

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BOBO-DIOULASSO  
(UPB)

-----  
ECOLE SUPERIEURE D'INFORMATIQUE  
(ESI)

-----  
CYCLE DES INGENIEURS DE CONCEPTION EN INFORMATIQUE  
(CICI)

-----  
01 BP 1091 BOBO-DIOULASSO 01  
BURKINA FASO



Institut de recherche pour le développement  
(IRD)

-----  
01 BP 182 OUAGADOUGOU 01  
BURKINA FASO

-----  
TEL : (+226) 30-67-37/39

ANNEE ACADEMIQUE 2001-2002

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Thème :

## MODELISATION INFORMATIQUE DE SYSTEMES COMPLEXES : LE MODELE MIOR

Novembre 2002 – mars 2003

Présenté par :

- **Alicou Badara MASSA**

Élève Ingénieur de Conception en Informatique

Soutenu le 08 avril 2003

Devant le jury composé de :

- PR Geneviève JOMIER (Présidente), Maître de Conférence, Paris-Dauphine
- PR Oumarou SIE (Superviseur), Maître de Conférence, Université de Ouagadougou
- M. Dominique MASSE (Maître de stage), ingénieur Agro-écologie IRD-Ouagadougou
- Dr Sado TRAORE (Rapporteur), Directeur des Etudes ESI-UPB

## Remerciements

Au terme de ce stage, je voudrais témoigner ma gratitude à un certain nombre de personnes dont les contributions diverses ont permis la réalisation de ce mémoire.

Je pense :

- à **M. Dominique MASSE**, Ingénieur Agro-écologie – IRD-Ouaga, mon maître de stage ;
- à **M. Christophe CAMBIER**, Maître de Conférence à l'Université Paris VI détaché à l'IRD-Dakar-SENEGAL ;
- au **Pr. Oumarou SIE**, Maître de Conférence à l'Université de Ouagadougou, mon superviseur ESI ;
- à la Direction et au corps enseignant de l'**École Supérieure d'Informatique (ESI-UPB)** où j'ai passé ces cinq (5) dernières années ;
- à mon ami et collègue **Mahamadou BELEM** avec qui j'ai cheminé durant ce stage ;
- à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont soutenu tout au long de cette période.

A vous tous, j'exprime mes remerciements chaleureux !

## **Dédicaces**

*A ma famille, la famille MASSA à Bobo-Dioulasso ;*

*à M. et Madame BOKOUM Boureïma, ainsi que leurs enfants Raki, Aziz et Saïda ;*

*à mon ami Lassina BAMBA, mon mentor*

*et à tous ceux qui me sont chers...*

---

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tables des illustrations.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>Liste des tableaux .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Introduction .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>I. Problématique et démarche de résolution.....</b>  | <b>7</b>  |
| 1 - Problématique.....  | 7         |
| 2 - Définition de la modélisation .....   | 7         |
| 3 - Notion de systèmes .....  | 8         |
| 4 - Les Systèmes Multi-agents (SMA) .....   | 9         |
| 5 - Description du processus de modélisation et de simulation .....   | 15        |
| <b>II. Présentation du modèle MIOR.....</b>   | <b>17</b> |
| 1 - Principaux agents et fonctionnement .....   | 17        |
| 2 - Diagramme des classes du modèle .....   | 20        |
| 3 - Principales règles d'évolution du modèle .....  | 22        |
| 4 - Présentation du simulateur .....  | 23        |
| 5 - Exemple de cas d'utilisation.....   | 26        |
| 6 - Diagrammes d'activités du modèle.....   | 27        |
| <b>III. Mise en œuvre et validation du modèle MIOR.....</b>   | <b>32</b> |
| 1 - Outils de travail .....   | 32        |
| 2 - Résultats obtenus et validation du modèle.....  | 33        |
| <b>IV. Bilan général.....</b>   | <b>36</b> |
| 1 - Conditions générales de travail.....  | 36        |
| 2 - Perspectives .....  | 36        |
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>Bibliographie .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>Adresses de liens web importants.....</b>  | <b>41</b> |
| <b>Annexes .....</b>  | <b>42</b> |
| Annexe 1 - Fiche de renseignement thème de stage.....   | 43        |
| Annexe 2 - Document de spécification des besoins.....   | 44        |
| Annexe 3 - Description détaillée des objets du modèle.....  | 46        |
| Annexe 4 - Graphiques résultant de quelques expériences .....   | 52        |
| Annexe 5 - Exemple de fichier de sortie de l'application recensant les paramètres d'une simulation .....                            | 53        |
| Annexe 6 - Exemple de fichier de sortie de l'application récapitulatif des résultats de la simulation (sur un cycle de 25 pas)..... | 54        |

---

## **Tables des illustrations**

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Description d'un système.....   | 8  |
| Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'un SMA.....  | 11 |
| Figure 3 : Fonctionnement comparé d'un Objet et d'un Agent .....   | 13 |
| Figure 4 : Etapes d'un processus de modélisation et de simulation [Aiello, 1997].....  | 16 |
| Figure 5 : Présentation des agents du modèle MIOR dans leur milieu.....  | 19 |
| Figure 6: Diagramme des classes du modèle MIOR.....  | 21 |
| Figure 7 : Présentation de l'objet EcranScenario, interface de saisie des paramètres de la simulation .....                                | 24 |
| Figure 8 : Présentation de l'objet Generateur .....  | 24 |
| Figure 9 : Présentation de l'objet MicroOrg.....   | 25 |
| Figure 10 : Présentation de l'objet Afficheur .....  | 25 |
| Figure 11 : Schéma du principal cas d'utilisation .....  | 26 |
| Figure 12: Diagramme d'activités de la décomposition des OmSphères.....  | 28 |
| Figure 13: Schéma du calcul de la croissance du Metamior .....   | 29 |
| Figure 14 : Description du processus de calcul du besoin en carbone du Metamior.....   | 30 |
| Figure 15 : Description du processus d'ajustement de la croissance du Metamior .....   | 31 |
| Figure 16 : Evolution de certaines données en sortie du simulateur pour des nombres différents de MetaMiors et d'OmSpheres.....            | 34 |
| Figure 17 : Images de l'OmMiorSphere avec des OmSpheres et des MetaMiors repartis aléatoirement dans le milieu en vue de simulations ..... | 52 |

## **Liste des tableaux**

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Comparaison agents cognitifs vs agents réactifs .....       | 11 |
| Tableau 2 : Correspondances Composants SMA - Objets du modèle MIOR..... | 18 |
| Tableau 3 : Liste des paramètres de la simulation.....                  | 33 |
| Tableau 4 : Description de la classe OmSphere .....                     | 46 |
| Tableau 5 : Description détaillée de la classe MetaMior .....           | 47 |
| Tableau 6: Description détaillée de la classe MetaMiorDormant.....      | 48 |
| Tableau 7 : Description détaillée de la classe Enzyme .....             | 48 |
| Tableau 8 : Description détaillée de la classe CategorieMetaMior.....   | 49 |
| Tableau 9 : Description détaillée de la classe CategorieOmSphere.....   | 50 |
| Tableau 10 :Description détaillée de la classe Azote.....               | 50 |
| Tableau 11 : Description détaillée de la classe OmMiorSphere .....      | 51 |
| Tableau 12 :Description détaillée de la classe Scenario .....           | 51 |

## **Introduction**

Les systèmes complexes sont des systèmes mettant en œuvre un grand nombre de composants en interaction, mais dont l'activité globale ne peut être dérivée de la somme des activités de ses composants pris individuellement ; ces systèmes ont donc un fonctionnement non-linéaire.

Cependant, la nécessité de les comprendre s'impose, tant ils se rencontrent dans tous les domaines de la science (économie, écologie, météo, etc.)

Face à cet impératif, l'usage de la technique de la modélisation informatique peut s'avérer d'une aide précieuse et ouvre une voie nouvelle dans l'étude et la compréhension de ces systèmes complexes.

Le présent document décrit les différentes phases du travail effectué dans le cadre d'un stage de fin d'études qui s'est déroulé à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Ouaga), plus précisément au sein de l'Unité de Recherche « **Interactions biologiques des sols tropicaux** » en abrégé **UR-IBIS**. Le thème sur lequel a porté le stage est la « **Modélisation informatique de Systèmes complexes – le modèle MIOR** ».

Ainsi, nous trouverons dans ce rapport un compte-rendu du travail accompli, allant de l'identification de la problématique, en passant par la description de la méthodologie de résolution et des résultats obtenus. Le rapport se termine par l'identification des perspectives futures quant à l'évolution de la solution adoptée.

# I. Problématique et démarche de résolution

## 1 - Problématique

La transformation des composés organiques des sols se fait selon des processus complexes qui mettent en jeu divers facteurs dont les principaux sont la nature des substrats, la nature des communautés microbiennes impliquées et leur état physiologique, ainsi que les caractéristiques du milieu où interviennent ces processus.

Cette complexité rend difficile la maîtrise des résultats des expériences menées sur l'activité biologique des sols. Il apparaît alors intéressant de mettre en place un système informatique de simulation de cette activité micro-biologique des sols, en parallèle avec le programme expérimental. Le parallélisme ainsi obtenu vise à parvenir à une plus grande cohérence entre les deux modèles.

## 2 - Définition de la modélisation

Un modèle se définit comme une **abstraction** de la réalité. Ainsi, la modélisation est le processus permettant, à partir d'un objet du monde réel, d'aboutir à une image « réduite » de cet objet. A travers ce procédé, il résulte une certaine perte d'informations ; cependant, le but de la modélisation est justement de réduire l'objet en sa partie intéressante pour l'étude envisagée sur lui.

Ainsi, un modèle obtenu à la fin d'un tel processus présente les qualités suivantes :

- la **subjectivité** : des modèles radicalement différents d'une même réalité peuvent être élaborés en fonction de sa partie présentant un intérêt pour le modélisateur ;
- la **pertinence** : un modèle est exhaustif parce <sup>que</sup> l'on prend soin de ne retenir de l'objet modélisé que ses parties dignes d'intérêt.

