

# Rapport de Stage

Vincent GARDEUX

28 août 2006

Sous la direction de Mr Claude Lattaud.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>4</b>
2.1	Physiologie des Plantes . . . . .	4
2.2	Modélisation . . . . .	5
2.2.1	Morphologie et L-Systems . . . . .	5
2.2.2	Physiologie et Transport-Resistance . . . . .	6
2.3	Vie Artificielle . . . . .	7
2.4	Evolution Artificielle . . . . .	7
2.5	Les Systèmes Multi-Agents . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Modélisation</b>	<b>10</b>
3.1	Simulateur . . . . .	11
3.2	Environnement . . . . .	12
3.3	Ciel . . . . .	12
3.4	Sol . . . . .	12
3.5	Plante . . . . .	13
3.6	L-Agent . . . . .	15
3.7	Génotype . . . . .	15
3.8	Phénotype . . . . .	16
3.9	Assimilation des ressources . . . . .	16
3.9.1	Photosynthèse . . . . .	16
3.9.2	Absorption d'azote . . . . .	17
3.9.3	Absorption d'eau . . . . .	17
3.10	Croissance . . . . .	18
3.11	Evolution . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Implémentation</b>	<b>18</b>
4.1	Détails techniques . . . . .	19
4.2	Problèmes rencontrés . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Expérimentations</b>	<b>21</b>
5.1	Morphologie issue du L-System . . . . .	21
5.2	Tropisme . . . . .	22
5.3	Manque de ressources . . . . .	22
5.4	Pluviométrie . . . . .	23
5.5	Température . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>24</b>
6.1	Morphologie . . . . .	24
6.2	Tropismes . . . . .	24
6.3	Besoins environnementaux . . . . .	25
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>26</b>

# 1 Introduction

La recherche en informatique, et plus particulièrement sur la thématique de la vie artificielle est un domaine particulièrement exploité de nos jours. La vie artificielle est le symbolisme des interactions entre divers agents et leurs réponses face à leur environnement. Ses buts sont multiples. En effet, elle permet entre autre de se pencher sur les processus de la vie par la gestion virtuelle d'un environnement. Mais elle peut avoir également un aspect ludique en créant des mondes virtuels dans lesquels les utilisateurs peuvent entrer en interaction avec leur environnement. Ces 2 points sont d'ailleurs abordés dans notre étude.

Le laboratoire de recherche LIAP5 de l'Université de Paris 5 travaille sur ces méthodes d'évolution et plus particulièrement sur l'évolution de plantes dans un environnement simulé. L'équipe dirigée par Mr Claude Lattaud se penche actuellement sur un modèle de simulation de plantes sur PC et cherche à étendre son modèle sur une plateforme portable.

L'objectif de ce stage est la réalisation d'une plateforme de simulation de croissance de plante individuelle sur téléphones portables. Le principe étant de pouvoir paramétrer différents facteurs agissant sur les plantes (chaleur, luminosité, etc...) via une interface utilisateur et de pouvoir échanger des graines entre cellulaires ou avec la plateforme PC via une interface réseau. Ceci doit être réalisé en s'appuyant sur des outils relatifs à la vie artificielle tels que les L-Systems ou les algorithmes évolutionnaires afin de valider l'outil final vis à vis du modèle existant sur PC.

Le portage de ce modèle sur plateforme mobile est nécessaire pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'ouverture du projet en dehors de l'équipe permettrait d'étendre le panel de tests déjà existants et de créer de nouvelles plantes inédites auxquelles nous n'aurions pas pensé. Ensuite, l'échange de graine renforce cette optique de diversification en rajoutant un paramètre évolutionnaire. Finalement, cette application peut également être considérée d'un point de vue ludique et donc éventuellement être commercialisée.

Nous verrons, dans un premier temps, les avancées et les recherches effectuées dans ce domaine et l'utilité de réaliser une telle plateforme dans l'intérêt de la communauté. Puis nous étudierons un modèle viable pour répondre à ces demandes. Ce modèle a été réalisé pour la plateforme PC et adapté pour être compatible avec la plateforme mobile dont les performances sont moindres. Ensuite, nous nous attacherons à la partie technique de la réalisation du logiciel et les problèmes d'implémentation rencontrés. Et enfin nous verrons les différents tests qui ont été effectués sur cette plateforme ainsi que les résultats qu'ils peuvent apporter notamment pour valider notre modèle.

## 2 Etat de l'art

### 2.1 Physiologie des Plantes

Certains mécanismes physiologique des plantes sont aujourd'hui connus. Dans [3], on apprend de quelle manière se nourrissent les plantes. Une cellule végétale est constituée comme toute cellule animale mais dispose aussi de chloroplastes qui permettent la photosynthèse ainsi que d'une vacuole représentant environ 80% de la cellule. Cette vacuole est remplie d'eau et de sels minéraux et c'est la pression turgescente qu'elle provoque dans la cellule qui permet entre autre le maintien de la plante.

Le sol quant à lui, contient la plus grande partie de l'eau et des sels minéraux utilisés pour le développement de la plante.

De plus, la température du sol diminue l'absorption de l'eau si elle est trop faible ( $<5-10^{\circ}\text{C}$ ).

La sève est une solution minérale, elle va des racines aux feuilles où elle s'évapore en grande partie (phénomène de transpiration) ou bien redescend sous forme de sève élaborée (chargée par la photosynthèse).

La plante absorbe par les racines l'azote présent dans le sol sous forme minérale. Il est présent à environ 1g/kg de terre et seulement 1 à 2 % sous forme minérale. Le reste est sous forme d'humus. L'humus est minéralisé en grande partie par les champignons et les bactéries présentes dans le sol.

L'azote ainsi absorbé est réduit dans les racines sous forme de  $\text{NO}_2^-$  ensuite exporté dans la plante pour synthétiser des molécules azotées ou sont stockés dans les graines.

La photosynthèse permet une réduction du  $\text{CO}_2$  absorbé en substance carbonées. L'énergie utilisée est issue de la lumière du soleil captée par la chlorophylle présente dans les chloroplastes.



$\text{CH}_2\text{O}$  étant un glucide.

La température a une action positive sur la photosynthèse jusqu'à  $30^{\circ}\text{C}$  ensuite

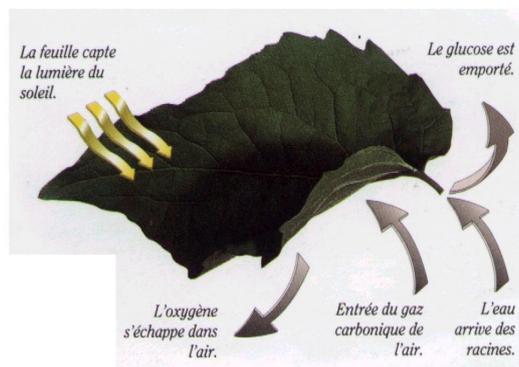


FIG. 1 – Principe de photosynthèse

elle est de plus en plus négative. De même une insuffisance en eau ou une teneur en oxygène dans l'air trop élevée implique une baisse de l'activité photosynthétique.

De même, certains mécanismes liés au développement des plantes sont abordés dans [4]. On voit qu'une tige est d'abord constituée d'une membrane primaire, puis de la cellulose se développe en couche successive sur celle-ci, impliquant la croissance de la plante.

