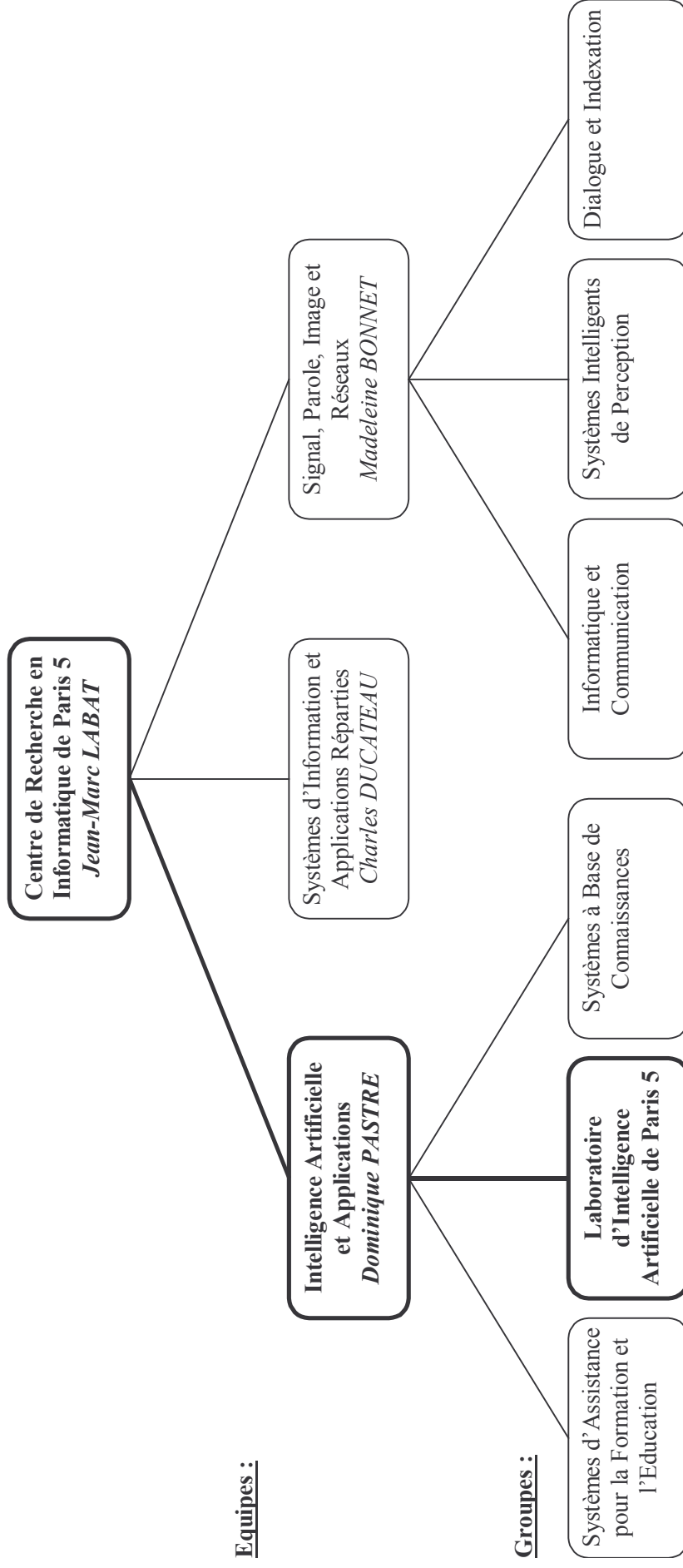


Figure 7 : Fenêtres de contrôle

V. Glossaire

Allocation mémoire :	Réservation ou attribution d'une partie de la mémoire vive à un programme.
Encapsulation :	Mécanisme consistant à rassembler les données et les méthodes au sein d'une structure en cachant l'implémentation de l'objet, c'est-à-dire en empêchant l'accès aux données par un autre moyen que les services proposés. L'encapsulation permet de garantir l'intégrité des données contenues dans l'objet.
Héritage :	Principe permettant de créer une nouvelle classe à partir d'une classe existante. La classe dérivée contient les attributs et les méthodes de sa superclasse. L'intérêt majeur de l'héritage est de pouvoir définir de nouveaux attributs et de nouvelles méthodes pour la classe dérivée, qui viennent s'ajouter ou se substituer à ceux et celles héritées.
Librairie graphique 3D :	Bibliothèque de fonctions permettant de gérer l'affichage d'objets dans un univers 3D.
Liste dynamique :	Liste dont la taille évolue en fonction des éléments qui la compose. À opposer à la liste statique qui sera toujours de même taille quelque soit son nombre d'éléments.
Moteur graphique 3D :	Programme qui permet de gérer l'ensemble des objets d'une scène, leurs déplacements, leurs collisions éventuelles, etc. Le moteur 3D utilise également une librairie graphique 3D pour l'affichage.
Plate-forme :	Ensemble de logiciels facilitant le développement ou l'exploitation de programmes.
Polymorphisme :	Caractérise la possibilité de définir plusieurs fonctions de même nom mais possédant des paramètres différents, si bien que la bonne fonction sera choisie en fonction de ses paramètres lors de l'appel.
Script :	Petit programme exécuté par une application.
Thread :	Tâche ou processus léger correspondant à l'exécution d'un petit programme, ou d'une routine (morceau) d'un programme plus gros, indépendamment de celui-ci (on parle alors de multithread).