Les buts visés par la modélisation sont essentiellement de deux ordres, à savoir :

- réduire la complexité de systèmes qui s'avèrent difficiles sinon impossibles à comprendre directement ;
- tester le modèle informatique avant de construire l'objet physique, grâce à la simulation.

Plusieurs techniques de modélisation et de simulation des phénomènes réels existent. Parmi celles-ci, nous pouvons citer les **méthodes mathématiques (statistique, stochastique, ...)**, les **méthodes informatiques** tournées essentiellement vers **l'Intelligence Artificielle (exemple : les Systèmes experts)**.

Parmi ces méthodes, nous utiliserons dans le cas qui nous concerne ici **UML** pour décrire notre modèle, tandis que la technologie des **Systèmes Multi-agents (SMA)** servira pour la mise en œuvre effective du modèle.

### 3 - Notion de systèmes

Un système se définit comme une structure (**entité** ou un **ensemble d'entités**) bien identifiée située dans un **environnement** et menant une **activité** dans le but d'atteindre une **finalité** donnée ; de plus, cette structure, à travers son activité, connaît des **évolutions** au cours du temps.

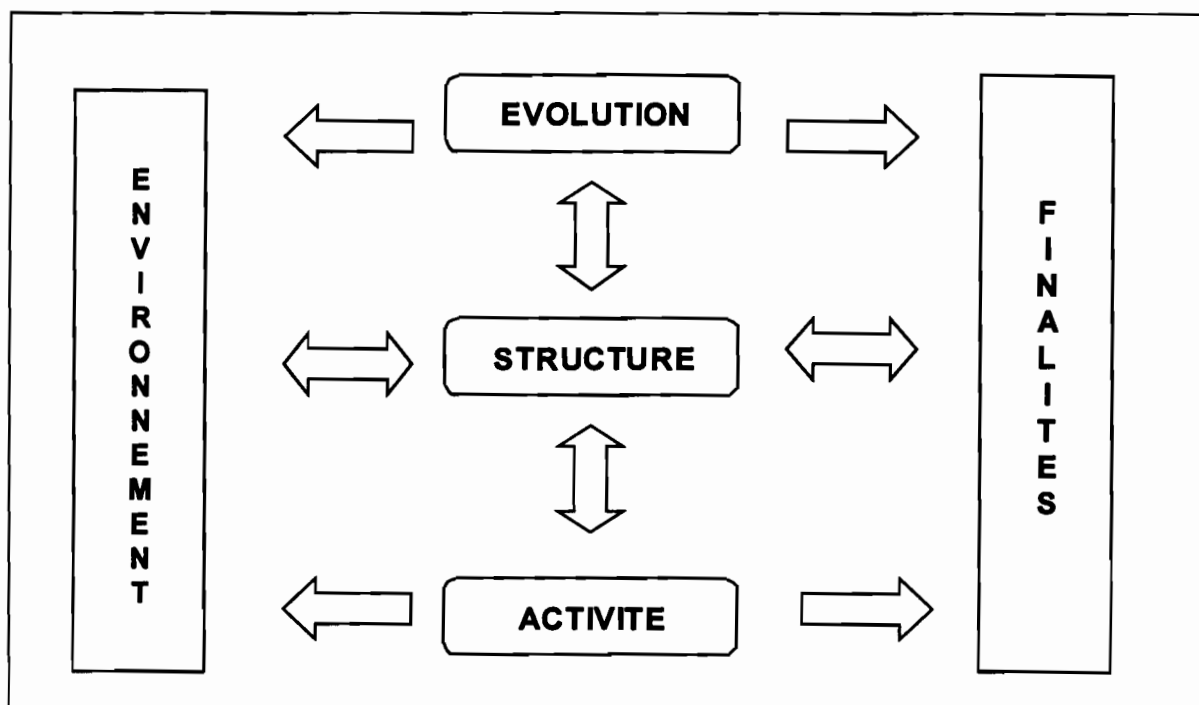


Figure 1 : Description d'un système



La systémique classe les systèmes en trois groupes qui sont :

- les **systèmes simples** ;
- les **systèmes compliqués**
- et les **systèmes complexes**.

Les systèmes du premier groupe se définissent comme ceux étant régis par un simple rapport de causalité linéaire (exemple : un pendule en physique). L'on sait par avance comment se comporte un système d'un tel type, à partir du moment où l'on a défini sa variable d'entrée.

Quant à ceux appartenant à la seconde catégorie, ils sont entendus comme comprenant un nombre important d'éléments pouvant eux-mêmes être des systèmes simples. Moyennant un effort d'analyse, le fonctionnement général d'un système compliqué est compréhensible et prédictible : c'est en fait la résultante des actions individuelles de ses éléments constitutifs (exemple : un moteur de motocyclette).

Enfin, le troisième groupe recense les phénomènes dont la dynamique est non-linéaire ; la relation de causalité entre les variables d'entrée et les résultats de tels systèmes ne peut être exprimée de manière explicite. Cela a pour conséquence de les rendre imprédictibles et inorganisable (exemple : système économique, météo, ...).

Les systèmes complexes se rencontrent dans plusieurs domaines de la vie et il apparaît nécessaire de les comprendre, à défaut de pouvoir prédire leurs effets. Face à la complexité de leur fonctionnement, l'usage de la technique de la simulation apparaît d'un aide précieuse.

## 4 - Les Systèmes Multi-agents (SMA)

### a. Définitions

L'approche par les **Systèmes Multi-agents (SMA)** est issue de deux (2) sous-domaines de l'**Intelligence Artificielle (I.A)** qui sont l' **Intelligence Artificielle distribuée (I.A.D)** et la **Vie artificielle (V.A)**. Les buts visés par ces disciplines sont :

- la création de systèmes d'organisations capables de résoudre des problèmes donnés au moyen de raisonnements fondés sur la manipulation de symboles (ex. systèmes experts) pour l'I.A.D. ;

- la compréhension et la modélisation des systèmes biologiques situés dans un environnement et dotés de capacités de survie, d'adaptation et de reproduction pour la V.A.

Le concept SMA se trouve ainsi au confluent de plusieurs domaines scientifiques dont l'informatique, la biologie, la robotique, etc. Il fait suite à cette vision de l'I.A selon laquelle tout acteur du monde réel peut être représenté par un agent, c'est-à-dire une entité informatique agissant de manière autonome dans un environnement [Ferber, 1995]. Ainsi un SMA se définit comme un système regroupant les éléments suivants :

- des **agents** représentant les entités actives du système ;
- un **environnement** qui désigne un espace ayant généralement un volume dans lequel sont situés les agents ;
- un ensemble d'**objets** situés dans cet espace ; ces objets sont passifs et peuvent être perçus, détruits, créés et modifiés par les agents ;
- un ensemble de **relations** qui unissent les objets entre eux ;
- un ensemble d'**opérations** permettant aux agents de percevoir, de détruire, de créer, de transformer et de manipuler les objets ;
- un ensemble d'**opérateurs** correspondant à l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (les lois de l'univers). [Ferber, 1995]

Le fonctionnement d'un SMA décrit un cycle « Action des agents sur l'environnement » - « Perception de l'environnement par les agents » présenté dans la figure 2 ci-après.

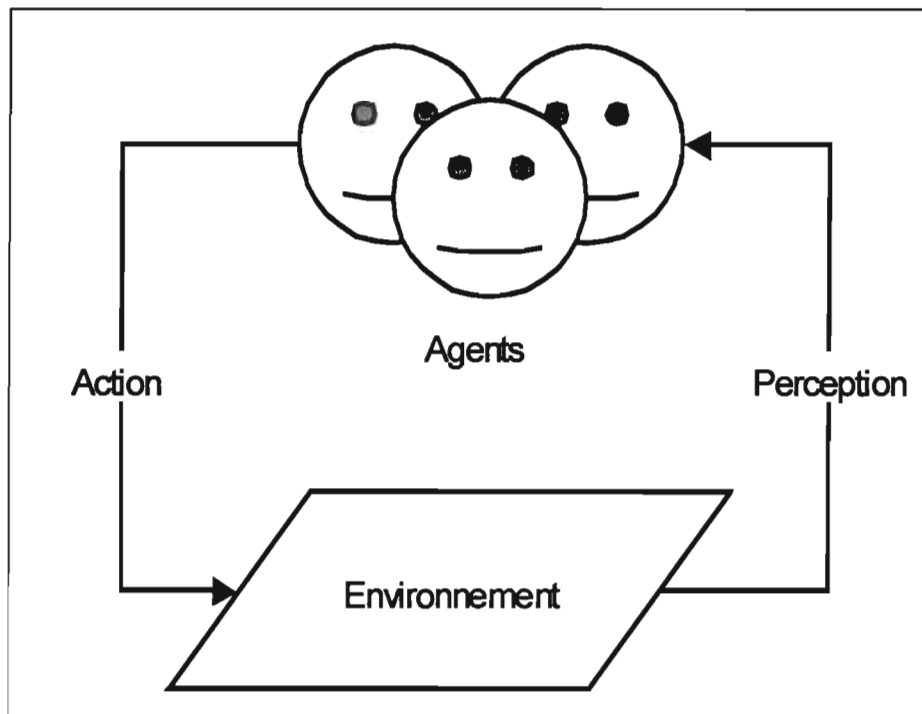


Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'un SMA

Les agents d'un SMA peuvent être classés en deux (2) grands groupes qui sont :

- le groupe des agents dits « **cognitifs** »
- et le groupe des agents dits « **réactifs** ».