Les zones d'élongation se situent au bout des tiges et des racines : dans les apex. On définit par tropisme la réaction d'orientation des organes de la plante. Par exemple le phototropisme oriente la plante en fonction de la luminosité, la zone de stimulus de la lumière étant située à l'extrémité de l'apex. On a également le géotropisme (ou gravitropisme) qui oriente les racines. Le chimiotropisme quant à lui, orientera les racines en fonction de la composition chimique, de l'humidité ou de l'aération du sol.

## 2.2 Modélisation

### 2.2.1 Morphologie et L-Systems

D'un point de vue informatique, le traitement de toutes ces données est un problème complexe. Ainsi, la modélisation de plantes dans des mondes virtuels est souvent simplifiée au maximum. Par exemple, les L-Systems de A. Lindenmayer présentés dans [2] permettent une représentation graphique des plantes mais sans considération physiologique. Les L-Systems sont basés sur les grammaires formelles de Chomsky et comprennent :

- Un alphabet  $A$  : l'ensemble des variables du L-System.
- Un axiome de départ (un état initial)  $\omega$ .
- Un ensemble de règle, noté  $P$ , de reproduction des symboles de  $A$ .

Un L-System est alors noté  $A, \omega, P$ .

Le principe de la tortue se définit par un état tortue :  $(x, y, \alpha)$  avec  $(x, y)$  la position de la tortue et  $\alpha$  la direction de la tortue. On définit ensuite 2 paramètres :  $d$  le step size, c'est-à-dire la longueur d'un pas et  $\delta$  l'angle increment c'est-à-dire l'angle de rotation de la tortue. Puis on peut appliquer un certain nombre de commandes tels que

F pour avancer tout droit de  $d$  en traçant une ligne.

f pour avancer tout droit de  $d$  sans tracer de ligne.

+ pour tourner à gauche d'un angle  $\delta$

- pour tourner à droite d'un angle  $\delta$

Ce qui permet à la tortue de se retrouver dans un nouvel état après chaque action.

Au final, après  $n$  itérations des règles  $p_i$ , la chaîne initiale  $\omega$  est modifiée puis lue par la tortue pour former la représentation graphique.

On peut également étendre le principe de la tortue pour la réalisation de plantes en 3 dimensions assez simplement en se plaçant dans un repère direct.

Il existe diverses évolutions des L-Systems permettant de réaliser des Plantes de plus en plus réalistes et de plus en plus complexes. Par exemple les "Bracketed OL Systems" utilisent les "[" pour mettre l'état courant en pile et "]" pour se placer dans le dernier état de la pile.

On a également le concept de L-Systems "context-sensitive" qui permet de spécifier un ordre obligatoire des lettres pour appliquer certaines règles.

On peut également appliquer des mesures de probabilités aux règles afin de réaliser des L-Systems stochastiques dans lesquels toutes les règles ne s'appliquent pas forcément à chaque itération.

Enfin, on peut paramétrer les L-Systems en intégrant différentes fonctions dans les règles de grammaires.

On peut même d'ailleurs trouver différents exemples de L-Systems et de leur représentation en définissant quelquefois des L-Systems caractéristiques de plantes réelles.



FIG. 2 – Exemples de L-Systems

### 2.2.2 Physiologie et Transport-Resistance

En parallèle de cette méthode de représentation de plante, on trouve des modèles de gestion de nutrition de la plante. Par exemple, il existe le modèle Transport-Resistance de J.H.M. Thornley présenté dans [5]. C'est un modèle visant à définir les moyens d'allocation des substrats (Carbone, Azote, Phosphore) dans une plante. Il définit le transport de ces substrats ainsi que leur conversion chimique.

Il traite entre autres de 3 phases principales :

- La "matière sèche structurelle" (Structural dry matter) qui est produit par la croissance et perdue en détrit.
- La photosynthèse et l'absorption d'azote par les racines.
- Le transport des substrats de carbone et d'azote en définissant une résistance pour chaque substrat pour la tige et la racine.

Ainsi, l'idée principale serait de lier toutes ces données en un seul modèle représentant l'évolution d'une plante, sa reproduction, sa réaction à son environnement tout en gardant une représentation graphique avoisinant le réel. Il faudrait

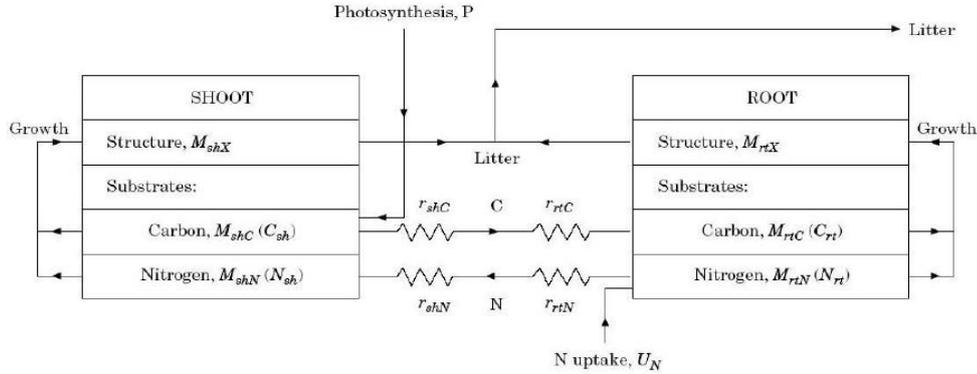


FIG. 3 – Schéma de Transport-Resistance

également gérer des populations de plantes et de les mettre en compétitions et c'est à celà qu'est destiné le modèle défini par l'équipe de Claude Lattaud. Ainsi, il s'appuie également sur les principes d'évolution tels que les algorithmes génétiques et les systèmes multi-agents.

### 2.3 Vie Artificielle

Le thème de la vie artificielle est abordé dans [14] et défini par Rennard comme suit.

L'approche de la Vie Artificielle est essentiellement synthétique, c'est à dire de bas en haut. Son objectif est l'étude de propriétés émergentes au niveau global, en haut, uniquement à partir d'entités et de propriétés définies au niveau local, en bas. Ainsi, les observations sont portées sur des populations d'entités plutôt que sur des individus seuls. Il peut donc émerger de ces groupes des comportements globaux inédits n'étant pas commandés par des propriétés individuelles.

L'évolution de ces populations s'effectue selon une adaptation des principes du Néo-Darwinisme à des modèles artificiels de l'évolution. Ainsi, les notions de génotype et de phénotype sont adaptées au même titre que la mutation et le croisement. Les individus des populations, décrits par leur phénotype et définis par leur génotype, se reproduisent artificiellement, formant des espèces, qui elles-mêmes évolueront en subissant des processus évolutionnistes.

La Vie Artificielle représente l'étude de l'ensemble des phénomènes liés à l'évolution des populations d'entités artificielles, comme l'apparition de niches écologiques, l'émergence de comportements coopératifs, et d'une manière générale l'émergence de propriétés globales des populations.

### 2.4 Evolution Artificielle

Les algorithmes génétiques introduits par J.H. Holland, sont décrits dans [10]. Ils appartiennent à une famille d'algorithmes appelés métaheuristiques dont le but est d'obtenir une solution approchée, en un temps correct, à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte pour le résoudre.