Annexe D : Organigramme du CRIP5



Bibliographie

- [1] J.Bouchon, Ph. De Reffye, D.Barthélémy – « Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux », INRA éditions – 1997.
- [2] Lindenmayer A. – « Mathematical models for cellular interaction in development, Parts I and II », *Journal of Theoretical Biology* 18 – 1968.
- [3] Fournier C., Andrieu B. – « ADEL-maize : an L-system based model for the integration of growth processes from the organ to the canopy », INRA unité de bioclimatologie – 1999.
- [4] Mech R., Prusinkiewicz P. – « Visual models of plants interacting with their environment », University of Calgary – 1996.
- [5] Changhui Peng – « Growth and yield models for uneven-aged stands: Past, Present and Future », *Forest ecology and management* – 1999.
- [6] Jacques Ferber – « Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective » – 1995.
- [7] Jean-Pierre Briot, Yves Demazeau – « Principes et architectures des systèmes multi-agents », Hermès – 2001.
- [8] Jean Fack, Grégory Gallet – « Environnement multi agents de simulation d'évolution de communautés de plantes » – 2002.
- [9] Sikora S., Steinberg D., Lattaud C., Fournier C., Andrieu B. – « Plant growth simulation in virtual worlds : towards online artificial ecosystems » – 1999.
- [10] Sikora S., Steinberg D., Lattaud C. – « Intergration of simulation tools in on-line virtual worlds – 2000.
- [11] Lattaud C. – « Long-term competition for light in plant simulation, in the 6th Genetic and Evolutionary Computation » Conference GECCO-2003, to be published – 2003.
- [12] Bas Roels – « Competition and facilitation in plant communities » – 2001.
- [13] Elroy L. Rice – « Allelopathy » – 1984.
- [14] S.W.Mattner – « The role of allelopathy in the control of soilborne diseases » – 2001.
- [15] Catherine A. Preston, Ian T. Baldwin – « Positive and negative signals regulate germination in the post-fire annual », *nicotiana attenuata* – 1999
- [16] Alejo Carballeira, Manuel J. Reigosa – « Effects of natural leachates of acacia dealbata link in galicia » – 1999.
- [17] Chi-Ming Yang, Chyoung-Ni Lee, Chang-Hung Chou – « Effects of three allelopathic phenolics on chlorophyll accumulation of rice (*Oryza sativa*) seedlings : Inhibition of supply-orientation » – 2002.
- [18] Philippe Choler, Richard Michalet, Ragan M. Callaway – « Facilitation and competition on gradients in alpine plant communities » – 2001.
- [19] D.B.Vandermaast, D.H. Van Lear, B.D.Clinton – « American chestnut as an allelopath in the southern appalachians » – 2002.
- [20] Tsutomu Ohno – « Oxidation of phenolic acid derivatives by soil and its relevance to allelopathic activity » – 2000.
- [21] Maria Olofsson – « Rice - A step toward use of allelopathy » – 2001.
- [22] Norman L. Klocke, Gary W. Hergert – « How Soil Holds Water » – 1990.
- [23] Dorota Z. Haman, Forrest T. Izuno – « Soil Plant Water Relationships » – 1993.
- [24] http://sdces.sdstate.edu/ces_home/CCA_manual/soilwater.html.
- [25] Patrick Boiron – « Organisation et biologie des champignons » – 1996.
- [26] Ted St. John – « The importance of Mycorrhizal Fungi and Other Beneficial Microorganisms in Biodiversity projects » – 1992.
- [27] A Juhász, J Balogh, Z Csintalan, Z tuba – « Carbon sequestration of the poikilohydric moss carpet vegetation in semidesert sandy grassland ecosystem » – 2002.
- [28] Jan-Peter Frahm – « Climatic habitat differences of epiphytic lichens and bryophytes » – 2002.
- [29] Michel Lamy – « La Biosphère » – 1996.
- [30] Nadine Richard – « Description de comportements d'agents autonomes évoluant dans des mondes virtuels » – 2001.

- [31] François Bousquet, Christophe Le Page, Jean-Pierre Müller – « Modélisation et simulation multi-agent » – 2002.
- [32] P. S. Rose – « Mutualistic biodiversity networks » – 1997.
- [33] Francis Hallé – « Eloge de la plante », Seuil – 1999.
- [34] Bruce A. Hungate – « Mutualism » – 2001.
- [35] Randy Molina, Thomas O'Dell, Daniel Luoma, Michael Amaranthus, Michael Castellano, Kenelm Russell – « Biology, ecology, and social aspects of wild edible mushrooms in the forests of the pacific northwest » – 1993.
- [36] Shannon M. Berch, Alan M. Wienszyk – « Ecological description and classification of some pine mushroom habitat in British Columbia » – 2001.
- [37] Sylvain Lerat – « Etude des relations source/puits de carbone dans la symbiose endomycorhizienne à arbuscules » – 2003.
- [38] B. Boullard – « Guerre et paix dans le règne végétal » – 1990.
- [39] Alexis Drogoul – « De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes » – 1993.
- [40] Edgar Morin – « La méthode, tome 1 » – 1977.
- [41] Shannon, Weaver – « A mathematical theory of communication » – 1948.