Le tableau ci-après résume les différences entre ces deux (2) catégories d'agents.

| Agents cognitifs                                    | Agents réactifs  |
|---|--|
| Ont une représentation explicite de l'environnement | N'ont pas de représentation explicite de son environnement |
| Peuvent tenir compte de leur passé                  | N'ont pas la mémoire de leur passé                         |
| Ont un fonctionnement complexe                      | Fonctionnent sur le mode « Stimulus/réaction »             |
| Sont utilisés en petit nombre                       | Sont utilisés en grand nombre                              |

Tableau 1 : Comparaison agents cognitifs vs agents réactifs

Dans l'étude des systèmes complexes, la démarche consiste à analyser le problème, puis à le représenter avec des processus ou des objets indépendants mais dont les interactions décrivent le fonctionnement des systèmes.

b. Comparaison entre Agent et Objet

La notion d'agent, de par sa définition, se rapproche d'une autre notion déjà connue dans le domaine informatique, à savoir l'Objet. Et de fait, tout comme l'Objet, l'Agent possède un état (ensemble de propriétés caractéristiques) ainsi qu'un comportement (ensemble de ses méthodes).

Cependant, des différences notables existent entre les deux approches.

En effet, selon [Sabas, 2001], on peut dire que :

- les **objets** sont **passifs** tandis que les **agents** sont en permanence **actifs** ;
- les agents sont autonomes et responsables de leurs actions ; ce qui n'est pas toujours le cas pour les objets ;
- les agents dans le système sont mus par des objectifs et leurs comportements sont non-prévisibles. (cf. figure 3)

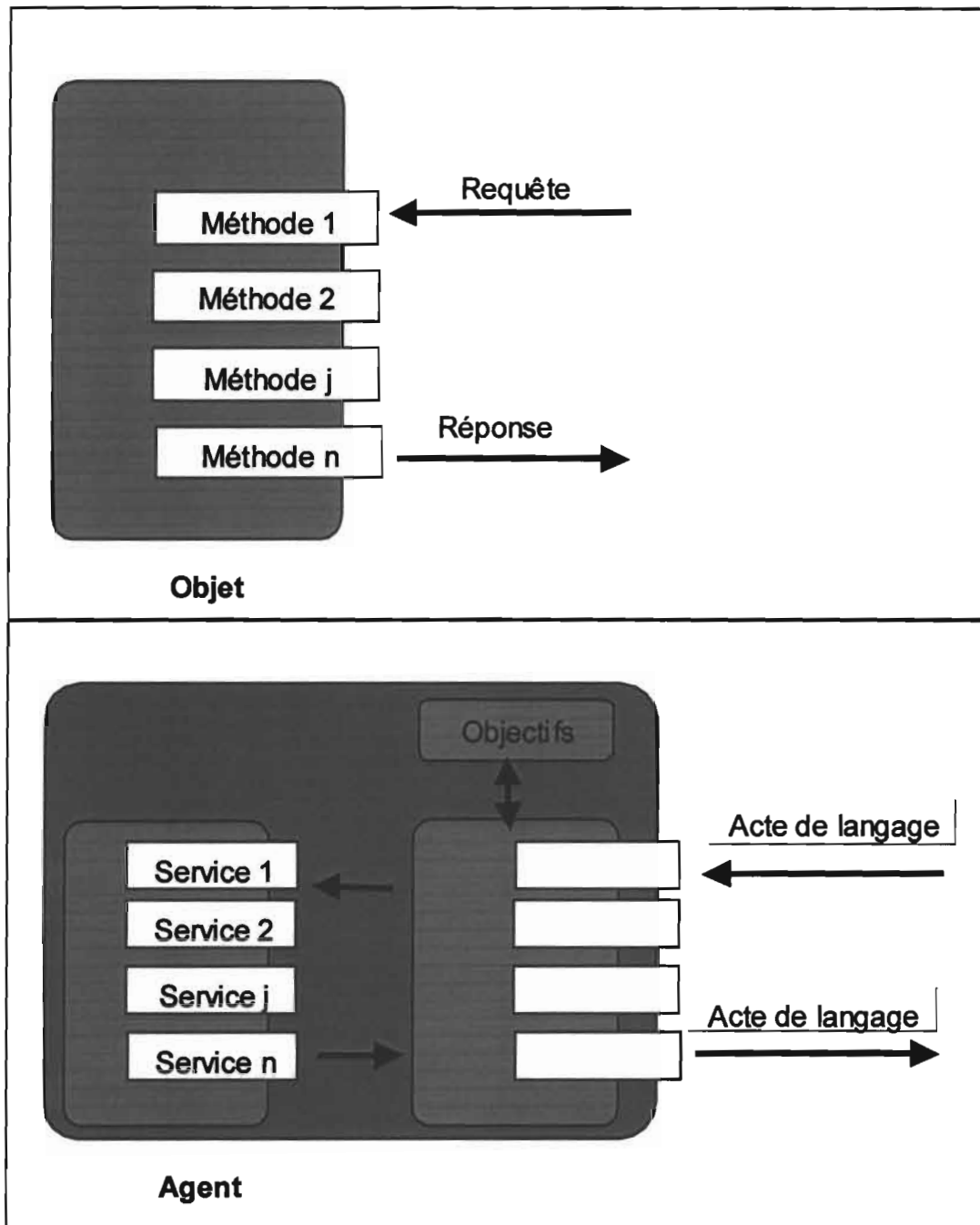


Figure 3 : Fonctionnement comparé d'un Objet et d'un Agent

c. Différents types de SMA

Selon le problème que l'on désire modéliser, le SMA à mettre en place peut faire partie de l'une des trois (3) classes suivantes [Berry, 2001]:

- les systèmes multi-experts (ou systèmes experts) qui modélisent l'interaction de plusieurs agents cognitifs, spécialistes de leur domaine, en vue de résoudre un problème complexe ;
- les systèmes multi-robots dans lesquels on construit des agents artificiels ayant une existence physique – robots – dont le fonctionnement est dirigé vers la réalisation d'un but commun ;
- les systèmes de simulation qui servent de support à la modélisation de phénomènes de sociétés animales. Les agents de tels systèmes sont des agents réactifs et les simulations vont concerner des modèles biologiques.

d. Intérêts des SMA

La modélisation informatique se fondait jusque-là sur des équations différentielles ainsi que sur des relations linéaires de cause à effet. De ces techniques résultaient des modèles puissants certes, mais qui n'étaient pas en mesure de mettre en évidence les rapports existant entre les différents niveaux constitutifs de ces modèles [Ferber, 1995].

L'approche SMA quant à elle, considère plutôt une représentation directe des individus et de leurs comportements. Ce qui permet à l'observateur d'avoir différents niveaux de vue dans le modèle, à savoir :

- une vue de chaque individu dans le système ;
- une vue des groupements d'individus dans le système ;
- et enfin une vue globale du système entier.

Selon cette conception, une évolution du système perçu au niveau supérieur se définit comme résultante des interactions entre les individus [Perrier et al., 1995].

La modélisation par SMA se révèle très bien adaptée à la simulation des systèmes complexes dont le fonctionnement global émerge des actions des individus. Cette technique a consacré la naissance de la notion de « laboratoire virtuel » en ce sens qu'elle offre la possibilité de faire « vivre » des agents autonomes sur ordinateur et de faire sur eux des expérimentations difficilement réalisables dans la réalité. On parle ainsi d'expérimentation « in silico » [Le Page, 1996], par opposition à celles in vivo et in vitro.

En outre, cette notion de **laboratoire virtuel** induit un intérêt au niveau du chercheur qui l'utilise ; en effet, elle lui confère un rôle actif pendant les expériences qu'il mène et l'entraîne à faire une synthèse de connaissances. Les questions posées par le **modélisateur**, pendant son travail de conception, conduisent le spécialiste du domaine à s'interroger lui-même sur l'état courant de ses connaissances. Ce qui a souvent pour résultat de créer des voies nouvelles à explorer par le chercheur.

## 5 - Description du processus de modélisation et de simulation

Dans le but d'obtenir des résultats probants, l'approche de modélisation en vue de la simulation préconise une méthodologie constituée de cinq (5) étapes selon [Aiello, 1997] citant [Delhom, 1989], [Delhom, 1996] et [Law, 1991], et comme le montre la figure 4.

### a. Etape 1 : Formulation du problème

Le but de cette phase est de présenter le problème, d'en déterminer les objectifs ainsi que les critères d'évaluation à utiliser lors de la phase de validation.

Dans le cas du présent stage, un document de spécification des besoins est fourni en Annexe 1.

### b. Etape 2 : Détermination du modèle

Durant cette phase, on aborde réellement la conception du modèle à proprement parlé ; cette phase peut servir également à modifier des modèles existants.