La classe des algorithmes évolutionnistes (*Evolutionnary Algorithm*) regroupe toutes les métaheuristiques basées sur des **populations** et qui utilisent des mécanismes inspirés de l'évolution biologique comme la reproduction, la mutation ou la sélection naturelle basée sur le niveau d'adaptation (la **fitness**).

Un problème peut être catégorisé par son espace de solution. Chaque élément de cet espace constitue une solution possible. L'idée des algorithmes évolutionnistes est de s'inspirer du modèle de la théorie de l'évolution proposée par Darwin pour faire évoluer une population initiale composée par un ensemble de solutions potentielles, les **individus** (souvent d'eterminés aléatoirement), sur plusieurs générations.

Les algorithmes génétiques (*Genetic Algorithm*) sont les types d'algorithmes évolutionnistes les plus connus et les plus populaires. Ils consistent à faire évoluer une population d'individus sur plusieurs générations en les croisant entre eux et en ne gardant que ceux qui résolvent le mieux un problème donné. Les individus sont généralement représentés par une suite de valeurs (tableau).

Les algorithmes génétiques sont composés des opérations suivantes :

– **Sélection**

La sélection consiste à choisir quels seront les individus qui seront croisés pour former la nouvelle génération. Cette sélection est dépendante de la fitness des individus.

– **Croisement**

Les individus sont croisés deux à deux pour donner les individus de la génération suivante. Ce croisement à généralement lieu en découpant les deux parents au même endroit et en concaténant les sous-chaînes obtenues.

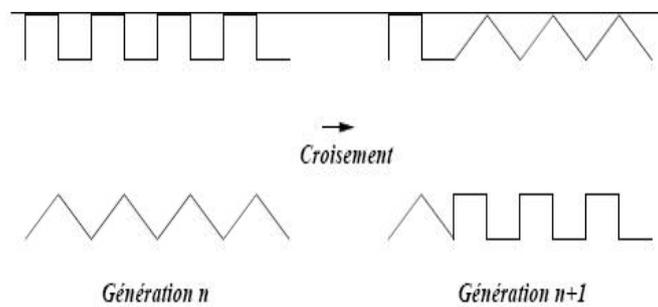


FIG. 4 – Exemple de croisement de 2 chaînes

– **Mutation**

Afin de sortir des minima locaux dans lesquels l'algorithme pourrait stagner, une mutation est faite, avec une faible probabilité. Celle-ci a généralement lieu en swappant deux parties d'un individu ou en remplaçant une valeur du tableau représentant l'individu, par exemple en inversant un bit.

Dans notre problème, les algorithmes génétiques sont utilisés pour faire évoluer la morphologie de nos plante en croisant et en mutant nos L-Systems. Il a donc fallu adapter le principe des algorithmes génétiques à notre problème. Pour simplifier, nous avons choisis pour l'instant, de ne prendre en compte que les règles de nos L-Systems en tant que chaînes et donc en tant qu'individus

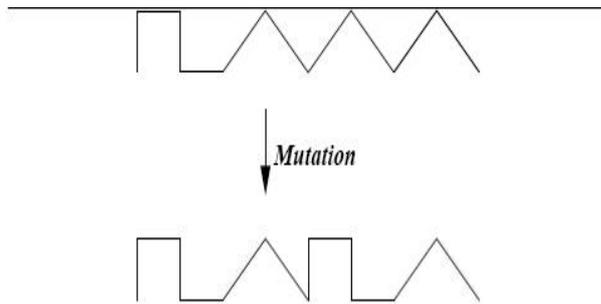


FIG. 5 – Exemple de mutation d'une chaîne

dans le principe des algorithmes évolutionnistes.

## 2.5 Les Systèmes Multi-Agents

Les systèmes multi-agents quant à eux, sont définis par G. Weiss dans [8] comme une population d'entités autonomes en interactions. Ces entités étant appelées agents. Un agent est autonome, il dispose de senseurs pour prendre des données de son environnement et d'effecteurs pour agir sur celui-ci. L'interaction avec les autres agents ou les humains les affectent tandis qu'ils poursuivent leur but.

Ainsi, un ensemble de plantes peut être considéré comme un ensemble d'agents, chaque plante entrant en compétition avec les autres agents pour s'appropriier les ressources. De même que chaque plante peut être considérée comme un "agent double" en possédant une partie "Shoot" (la partie aérienne de la plante) et une partie "Root" (la partie souterraine) communiquant et s'échangeant des ressources.

La création d'un modèle regroupant l'ensemble de ces fonctionnalités n'a pas été encore abordé et c'est le but de notre travail.

### 3 Modélisation

Notre objectif est la représentation de plantes dans un espace 3D borné en respectant un certain nombre de règles et de contraintes.

En raison de la performance des plateformes mobiles, nous choisissons d'appliquer notre modèle sur une unique plante et donc d'écartier les possibilités de compétitions entre différentes plantes.

Nos plantes virtuelles doivent assimiler des minéraux et de l'eau par leurs racines et capter de la lumière par leurs feuilles afin de photosynthétiser du carbone. Ces ressources permettront ensuite de produire de la biomasse. Nous définissons chaque plante par un code génétique caractérisant sa morphologie et ses capacités physiologiques.

On est d'ailleurs en présence d'un système multi-agents dans le sens où l'on peut considérer la plante comme étant une concaténation de 2 agents communiquant via un modèle de Transport-Resistance enrichi et en interaction avec d'autres plantes donc d'autres agents.

Nous appelons L-Agent un agent qui se comporte en partie comme un L-System. Un jeu important de ses variables est stocké dans une chaîne de caractères sur laquelle agissent les méthodes traditionnelles d'un agent ainsi que les règles d'un L-Système. Cet hybride entre agent et L-système permet de profiter des avantages de chacune des deux approches : l'agent traite de manière simple les interactions avec l'environnement extérieur (notamment l'assimilation des ressources) et gère la physiologie intérieure (notamment traitement et distribution de ces ressources) le L-System représente une morphologie ramifiée et décrit les règles selon lesquelles cette morphologie s'agrandit (en fonction des ressources). Suivant le modèle Transport-Resistance enrichi, une paire de L-agents forme une plante. L'un représente ses racines (root), l'autre sa partie aérienne (shoot). Chacun assimile des ressources : carbone, eau et minéraux, qu'il échange à la suite avec son binôme. A part cet échange, chaque L-agent vit une vie indépendante.

Le modèle Transport-Resistance initial prend en compte l'assimilation des ressources C et N mais pas l'influence de l'eau dans la plante. Or, celle-ci est prépondérante et nous avons donc dû enrichir ce modèle. La plante absorbe donc maintenant de l'eau du sol et ce sont les minéraux dissout dans cette eau qu'elle entraîne avec elle. De même, dans la plante, c'est l'eau qui circule et qui entraîne les ressources avec elle. En voici le schéma récapitulatif global : Nous ajoutons également au modèle des phénomènes climatiques tels que la pluie, l'évaporation de l'eau du sol et la température. La température a également un rôle à jouer dans la croissance de la plante car c'est elle qui régule le phénomène de transpiration par la tige. La transpiration dans nos plantes virtuelles sert à faire monter les réserves présentes dans les racines jusqu'aux feuilles.

Le rôle global de notre modèle étant cerné, voici plus en détail les différentes parties qui le composent.

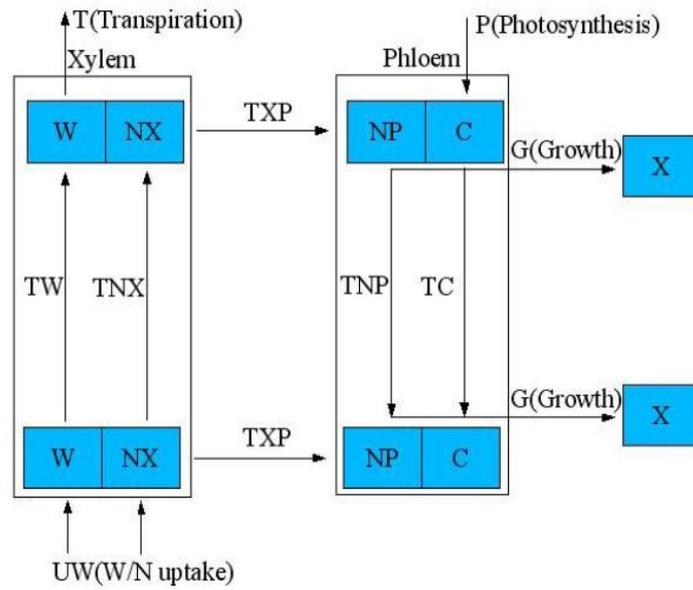
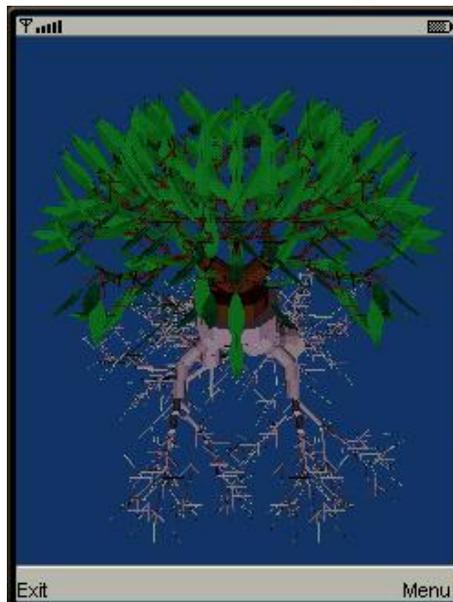


FIG. 6 – Modèle Transport-Resistance enrichi

### 3.1 Simulateur

Le simulateur permet d'exécuter des pas de temps de l'environnement pour le modifier. Il peut afficher cette évolution via une interface graphique ou faire la simulation sans représentation.



### 3.2 Environnement

L'environnement est composé des objets ciel, terre et plante. Lorsqu'il reçoit un pas de temps de la part du simulateur il :

- exécute un pas du ciel
- exécute un pas du sol
- place les nouvelles plantes dans l'environnement (graines mûres par exemple)
- exécute un pas pour chaque plante
- supprime les plantes mortes de l'environnement

### 3.3 Ciel

Le ciel permet de gérer certaines conditions climatiques telles que la température ou l'ensoleillement. L'objet ciel est divisé en voxels permettant des calculs plus simples de projection de lumière sur les feuilles. Un voxel est défini par un cube de côté paramétrable. Chaque feuille reçoit donc une intensité lumineuse en fonction de la source de la lumière et des éventuels ombrages produits par les feuilles. Un algorithme se charge de calculer l'ombrage produit par chaque feuille sur le reste de la plante en fonction de la direction et de l'intensité des sources de lumières. Un coefficient de luminosité est ainsi associé pour chaque voxel du ciel.

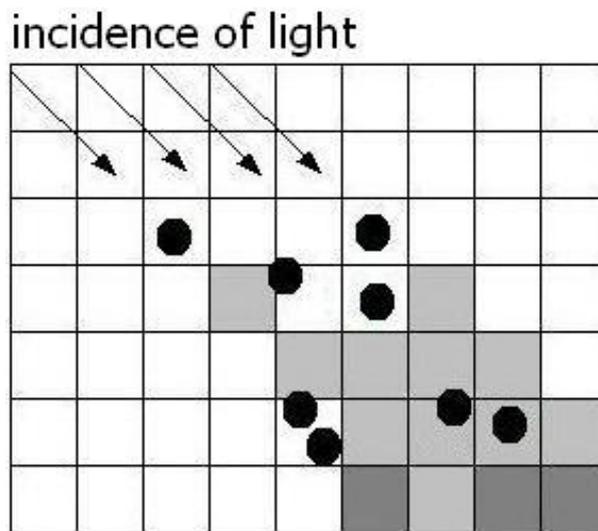


FIG. 7 – Calcul des ombrages dans les voxels

### 3.4 Sol

Le sol est constitué de la surface (mold) avec son dépôt d'humus et des ressources souterraines (soil). De même que le ciel, l'objet sol est divisé en voxels, chacun contenant 2 variables : une quantité de minéraux et une quantité d'eau pouvant être absorbés par les racines de la plante. Les débris de la plante forment l'humus qui se diffuse ensuite dans le sol. La pluie augmente la quantité d'eau de la dernière couche de voxels (la plus haute) du sol, de même que

l'évaporation en enlève en fonction de la température.

La pluie, dans notre modèle, est un phénomène probabiliste qui se déclenche avec une probabilité  $pRain$ . S'il pleut, alors les voxels de la couche supérieure du sol absorbent

$$wRain * SurfaceVoxel$$

Avec  $wRain$  un paramètre exprimant la quantité de pluie tombant à chaque pluie.

L'évaporation, quant à elle, se produit à chaque pas de temps et dépend de la température. A chaque fois, les voxels de la couche supérieure du sol perdent

$$kEvap * W * SurfaceVoxel * F(T)$$

quantité d'eau. Avec  $kEvap$  un coefficient d'évaporation,  $W$  la quantité d'eau dans le voxel et  $F(T) = \max(T, 0)$  une fonction de la température.

Il existe également un phénomène de diffusion de l'eau dans les voxels qui entraîne une diffusion des minéraux. Celle-ci se fait des voxels les plus riches vers les voxels les plus pauvres en ressource suivant différents facteurs de diffusion.

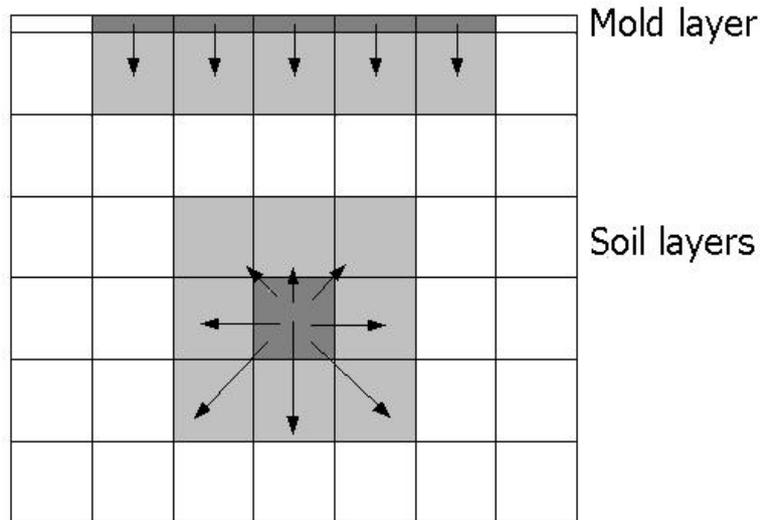


FIG. 8 – Diffusion de l'eau dans les voxels du sol

Ainsi, un mouvement de  $w$  unités d'eau d'un voxel entrainera un mouvement de  $w(\frac{N}{W})$  unités de minéraux.