### c. Etape 3 : Génération du simulateur et simulation

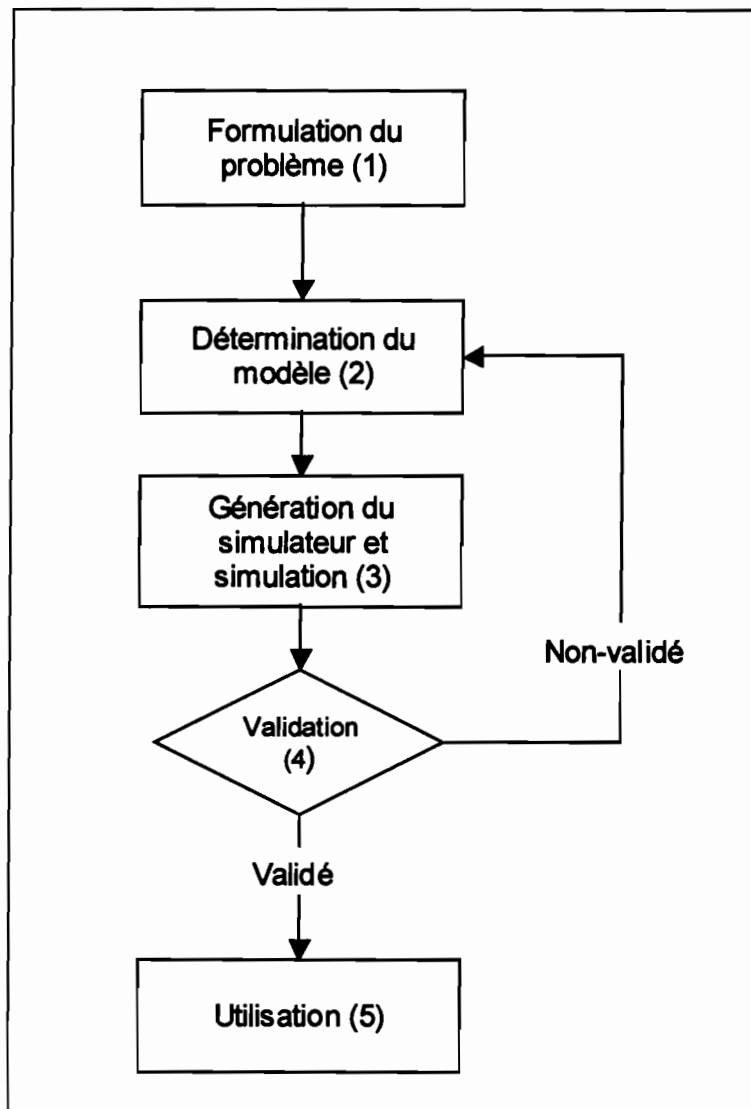
Cette phase est consacrée à l'élaboration du simulateur d'abord, et ensuite à l'exécution des processus de simulation en vue d'obtenir des résultats à analyser.

### d. Etape 4 : Validation

En vue de valider le modèle élaboré, il faut comparer les données issues de la simulation avec celles provenant du système réel. Suivant les critères énoncés en l'étape 1, l'issue de cette phase de validation peut être l'acceptation du modèle tel quel ou un retour en l'étape 2 en vue de sa modification.

e. Etape 5 : Utilisation

Lorsque l'on atteint cette étape, cela signifie que le modèle a été validé et que son exploitation effective peut démarrer.



**Figure 4 : Etapes d'un processus de modélisation et de simulation [Aiello, 1997]**



## II. Présentation du modèle MIOR<sup>1</sup>

### 1 - Principaux agents et fonctionnement

Le processus de la décomposition des matières organiques du sol obéit au schéma ci-après :

- d'abord nous avons présents dans le sol des micro-organismes et de la matière organique sous forme essentiellement de carbone et d'azote ; parmi ces micro-organismes, certains peuvent être en état de dormance ;
- régulièrement, les micro-organismes secrètent des enzymes dans le but de décomposer par contact - **notion de voisinage** - la matière organique dont le carbone et l'azote ainsi libérés servent à satisfaire les besoins des micro-organismes pour leur maintenance et leur croissance. Lorsqu'il n'y a pas de quantité suffisante de matière organique à décomposer, certains micro-organismes passent dans un état de dormance (dans lequel leur activité est réduite). Dans les cas extrêmes, les micro-organismes meurent faute de matière organique ; ils sont alors eux-mêmes consommés par les autres micro-organismes survivants ;
- de plus, les conditions environnementales peuvent influencer sur la plus ou moins bonne capacité des micro-organismes à consommer la matière organique qu'ils décomposent.

La description ainsi faite du processus nous permet d'en identifier les « acteurs » qui sont :

- les micro-organismes dont le but est de satisfaire leurs besoins en carbone et azote ;
- la matière organique qui fournit le carbone et l'azote aux micro-organismes ;
- les enzymes qui cherchent et ramènent le carbone et l'azote aux micro-organismes ;
- et le milieu dont les conditions générales déterminent plus ou moins bien le déroulement de cette activité de décomposition.

A ces acteurs du monde réel vont correspondre des entités informatiques désignées par le terme d'**agents** ou d'**objets**, selon les principes de l'approche SMA. Ces éléments

---

<sup>1</sup> L'appellation MIOR provient de la concaténation des initiales des mots Micro et ORgansime

implémenteront dans une application informatique le fonctionnement de leur pendant réel, comme l'indique le tableau 2 ci-après.

| Tableau de correspondance |  |                      |
|---------------------------|--|----------------------|
| Composants SMA            | Objets du monde réel   | Objets informatiques |
| Agents                    | - Micro-organismes   | - MetaMior           |
|                           | - Enzymes  | - Enzyme             |
| Environnement             | - Milieu   | - OmMiorSphere       |
| Objets                    | - Matière organique  | - OmSphere           |
|                           | - Azote  | - Azote              |
| Relations                 | - Relation de voisinage MetaMior – OmSphere<br>- Association MetaMior – Enzyme   |                      |
| Opérations                | - Recherche de matière organique par les micro-organismes<br>- Décomposition de la matière organique par les enzymes<br>- Consommation de la matière organique par les micro-organismes<br>- Mort des micro-organismes<br>- etc. |                      |
| Opérateurs                | A chacune des opérations décrites ci-dessus correspond un opérateur sur l'entité porteuse de l'opération   |                      |

Tableau 2 : Correspondances Composants SMA - Objets du modèle MIOR

Les agents – entités actives – du modèle MIOR (les MetaMior et les Enzyme) seront des agents réactifs et le modèle lui-même constituera un système de simulation.

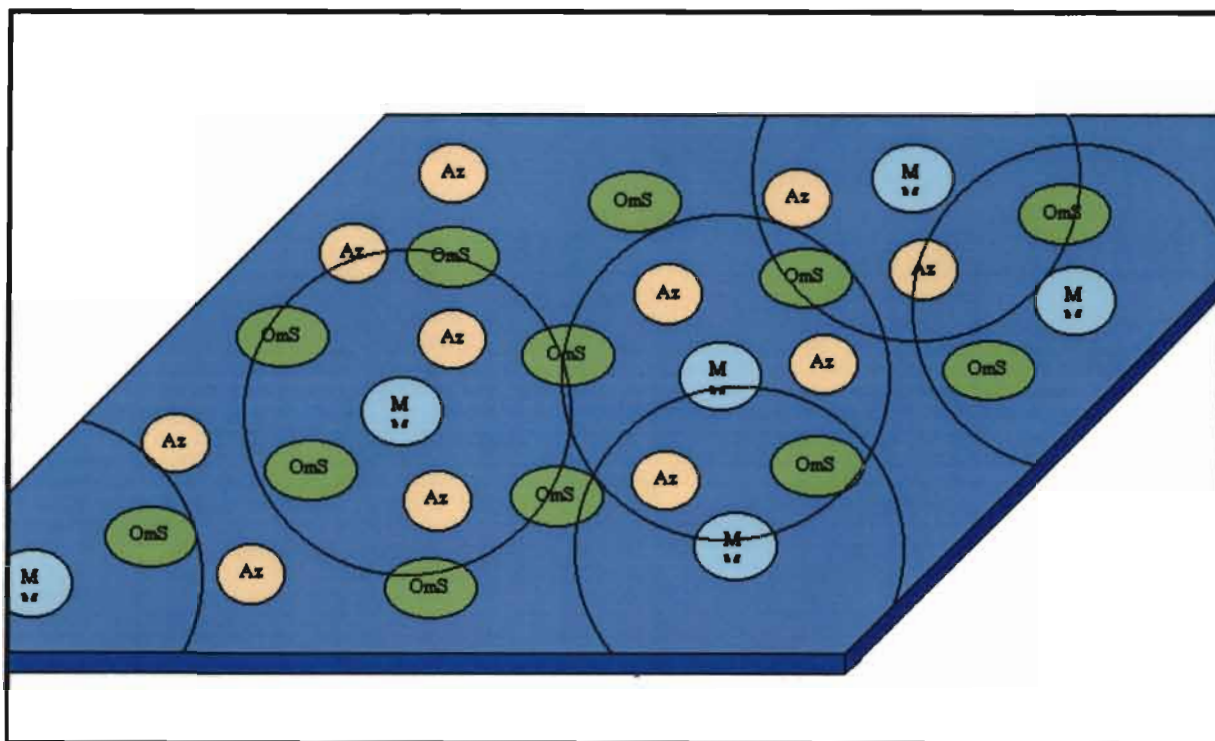





Figure 5 : Présentation des agents du modèle MIOR dans leur milieu

| Légende de la figure ci-dessus  |   |
|---|---|
| Agents  | Description   |
|  | Metamior avec son « aire » d'action (représentée par le cercle autour de l'agent) |
|  | OmSphère  |
|  | Azote   |

## 2 - Diagramme des classes du modèle

Le diagramme de classes UML représente l'ensemble des classes d'objets du modèle avec les éventuelles relations les unissant entre elles.

Ainsi, ce diagramme pour le modèle MIOR se présente tel que le montre la figure 6. On notera la présence d'autres objets en sus de ceux identifiés au paragraphe précédent. Cet état de fait tient à ce que nous avons dû procéder à des décompositions pour certains d'entre eux afin de mieux rendre compte de la manière dont ils se présentent dans la réalité ; et cela conformément aux techniques de généralisation/spécialisation qu'offre la modélisation par objets. Cette hiérarchisation a essentiellement concerné les classes MetaMior et OmSphere.