Un phénomène d'écoulement de l'eau vers le bas implique une descente de l'eau vers les couches inférieures des voxels du sol si les couches supérieures sont saturées. La partie qui s'écoule est calculée par

$$s(W - satW * VolumeVoxel)$$

Avec  $s$  le paramètre de vitesse d'écoulement et  $satW$  le paramètre de saturation en eau du voxel.

### 3.5 Plante

Une plante est constituée de 2 L-agents précédemment définis et nommés "Shoot" pour la tige et "Root" pour les racines. À chaque pas de temps, elle :

- execute un pas de shoot.
- execute un pas de root.
- echange les ressources entre les 2 L-agents (modèle Transport-Resistance enrichi).

Lors de l'échange des ressources dans la plante, le transport du carbone de shoot vers root se calcule par :

$$TC = \frac{[C_s] - [C_r]}{\rho_{phloem} \left( \frac{1}{X_s^{\rho_q}} + \frac{1}{X_r^{\rho_q}} \right)}$$

Avec  $X_s$  la biomasse contenue dans le shoot et  $X_r$  la biomasse du root.  $[C_s]$  et  $[C_r]$  étant les concentrations de carbones respectivement dans le shoot et dans le root. La concentration étant calculée comme étant la ressource divisée par la biomasse.

$\rho_q$  et  $\rho_{phloem}$  étant des paramètres de configuration de conduction de flux.

Dans le phloem, le mouvement des minéraux dépend du mouvement du carbone. C'est le carbone qui entraine les minéraux dissout dans le phloem du shoot vers le root suivant le flux :

$$TNP = N_{sp} \frac{TC}{C_s}$$

Avec  $N_{sp}$  les ressources en minéraux du phloem dans la partie shoot.

Dans le shoot, l'eau disparaît par transpiration et entraine ainsi un mouvement de l'eau du root vers le shoot. L'eau diminue par transpiration en fonction de la température et de la taille du shoot :

$$T = c_{trans} * X_s * F(\text{temperature})$$

Avec  $c_{trans}$  un paramètre de transpiration et  $F(\text{temperature}) = \max(\text{temperature}, 0)$

Le mouvement d'eau provoqué par la transpiration dans le xylem suit cette formule :

$$TW = \frac{[W_r] - [W_s]}{\rho_{xylem} \left( \frac{1}{X_s^{\rho_q}} + \frac{1}{X_r^{\rho_q}} \right)}$$

Avec  $[W_s]$  et  $[W_r]$  étant les concentrations d'eau respectivement dans le shoot et dans le root.

$\rho_{xylem}$  est un paramètre de configuration de la conduction du xylem.

Une partie des minéraux dissout dans le xylem suis ce flux :

$$TNX = N_{rx} \frac{TW}{W_r}$$

Avec  $N_{rx}$  les ressources en minéraux du xylem dans la partie root.

Il existe également un transfert de minéraux du xylem vers le phloem aussi bien dans le shoot que dans le root :

$$TNS = N_{sx} \frac{\lambda_s}{X_s^{\rho_q}}$$

$$TNR = N_{rx} \frac{\lambda_r}{X_r^{\rho_q}}$$

Avec  $\lambda_s$  et  $\lambda_r$  des paramètres spécifiant la vitesse du transfert respectivement dans le shoot et dans le root.



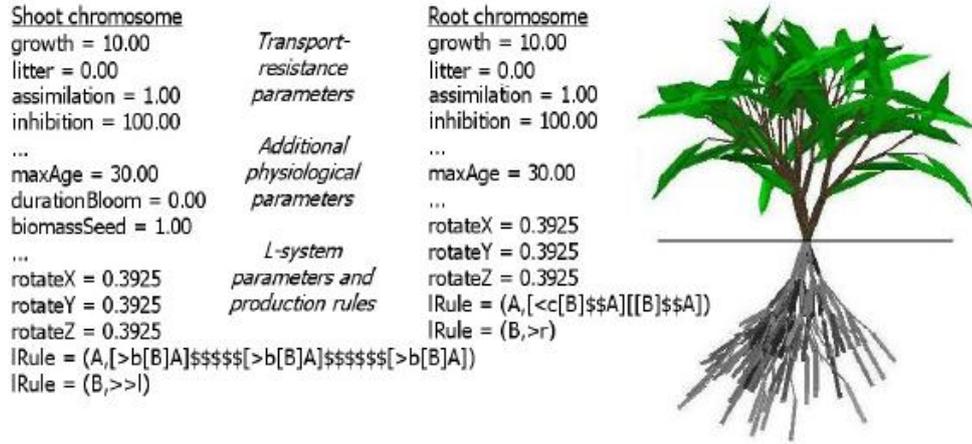


FIG. 10 – Exemple de génotype sur la plateforme PC

Il en va de même pour la floraison. Une fleur est considérée comme un puits de biomasse. Elle demande une certaine quantité de biomasse pour pouvoir fleurir. Puis, une fois fleurie, elle demande une nouvelle quantité de biomasse afin de former une graine si la fleur a été fécondée.

### 3.8 Phénotype

Le phénotype contient les réserves en minéraux (C et N) de chaque L-Agent. Il contient également un L-String (c'est-à-dire une chaîne de L-Char). Le L-String est l'expression finale des règles données par le L-System après un nombre fini d'itérations.

### 3.9 Assimilation des ressources

#### 3.9.1 Photosynthèse

Chaque feuille reçoit une intensité lumineuse en fonction de l'environnement et des autres parties de la plante qui peuvent lui masquer la lumière. Une fonction de photosynthèse transforme ensuite la lumière captée en carbone :

$$p(L) = i_l * assPhoto$$

Avec  $i_l$  l'intensité lumineuse captée par la feuille et  $assPhoto$  un facteur d'absorption.

Elle est de plus spécifiée par un paramètre de photosynthèse maximale ( $maxPhoto$ ) et un seuil de saturation ( $satPhoto$ ).

Le carbone produit par une feuille se calcule alors :

$$C_l = \frac{p(L) * kAss_C * X_l}{(1 + \frac{[C_s]}{JAss_C})}$$

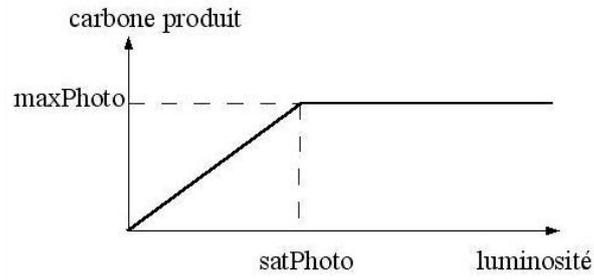


FIG. 11 – Fonction de Photosynthèse

Avec  $kAss_C$  et  $JAss_C$  des paramètres de configurations sur la capacité d'assimilation du carbone dans les feuilles.

$X_l$  est la quantité de biomasse présente dans une feuille.

Il est à noter que l'impact de l'eau sur la photosynthèse est très faible et donc négligeable.

### 3.9.2 Absorption d'azote

L'azote contenu dans les voxels du sol est absorbé par les racinelles de la plante et est stocké. Sa concentration est ensuite recalculée pour chaque voxel du sol. Les minéraux assimilés par un radicelle sont donc déterminés par :

$$N_r = \frac{[N_v] * kAss_N * X_r}{(1 + \frac{[N_r p]}{JAss_N})}$$

Avec  $kAss_N$  et  $JAss_N$  des paramètres de configuration sur la capacité d'assimilation des minéraux par les racinelles.

$X_r$  est ici la quantité de biomasse présente dans un radicelle.

$N_r p$  est la quantité d'azote présente dans la partie root du phloem.

$N_v$  est la concentration locale en minéraux du voxel dans lequel est situé le radicelle.

### 3.9.3 Absorption d'eau

L'assimilation de l'eau et des minéraux sont 2 processus que nous pouvons considérer comme indépendants car la plante absorbe les minéraux par osmose et non en les entraînant avec l'eau qu'elle absorbe. Nous nous servons donc de la même formule cette fois pour l'absorption uniquement de l'eau par un radicelle :

$$W_r = \frac{[W_v] * kAss_W * X_r}{(1 + \frac{[W_r]}{JAss_W})}$$

Avec  $kAss_W$  et  $JAss_W$  des paramètres de configuration sur la capacité d'assimilation de l'eau par les racinelles.

$W_r$  est la quantité d'eau présente dans le root.

$W_v$  est la concentration locale en eau du voxel dans lequel est situé le radicelle.

### 3.10 Croissance

A chaque pas de temps, les L-Agents transforment leurs stocks de carbone et d'azote en biomasse selon le modèle de Transport-Resistance.

A chaque pas de temps, la nouvelle biomasse à créer est déterminée par la formule :

$$X_{new} = \frac{kGrow * X * [C] * [N] * [W]}{(1 + \frac{X}{KGrow})}$$

Avec  $X$  la biomasse du root ou du shoot en fonction de la partie qui est en train de croître.

$[N]$  est la concentration de minéraux présents dans le phloem car la plante ne puise que dans cette partie pour croître.

$kGrow$  et  $KGrow$  sont des paramètres de croissance.

Puis la biomasse nécessaire à la survie de la plante est soustraite :  $X * kLit$ .

Avec  $kLit$  le paramètre correspondant au coût de la vie.

La biomasse restante est distribuée aux apex de la plante ce qui va déclencher leur croissance ou non. La distribution se faisant en fonction de la quantité de lumière perçue par les apex du shoot et par la concentration en eau et en minéraux perçue par les apex du root.

La biomasse restante étant perdue.

Si la biomasse produite est insuffisante pour la survie de la plante, elle est prise dans les différents apex déjà existant ce qui peut les détruire.

### 3.11 Evolution

Le processus d'évolution n'a évidemment d'effet direct que sur le génotype, l'évolution du phénotype étant une conséquence de l'évolution du génotype.

Pour faire évoluer la plante, on peut muter un L-Char ou une L-Rule.

Pour l'instant le phénomène de croisement repose uniquement sur l'échange d'un ensemble de L-Rule complètes entre 2 L-System.

## 4 Implémentation

L'application a été réalisée en suivant le modèle décrit précédemment et correspondant au modèle de l'application réalisée sur PC. Le langage utilisé est le J2ME. J2ME (Java 2 Micro Edition) est le framework Java spécialisé dans les applications mobiles. Il permet donc une grande flexibilité de programmation car basé sur la technologie JAVA. De plus, des plate-formes Java compatibles avec J2ME sont embarquées dans de nombreux téléphones portables et PDA de nos jours, c'est la référence en la matière.

La version utilisée est la 2.2, elle permet entre autre la génération d'un environnement 3D nécessaire à l'application.

A noter que l'utilisation de la plateforme J2ME nécessite au préalable l'installation du framework Java.

## 4.1 Détails techniques

Le projet s'appelle **Shokubutsui**. Il tient son nom d'un jeu de mots japonais signifiant "Evolution de Plante" pour s'inspirer du très célèbre Tamagotchi. L'application contient 7 packages gérant différentes parties de l'application :

- **ConfigManager** qui s'occupe de gérer les fichiers de configuration et le stockage des données. Les données sont stockées dans un RecordStore qui est le mode de persistance des données classique utilisé dans le J2ME.
- **GraphicManager** qui contient entre autres la classe principale : *GraphicEngine.class*. C'est cette classe qui est lancée au démarrage de l'application. Elle s'occupe de gérer l'environnement 3D, la gestion des lumières, des caméras et des objets. Elle gère aussi le rafraichissement de la fenêtre 3D toutes les 20ms afin d'optimiser les temps de calculs. Le singleton ObjectManager, quant à lui, permet la création d'objets de types Branch, CoarseRoot, FineRoot, Flower, Leaf, Plane ou Seed qui peuvent ensuite être incorporés au World 3D.
- **LSystemManager** qui contient la gestion des L-Systems, de leurs paramètres ( configuration, règles et initiateur ) comme de leur développement ( création de chaîne après n itérations ).
- **MathEnhanced** qui contient la classe permettant de calculer une exponentielle et un logarithme en utilisant les développements limités. Ceci nous permet ensuite de calculer une puissance réelle. Ceci n'étant pas possible avec les classes J2ME basiques.
- **MenuManager** qui contient toutes les classes de gestion des menus. La classe principale étant *Menu.class* qui permet à l'utilisateur de choisir entre "Seed Exchange" l'échange de graines, "Configuration" qui permet de configurer les différents paramètres de l'application en fonction du niveau de l'utilisateur et "User Level" qui permet justement de configurer le niveau de maîtrise de l'utilisateur.
- **NetworkManager** est le package s'occupant de la connexion entre 2 cellulaires ou entre un cellulaire et un ordinateur pour l'échange de données (en l'occurrence de génotypes) lors de l'échange de graines. Cette connexion peut être de 3 types :
  - **Socket** qui permet l'échange de données entre 2 cellulaires via un câble de liaison.
  - **Port COM** qui permet l'échange de données entre un cellulaire et un ordinateur en utilisant le port COM via un câble de liaison.
  - **Bluetooth** qui permet l'échange de données entre 2 cellulaires ou bien entre un cellulaire et un ordinateur via le port BlueTooth.
- **SimulationManager** qui contient la gestion de l'environnement : du Sol, du Ciel, et des Plantes. Il contient entre autres le Simulateur principal qui simule des pas de temps à intervalles données ou lors de la demande de l'utilisateur pour faire évoluer l'environnement et la plante.

L'application contient de plus, les fichiers objets de représentation 3D des feuilles, branches, etc... Ces fichiers sont stockés à l'emplacement `\res\Models\` et sont stockés au format `.m3g` qui est le format utilisé par J2ME pour ses fichiers de données d'objets 3D.

## 4.2 Problèmes rencontrés

Différents problèmes ont été rencontrés tout au long de la réalisation de cette application.

Tout d'abord, il a fallu se familiariser avec l'environnement 3D proposé par le framework J2ME. Puis, la réalisation des objets 3D permettant de représenter la plante dans son environnement a été difficile. Ceux-ci existaient déjà dans l'application réalisée sur ordinateur et donc la première idée a été de les reprendre et des les mettre au format .m3g (ils étaient en .mesh). L'utilisation du logiciel Blender a permis de réaliser ces modèles, cependant certains objets 3D ainsi transformés posaient des problèmes de luminosité sur leurs faces en fonction de l'éclairage. Ainsi, la plupart des objets ont été remodelés.