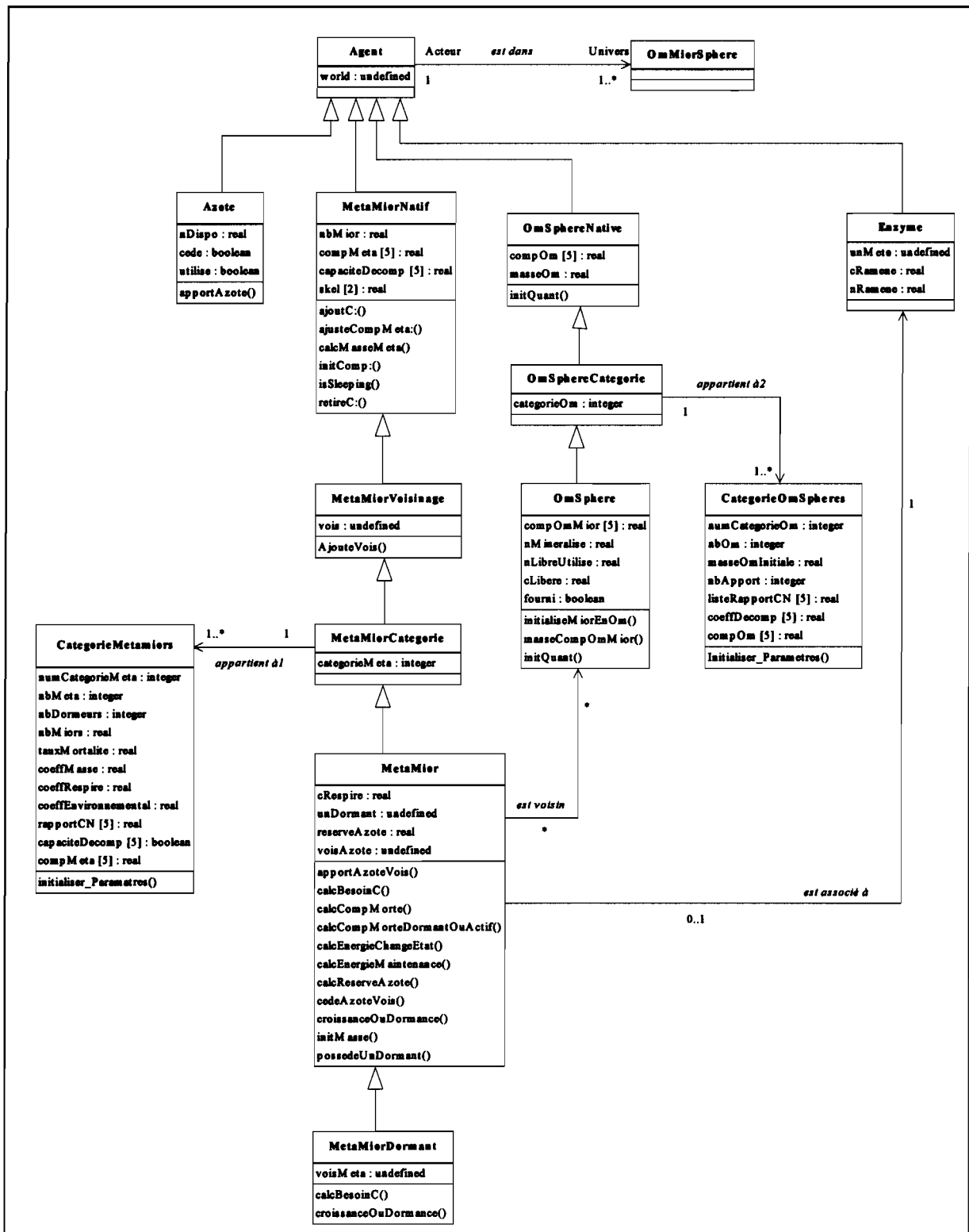


Figure 6: Diagramme des classes du modèle MIOR

### 3 - Principales règles d'évolution du modèle

Dans un SMA tout comme dans la réalité, les modes de fonctionnement des individus au niveau local sont connus ; c'est l'effet global des actions individuelles sur le système entier qui ne peut être exprimé de manière formelle. Ainsi, dans le tableau suivant, nous retrouvons certaines règles d'évolution des différentes entités du modèle.

| Entité       | Règles  | Signification   |
|--------------|---|---|
| MetaMior     | [Quantité d'azote du squelette] =<br>[Quantité de carbone du squelette] x<br>[Ratio (quantité carbone / quantité<br>d'azote)]                                   | Les quantités de carbone et d'azote<br>du squelette d'un MetaMior doivent<br>respecter une proportion fixée   |
|              | [Energie de maintenance] = [Quantité<br>de carbone du squelette] x<br>[Coefficient de respiration]  | Le MetaMior pour assurer son<br>métabolisme basal, a besoin d'une<br>quantité d'énergie égale à une<br>proportion du C qui le constitue ; le<br>taux appliqué pour ce calcul est égal<br>à son coefficient de respiration |
|              | [Croissance potentielle] =[Taux de<br>croissance] x [Coefficient<br>environnemental]  | La croissance d'un MetaMior peut<br>être limitée par les conditions<br>environnementales d'où un<br>coefficient environnemental   |
|              | [Besoin en carbone] = [Energie de<br>maintenance] + [Energie de<br>croissance]  | A chaque cycle, le MetaMior cherche<br>à rester en vie et à croître dans la<br>mesure du possible   |
| OmSphere     | [Quantité de carbone libérée] =<br>$\sum_i$ ([Masse en carbone de<br>l'OmSphere] x [Coefficient de<br>décomposition] <sub>i</sub> )                             | L'OmSphere cède, lors de sa<br>décomposition par l'enzyme, une<br>proportion du carbone des différents<br>composés organiques le constituant  |
| OmMiorSphere | [Quantité d'azote disponible] =<br>[Quantité d'azote initiale] + $\Delta$ <sub>[Variation de<br/>la quantité d'azote]</sub> - [Besoin concurrentiel<br>d'azote] | La quantité d'azote disponible dans le<br>milieu évolue en fonction de la<br>consommation   |

## 4 - Présentation du simulateur

L'une des finalités du travail de modélisation qui nous préoccupe ici est de faire des simulations informatiques. Cela nous a conduit à construire d'autres objets pour constituer son interface graphique de la partie du système commise à cette tâche, en d'autres termes le simulateur. Ces objets sont tout aussi importants que les agents en interaction ; ce sont eux en effet qui permettent à l'utilisateur d'interagir avec l'application. Ce sont principalement :

- **EcranScenario** qui représente l'écran principal de saisies des paramètres de la simulation (cf. figure 7) ;
- **Generateur** qui permet de créer des scénarios d'expérimentation pour exécuter automatiquement des séries de simulation (cf. figure 8) ;
- **Microorg** qui modélise lui l'espace « physique » de la simulation (cf. figure 9) ;
- **Afficheur** qui constitue l'interface de sortie et de consultation des données en sortie de la simulation (cf. figure 10).

Plutôt que leur description interne avec leurs attributs et méthodes, il paraît plus intéressant de montrer ces objets tels qu'ils se présentent à l'écran effectivement.

| METAMIORS  |                                     |  |  |  |                                  |
|--|-------------------------------------|--|--|--|----------------------------------|
| Nb. de Métamiors :   | <input type="text" value="60"/>     | % Dormeurs :                             | <input type="text" value="100"/>       | Masse 6/10+6 Miors :                           | <input type="text" value="0.8"/> |
| Taux de mortalité :  | <input type="text" value="0.01"/>   | Taux de croissance :                     | <input type="text" value="1"/>         | Taux de respiration :                          | <input type="text" value="0.2"/> |
| Rapport C/N Miors :  | <input type="text" value="6"/>      | Nb. Miors/MétaMior (10+6) :              | <input type="text" value="2.166"/>     | Coefficient environnemental :                  | <input type="text" value="1"/>   |
| Composés :   |                                     | Capacité decomp. :                       | Composit° des miors :                  | Catég. MM. n° : <input type="text" value="1"/> |                                  |
| Composé 1 :  |                                     | <input type="text" value="100"/> (en %)  | <input type="text" value="40"/> (en %) | « Début  |                                  |
| Composé 2 :  |                                     | <input type="text" value="15"/> (en %)   | <input type="text" value="20"/> (en %) | < Précédent                                    |                                  |
| Composé 3 :  |                                     | <input type="text" value="50"/> (en %)   | <input type="text" value="20"/> (en %) | Nouvelle catégorie                             |                                  |
| Composé 4 :  |                                     | <input type="text" value="3"/> (en %)    | <input type="text" value="20"/> (en %) | Modifier                                       |                                  |
| Composé 5 :  |                                     | <input type="text" value="0"/> (en %)    | <input type="text" value="0"/> (en %)  | Supprimer                                      |                                  |
|  |                                     |  |  | Suivant >                                      |                                  |
|  |                                     |  |  | Fin >>   |                                  |
| OMSPHERES  |                                     |  |  |  |                                  |
| Masse Omsphères :  | <input type="text" value="1.7168"/> | Nb. Om :                                 | <input type="text" value="10"/>        | Nb. apport(s) :                                | <input type="text" value="1"/>   |
|  |                                     | Catég. Oms. n° :                         | <input type="text" value="1"/>         |  |                                  |
| Composés :   |                                     | Composit° en % masse :                   | Coeff. de decomp. :                    | Rapport C/N :                                  |                                  |
| Composé 1 :  |                                     | <input type="text" value="22.5"/> (en %) | <input type="text" value="1"/>         | <input type="text" value="50"/>                |                                  |
| Composé 2 :  |                                     | <input type="text" value="22.1"/> (en %) | <input type="text" value="1"/>         | <input type="text" value="34"/>                |                                  |
| Composé 3 :  |                                     | <input type="text" value="32.4"/> (en %) | <input type="text" value="1"/>         | <input type="text" value="250"/>               |                                  |
| Composé 4 :  |                                     | <input type="text" value="23"/> (en %)   | <input type="text" value="1"/>         | <input type="text" value="28"/>                |                                  |
| Composé 5 :  |                                     | <input type="text" value="0"/> (en %)    | <input type="text" value="0.05"/>      | <input type="text" value="33.6"/>              |                                  |
|  |                                     |  |  | « Début  |                                  |
|  |                                     |  |  | < Précédent                                    |                                  |
|  |                                     |  |  | Nouvelle catégorie                             |                                  |
|  |                                     |  |  | Modifier                                       |                                  |
|  |                                     |  |  | Supprimer                                      |                                  |
|  |                                     |  |  | Suivant >                                      |                                  |
|  |                                     |  |  | Fin >>   |                                  |
| Azote libre :  | <input type="text" value="40"/>     | Besoin concurrentiel d'azote :           | <input type="text" value="0"/>         | Distance maximale :                            | <input type="text" value="15"/>  |
|  |                                     | Distance Vois. OM :                      | <input type="text" value="15"/>        |  |                                  |
| Nb. pas de temps :   | <input type="text" value="100"/>    | Fréquence :                              | <input type="text" value="0"/>         | Nb. de répétitions :                           | <input type="text" value="1"/>   |
|  |                                     | Fichier unique : oui                     |  | Générer scénario...                            |                                  |
| Accepter Réinitialiser Quitter MAJ graphique : non Variables de sortie... Etat variables de sortie... A Propos |                                     |  |  |  |                                  |

Figure 7 : Présentation de l'objet EcranScenario, interface de saisie des paramètres de la simulation

| GENERATEUR DE SCENARIOS  |                                |
|--|--------------------------------|
| Parametre : quantNLibre  | coeffCroissance                |
| De : <input type="text" value="1"/> à : <input type="text" value="5"/> par pas de : <input type="text" value="0.5"/> | <input type="text" value="-"/> |
| Ajouter paramètre Accepter tout Quitter  | <input type="text" value="▲"/> |
|  | <input type="text" value="▼"/> |
|  | Editer Supprimer               |

Figure 8 : Présentation de l'objet Generateur



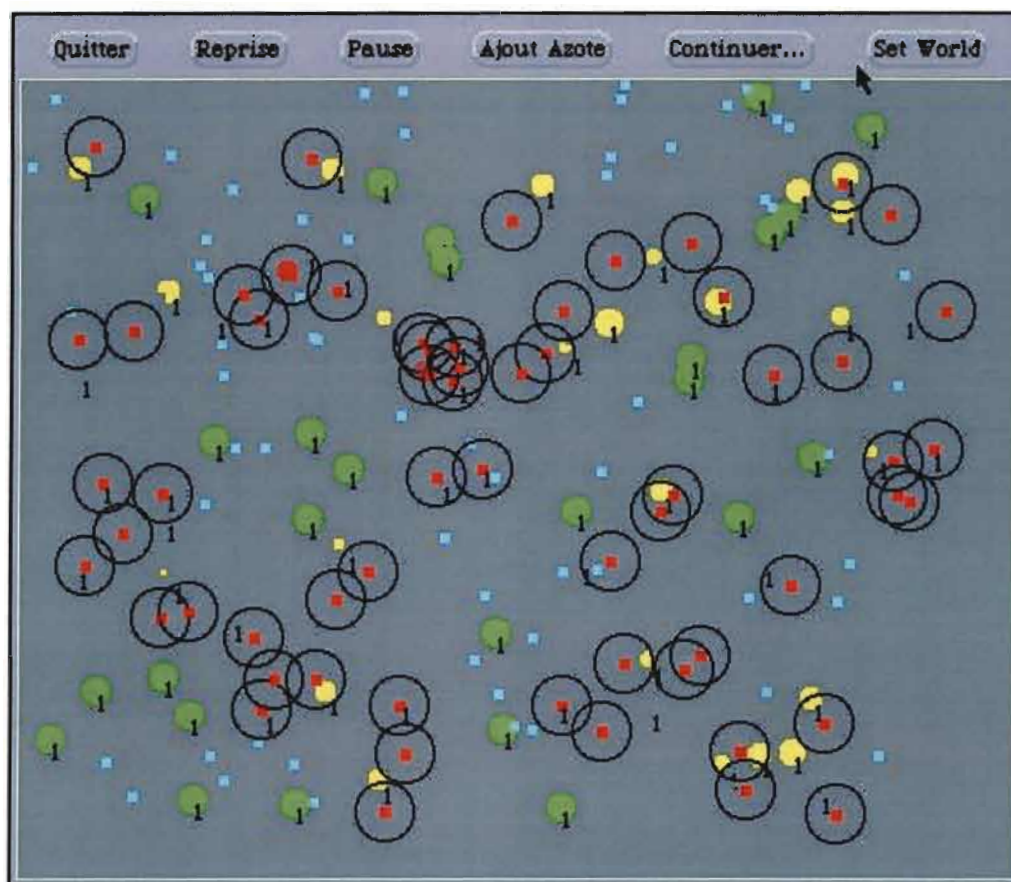


Figure 9 : Présentation de l'objet MicroOrg

#(3 February 2003 11:40:55 am)

| N° pas : | C MM actif :      | C MM dormant :    | Masse C Om.:      | C libéré :        | Qté N libre : | Qté N puisé :         | Actifs en dorm.: | Actions. : |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-----------------------|------------------|------------|
| 19       | 20.22766223703636 | 65.4919862421259  | 687.917116980771  | 3.991732531750248 | 38.8          | 8.1082472152864e-18   |                  |            |
| 20       | 20.5016595069104  | 64.8364842597046  | 684.2525012459115 | 4.04553244740727  | 38.8          | 0                     |                  |            |
| 21       | 20.78074404262535 | 64.1881194171076  | 680.521449651412  | 4.10093190138208  | 38.8          | 4.768135857421324e-17 |                  |            |
| 22       | 21.06500805879344 | 63.54623822293647 | 676.722918020889  | 4.15614880852507  | 38.8          | 1.699363619584959e-16 |                  |            |
| 23       | 21.35454659942028 | 62.9107758407071  | 672.855840250733  | 4.213001611758684 | 38.8          | 0                     |                  |            |
| 24       | 21.6494577566118  | 62.28166886230005 | 668.919127532064  | 4.27090931988406  | 38.8          | 0                     |                  |            |
| 25       | 21.94984292575127 | 61.658851401477   | 664.911667492426  | 4.32889155132236  | 38.8          | 1.55728577512413e-16  |                  |            |

Nb. de catégorie(s) :  Nb. d'omSphère(s) :  Nb. pas :  Pas restants :  Nb. répétitions :

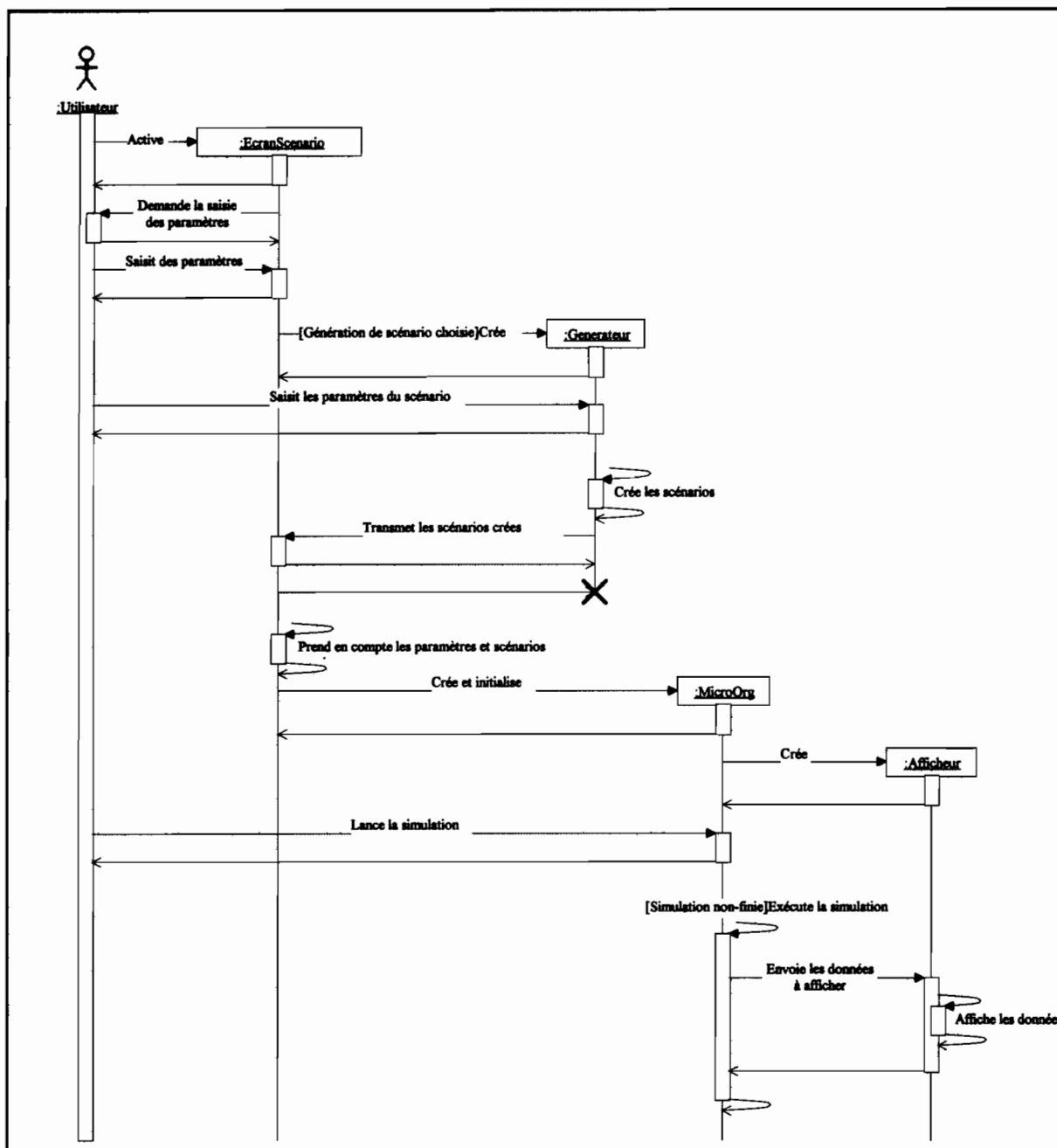
Quantité d'azote initiale :  Azote disponible :  Azote total puisé :  C total respiré :

Figure 10 : Présentation de l'objet Afficheur

## 5 - Exemple de cas d'utilisation

Un diagramme de cas d'utilisation UML permet de décrire le système en privilégiant le point de vue de l'utilisateur.