Ensuite, s'est posé un problème de stockage des données. Le problème principal du J2ME étant de ne pas permettre une gestion des fichiers classique. En effet, seule la méthode RecordStore permet de stocker des données de manière persistante et cela a posé des problèmes de flexibilité, notamment pour l'exportation des données via les connexions réseaux.

Lors de l'implémentation de la plateforme mobile, beaucoup d'algorithmes réalisés pour la plateforme fixe ont été réutilisés. Cependant, un problème s'est posé au niveau de la gestion de la lumière. Effectivement, pour gérer différentes sources de lumières il fallait créer un espace de voxels différent pour chaque source lumineuse. Or, sur la plateforme mobile, la mémoire est très restreinte et ceci n'a donc pas pu être mis en place. La réalisation d'un algorithme pour la gestion de lumière multisources pour la plateforme mobile est donc encore à réaliser.

Un autre problème, plus matériel s'est posé. En effet, les tests ont pour l'instant été effectués via un émulateur de plateforme mobile. Et bien que cela fonctionne sur celle-ci, je doute que tout se passe aussi bien sur une plateforme réelle, notamment au niveau des connexions réseau. Cependant, le laboratoire n'a pas encore pu fournir ces plateformes. Quelques tests sur des téléphones portables personnels ont d'ailleurs montré que la prise en charge du moteur graphique 3D n'est possible que sur les téléphones très récents.

Finalement il se pose encore un problème au niveau de la taille du fichier .jar une fois les classes compilées et compressées. Ce fichier fait 150kO et est plutôt lourd pour une application portable. Il est donc prévu d'optimiser le code existant afin de réduire la taille de l'exécutable.

## 5 Expérimentations

L'ensemble des tests à effectuer a pour but premier de valider notre modèle et de montrer que toutes les conditions que nous désirions avoir dans notre application sont bien réunies. Nous verrons donc l'implémentation du système morphologique via les L-Systems, le système physiologique et la réactivité de la plante à son environnement.

Les tests ont été effectués sur la dernière version de l'application : *V2.0* et uniquement via un émulateur de plateforme mobile. Ainsi les tests réseaux nécessaires n'ont pas encore pu être effectués.

### 5.1 Morphologie issue du L-System

Chaque plante réelle à sa morphologie propre, que ce soit au niveau de la forme de leur feuille, de leur couleur ou bien de la forme de la plante en général. Tout ceci provenant de l'interaction de la plante avec son milieu mais aussi de son phénotype qui est l'expression de son génotype.

Notre plante contient un génotype qui est paramétrable afin de changer différents paramètres du modèle Transport-Resistance, du Pipe-Model, ou bien de l'environnement. Il est également possible de modifier les règles du L-System afin d'obtenir des formes variées. Voici quelques exemples de plantes ayant des L-Systems différents :

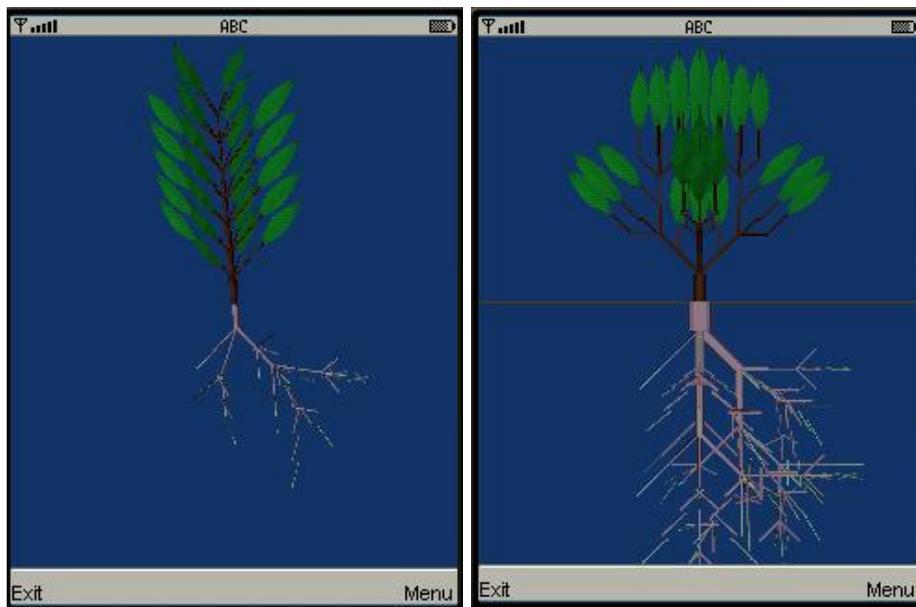


FIG. 12 – Morphologies de plantes issues de différents L-Systems

On voit à travers ces exemples que de nombreuses formes de plantes sont envisageables. Il suffit de paramétrer correctement le L-System pour obtenir le type de plante recherché.

## 5.2 Tropisme

Comme nous l'avons vu précédemment, une plante réelle est capable de capter l'évolution de son environnement afin de modifier sa morphologie. Elle dispose de capteurs sur ses apex qui lui permettent par exemple de s'orienter vers la lumière.

Notre modèle permet également à notre plante ce phototropisme. Voici un exemple de plante ayant poussée avec une lumière venant de gauche :



FIG. 13 – Phototropisme de la plante par une lumière venant de la gauche

Le principe de phototropisme est bien reproduit par notre modèle. En effet, lors de la distribution de biomasse, les apex captant la plus grande quantité de lumière gagnent une part plus importante de biomasse par rapport à leurs congénères et ceci oriente naturellement la pousse de la plante.

Nous avons également un tropisme des racines par rapport à la concentration en eau et en minéraux des voxels. De la même manière, les apex se trouvant dans les meilleures conditions minéralogiques seront favorisés pour pousser.

Ainsi deux tropismes importants sont reproduit dans notre modèle mais nous ne prenons pas en compte l'ensemble de tous les tropismes par soucis de simplification. Par exemple le gravitropisme n'est pas pris en compte.

## 5.3 Manque de ressources

Une plante, pour se développer, à besoin de différentes ressources. Les plus importantes étant le carbone issu de la photosynthèse, les minéraux issus du sol et l'eau. Ce sont ces différentes ressources qui, une fois absorbées, transitent dans la plante et permettent la création de la biomasse nécessaire à la survie et

à la croissance de la plante.

Notre plante se nourrit des minéraux et de l'eau provenant du sol ainsi que de la lumière captée par ses feuilles. Si les ressources sont insuffisantes, on observe effectivement que la plante augmente son taux de croissance pour finalement cesser totalement de croître afin de simplement survivre.

Ces expériences nous permettent de montrer que la partie gestion des ressources de notre modèle est clairement mise en valeur et effective. De même, le modèle Transport-Resistance de Thornley est ici bien effectif et les ressources entre les 2 L-Agents transitent correctement afin d'assurer la survie des 2 individus.