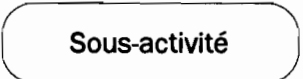
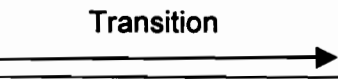

Le cas d'utilisation présenté par la figure 11 est celui dans lequel l'utilisateur – expérimentateur – interagit avec le système pour lancer ses simulations.



**Figure 11 : Schéma du principal cas d'utilisation**

## 6 - Diagrammes d'activités du modèle

Les diagrammes d'activités UML décrivent les traitements effectués par le système en présentant leur déroulement. Avec la notion de couloir d'activités, ils permettent de décrire la responsabilité entre les différents acteurs opérationnels du système.

| Légende des symboles utilisés dans les diagrammes d'activité                        |  |
|---|--|
|    | Point de départ d'une suite d'actions                                    |
|    | Point final d'une suite d'actions  |
|    | Décrit une action « élémentaire »  |
|    | Décrit une sous-activité pouvant être décomposée en actions élémentaires |
|  | Définit le passage d'une action à une autre                              |
|  | Définit une alternative conditionnée entre plusieurs actions             |

### a. Processus principal de décomposition de la matière organique

Ce diagramme retrace l'activité sur laquelle se fonde tout le modèle. En effet, le but de notre modèle est de simuler « **in silico** » [Le Page, 1996] la décomposition se déroulant dans la réalité dans le sol.

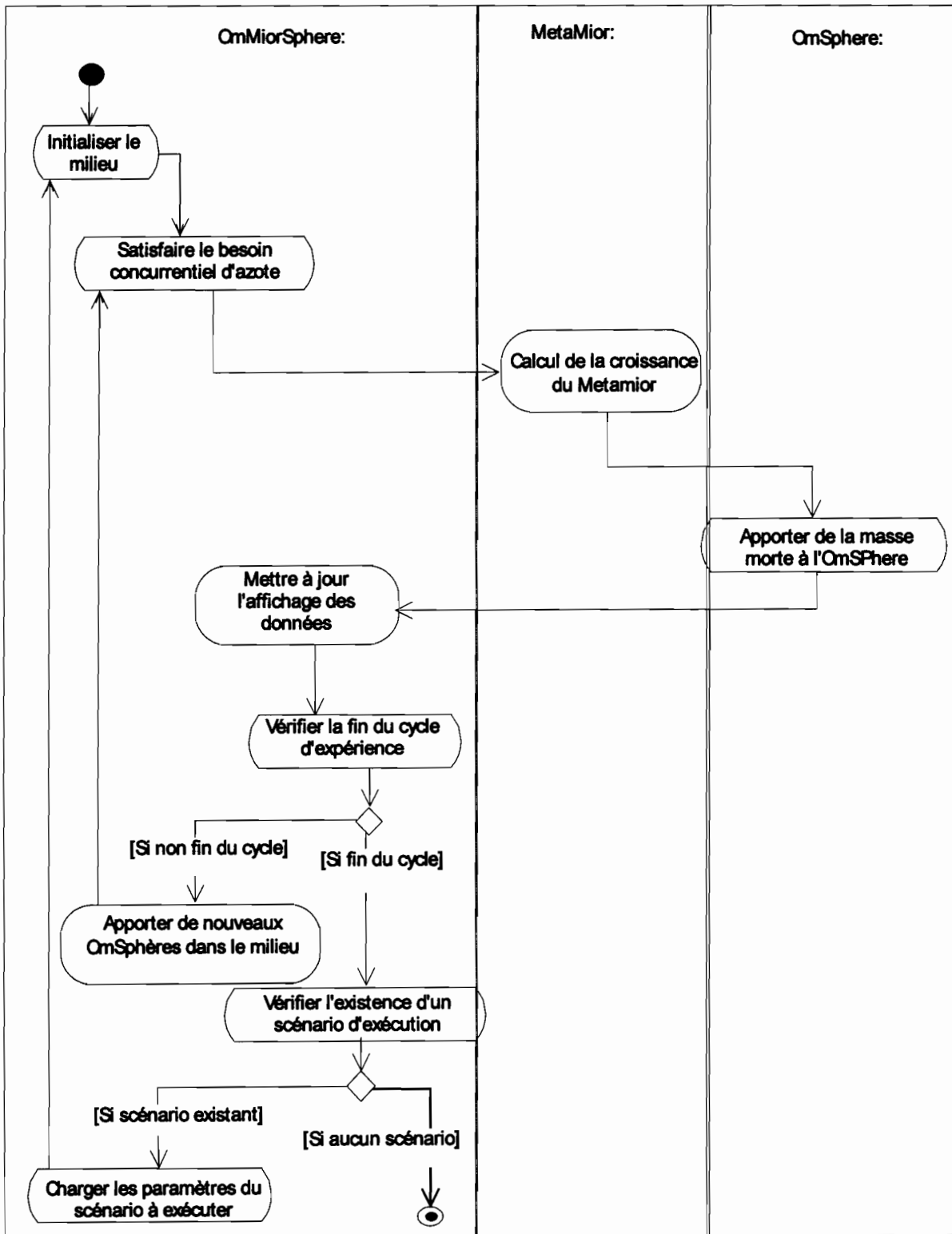


Figure 12: Diagramme d'activités de la décomposition des OmSphères

b. Schéma détaillé de la sous-activité « Calcul de la croissance du Metamior »

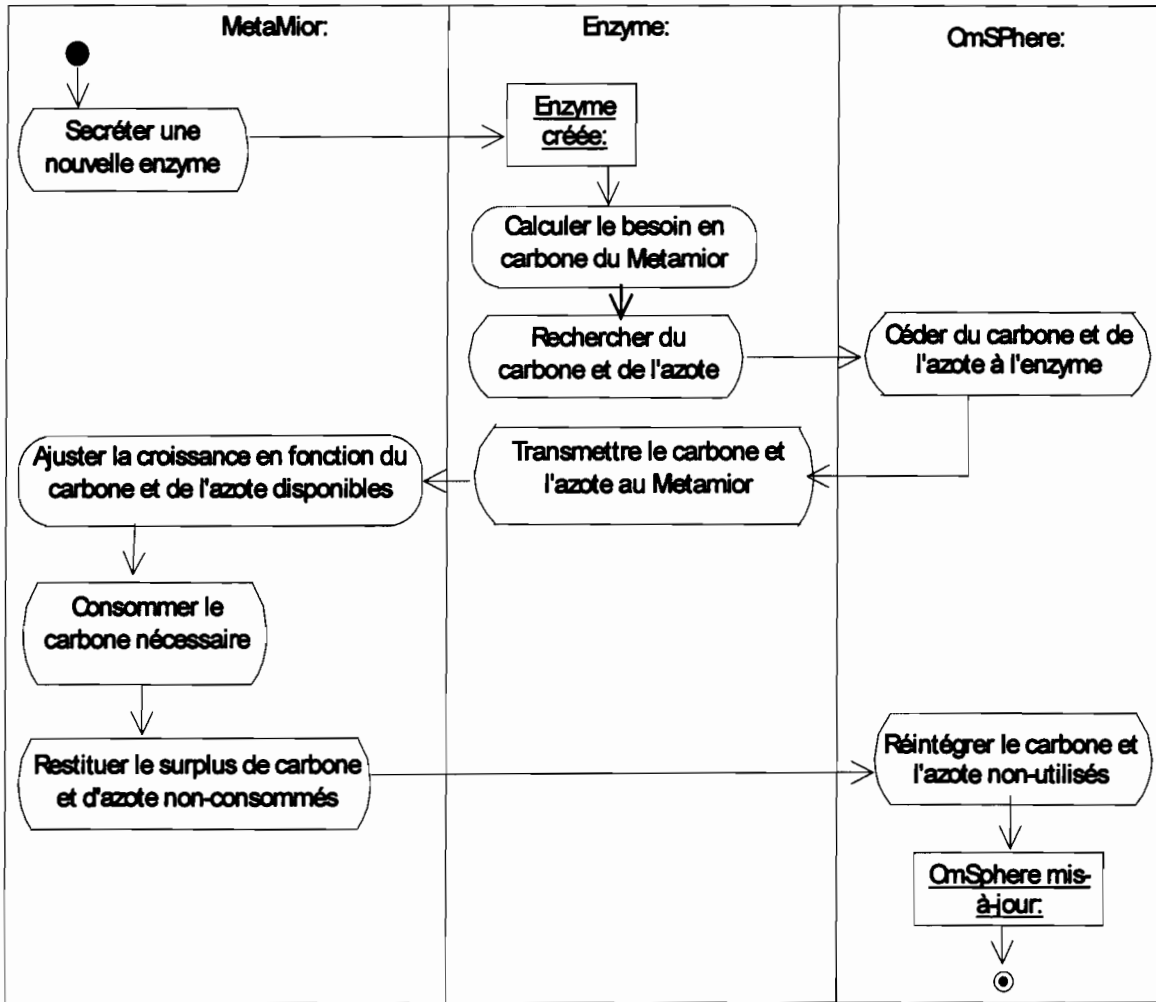


Figure 13: Schéma du calcul de la croissance du Metamior

c. Description du processus de « calcul du besoin en carbone du Metamior »