## 5.4 Pluviométrie

L'eau a un rôle prépondérant dans l'activité de la plante. Dans notre modèle, l'eau gère tous les transferts internes de minéraux et de carbone dans le xylem. Nous pouvons régler différents paramètres relatifs à la pluviométrie comme par exemple la probabilité que la pluie tombe. Si nous mettons cette probabilité à 0.01 nous observons que la plante commence par se développer normalement grâce aux ressources déjà présentes dans le sol. Cependant, sa croissance s'arrête prématurément à cause du manque de renouvellement de cette ressource. Ceci ne survient pas si les ressources en eau dans le terrain de départ sont trop grandes.

## 5.5 Température

Actuellement, les effets de la température ne sont pas bien pris en compte dans notre modèle. En effet, une température de -15 n'influe aucunement sur l'évolution de la plante alors qu'elle devrait considérablement la ralentir. De même, une très forte température n'influence pas la croissance de la plante si l'eau disponible est suffisante. Ceci est dû au fait que la température n'entre en jeu que dans les mécanismes de transpiration de la plante et d'évaporation des couches supérieures du sol.

## 6 Discussion

L'ensemble des tests effectués nous montre que la plante réagit positivement aux modifications de son environnement. Seuls certains changements majeurs tels que la suppression des ressources ou de la lumière lui empêche toute forme d'évolution. Ainsi l'utilisateur peut créer un modèle de plante et voir si elle pourra s'adapter à son milieu, même si celui-ci est incompatible avec un autre type de plante. La modification d'un grand nombre de paramètres permet une grande souplesse des capacités analytiques possibles.

Notre concept de plante virtuelle permet de fusionner la partie physiologique d'une plante et sa partie morphologique. Nous pouvons donc lier les 2 approches et nous rapprocher encore d'avantage du mode de fonctionnement réel d'une plante.

Notre plante respecte donc toutes les contraintes que nous attendons d'elle, et est en accord avec le modèle existant sur PC comme nous allons le montrer.

### 6.1 Morphologie

De même que sur la plateforme PC, nos tests montrent les différentes possibilités de morphologie de plantes en fonction de la paramétrisation de nos L-Systems. Nous pouvons mettre en parallèle la diversité des morphologies de notre plateforme avec celle sur PC.

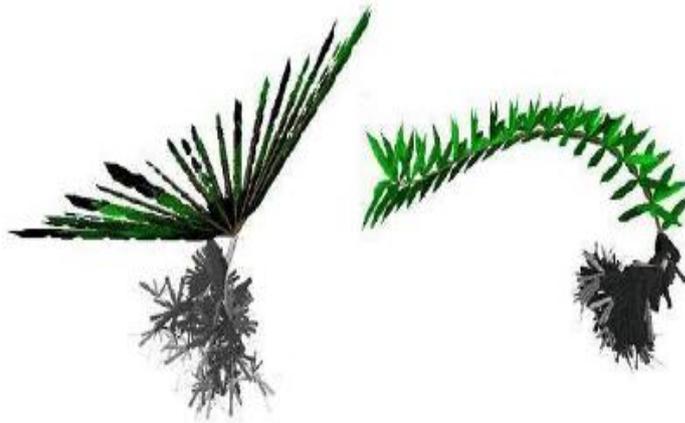


FIG. 14 – Phototropisme sur la plateforme PC

Sur les 2 plateformes, les L-Systems permettent une certaine souplesse afin de créer un grand nombre de plantes variées. Le fait de prendre les L-Systems comme partie du génotype de nos plantes virtuelles nous permet, lors de croisements génétiques, de faire évoluer la morphologie de la plante en fonction de ses parents.

### 6.2 Tropismes

Nos plantes virtuelles réagissent à leur environnement au même titre que celles sur la plateforme PC. La mise en évidence d'un phototropisme est d'ailleurs

à mettre en parallèle avec celle sur PC, les méthodes de gestion de lumière et de réactivité des apex étant les même sur les 2 supports.



FIG. 15 – Morphologie de plantes sur la plateforme PC

Nous observons d’après nos tests précédents, que notre plante virtuelle réagit de la même manière au stimulus de lumière que celles sur la plateforme PC.

Il en va de même pour le tropisme des racines en fonction de la concentration des voxels en eau et en minéraux qui est semblable à celle utilisée sur la plateforme PC, bien que la gestion de l’eau ne soit pas encore prise en compte.

### 6.3 Besoins environnementaux

Les besoins en eau et minéraux de nos plantes virtuelles sont mis en valeur avec les tests précédents. Notre plante, à l’instar des plantes de la plateforme PC, utilise les minéraux et l’eau du sol afin de croître. Elle se sert également de la lumière du soleil pour photosynthétiser du carbone qui lui permet également de créer la biomasse nécessaire à sa croissance ou dans certains cas à sa simple survie. Une modification de l’environnement va donc agir directement sur la survie de notre plante virtuelle.

## 7 Conclusion

L'engouement actuel de la recherche informatique au niveau des mondes virtuels d'un point de vue ludique ou scientifique est un terrain particulièrement riche.

La modélisation de plantes est une partie importante d'un écosystème et est donc d'autant plus intéressante dans la problématique liée aux mondes virtuels.

Le projet est terminé en grande partie. Il reste toujours certains problèmes cités précédemment qui devront être résolus prochainement. De plus certains tests sont encore à effectuer, notamment au niveau de la pluviométrie ou de la partie réseaux.

Il est aussi prévu d'enrichir notre modèle en intégrant de nouveaux paramètres de configuration. L'idée serait par exemple d'intégrer d'autres facteurs environnementaux tels que le vent ou la gravité ainsi que d'autres agents tels que des insectes, des herbivores ou autres abeilles.

Tout ceci dans l'optique de se rapprocher d'avantage de la réalité biologique tout en gardant un certain degré de simplification afin de rendre l'application utilisable au niveau des temps de calcul.

## Références

- [1] B-G Hu, M. Jaeger, *Plant Growth Modeling and Application*, Tsinghua University Press, 2003
- [2] A. Lindenmayer, *The algorithmic Beauty of Plants*, Springer-Verlag, New-York, 1990.
- [3] R. Heller, R. Esnault, C. Lance, *Physiologie végétale - 1. Nutrition*, Dunod, 1998
- [4] R. Heller, R. Esnault, C. Lance, *Physiologie végétale - 2. Développement*, Masson, 1993
- [5] John H.M. Thornley, *Modelling Shoot : Root Relations : the Only Way Forward ?*, Annals of Botany 81 : 165-171, 1998
- [6] A. Lacoïnte, *Carbon allocation among tree organs*, Ann. For Sci. 57 : 521-533, 2000
- [7] M. Woodridge, *An Introduction to Multiagent Systems*, John Wiley & Sons, 2002
- [8] G. Weiss, *Multiagent Systems : A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, MIT Press, 1999
- [9] J. Ferber, *Introduction aux Systèmes multi-agents : un point de vue intégral*, 2005
- [10] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial System*, University of Michigan Press, 1975
- [11] J.R. Koza, *Genetic Programming*, MIT Press, 1992
- [12] J-C. Heudin, *Virtual Worlds*, Perseus Books, 1999
- [13] J-C. Heudin, *La vie artificielle*, Hermes, 1994
- [14] J-P. Rennard, *Vie Artificielle*, Vuibert, 2002
- [15] T. Bäck and H.P. Schwefel, An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameters Optimization, *Evolutionary Computation*, 1(1), 1993
- [16] B. Delb, *J2ME - Applications Java Pour Terminaux Mobiles*, Eyrolles, 2002