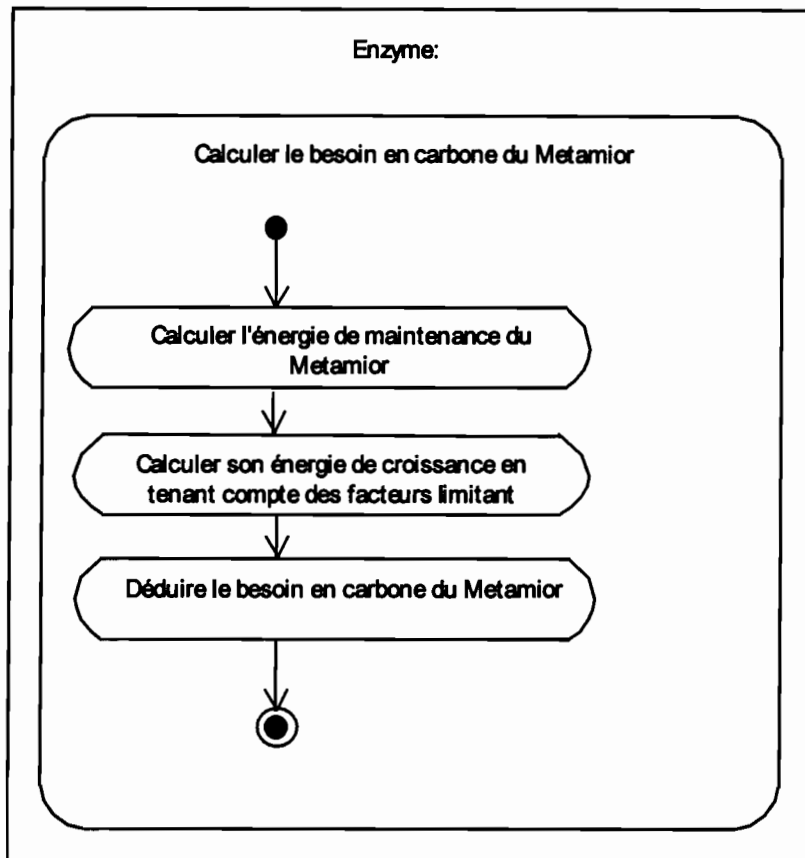
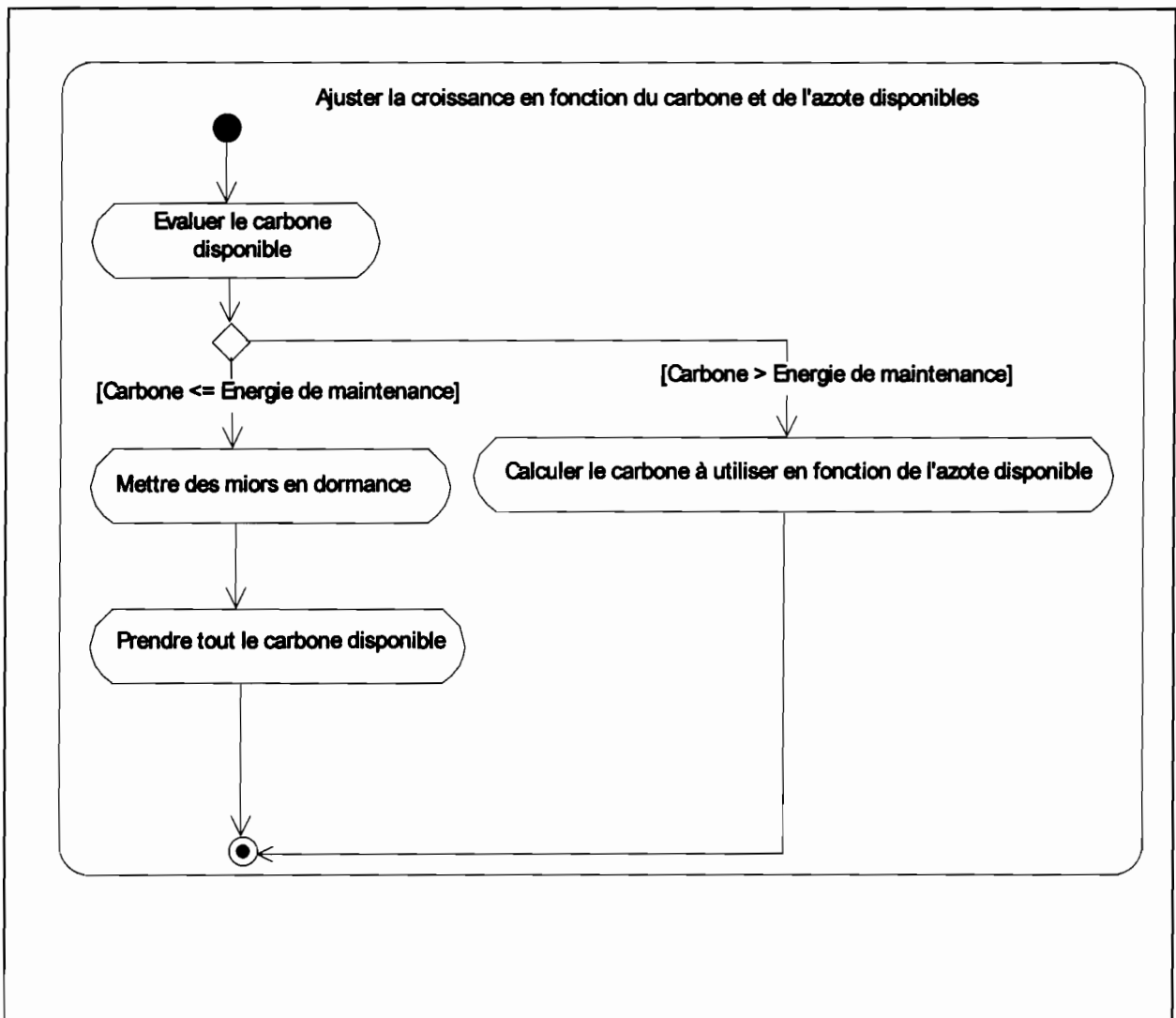


Figure 14 : Description du processus de calcul du besoin en carbone du Metamior

d. Description du processus d'ajustement de la croissance du Metamior en fonction des ressources disponibles



**Figure 15 : Description du processus d'ajustement de la croissance du Metamior**

### **III. Mise en œuvre et validation du modèle MIOR**

#### **1 - Outils de travail**

Plusieurs méthodes de modélisation informatique existent ; pour le cas qui nous concerne, nous avons choisi UML pour décrire le modèle MIOR.

UML – pour Unified Modeling Language – est le langage qui s’est imposé ces dernières années comme le standard en matière de modélisation objet. Cet état de fait provient de ce que ce langage présente de nombreux avantages à savoir, entre autres :

- Il permet de construire des modèles objets indépendants du langage qui sera utilisé pour les implémenter ;
- Il possède une notation graphique universelle qui permet d’exprimer les solutions objets de façon claire et sans ambiguïtés ;
- Il permet ainsi une meilleure compréhension et une meilleure communication entre l'utilisateur et le « modélisateur ».

Pour l’implémentation du modèle décrit, l’environnement de développement utilisé est Squeak. Squeak est un environnement de développement intégré (EDI) graphique et complet, qui est « open source » et gratuit ; il est basé sur Smalltalk, qui est considéré comme l’un des premiers langages de programmation orientée objets (POO). Cet environnement offre une large bibliothèque de classes en standard et est d’une grande simplicité d’usage. Sa grande souplesse permet le prototypage et le développement rapides d’applications ; la maintenance des programmes y est aisée du fait des possibilités de compilation incrémentale et de modification « à chaud » du code. Tout ceci contribue à faire de Squeak un environnement adapté pour le développement d’applications en constante évolution comme les programmes de simulation que nous avons ici.



## 2 - Résultats obtenus et validation du modèle

### a. Paramètres de la simulation

La mise en œuvre de la solution décrite précédemment a abouti à la réalisation d'une application de simulation de l'activité des micro-organismes du sol. Cette application fournit en sortie des données choisies par l'utilisateur et cela, en fonction de paramètres initialement saisis.

Dans le cas de MIOR, les paramètres que l'on peut faire varier sont ceux relatifs aux micro-organismes (MetaMior), à la matière organique (OmSphere) et au milieu d'expérimentation (OmMiorSphere).

Le tableau suivant recense pour chacun de ces types d'acteurs leurs attributs paramétrables.

| Acteur       | Liste des attributs paramétrables   |
|--------------|---|
| MetaMior     | masse en carbone, nombre, taux de croissance, taux de mortalité, coefficient de respiration, capacité de décomposition des composés organiques, pourcentage de micro-organismes en dormance, etc. |
| OmSphere     | masse en carbone, nombre, coefficient de décomposition des composés organiques constitutifs, etc.   |
| OmMiorSphere | Quantité d'azote libre, coefficient environnemental, etc.   |

Tableau 3 : Liste des paramètres de la simulation

Pour tous ces paramètres, il est possible d'en faire des combinaisons pour obtenir une très large gamme de possibilités d'expérimentations que l'on peut tester à l'ordinateur.

### b. Résultats obtenus

Chaque cycle de simulation à partir de l'application fournit en sortie les données suivantes :

- la quantité de carbone constitutif des micro-organismes à l'état actif ;
- la quantité de carbone constitutif des micro-organismes en état de dormance ;
- la quantité de carbone disponible dans la matière organique ;
- la quantité de gaz carbonique libéré par la respiration des micro-organismes ;
- la partie des micro-organismes qui passent en état de dormance ;

- la partie des micro-organismes morts qui deviennent eux-mêmes de la matière organique consommable ;
- le cumul du carbone total du milieu.

L'application conserve automatiquement toutes ces informations dans des fichiers (cf. Annexe 5 et 6) dont certains sont exploitables sous un tableur (Microsoft Excel®). Cela permet d'en faire des représentations graphiques pour mieux les interpréter, comme le montrent les courbes de la figure 16. Ces courbes ont été obtenues à partir de données issues de séries de simulation avec des nombres de MetaMior et d'OmSphere indiqués dans les légendes.

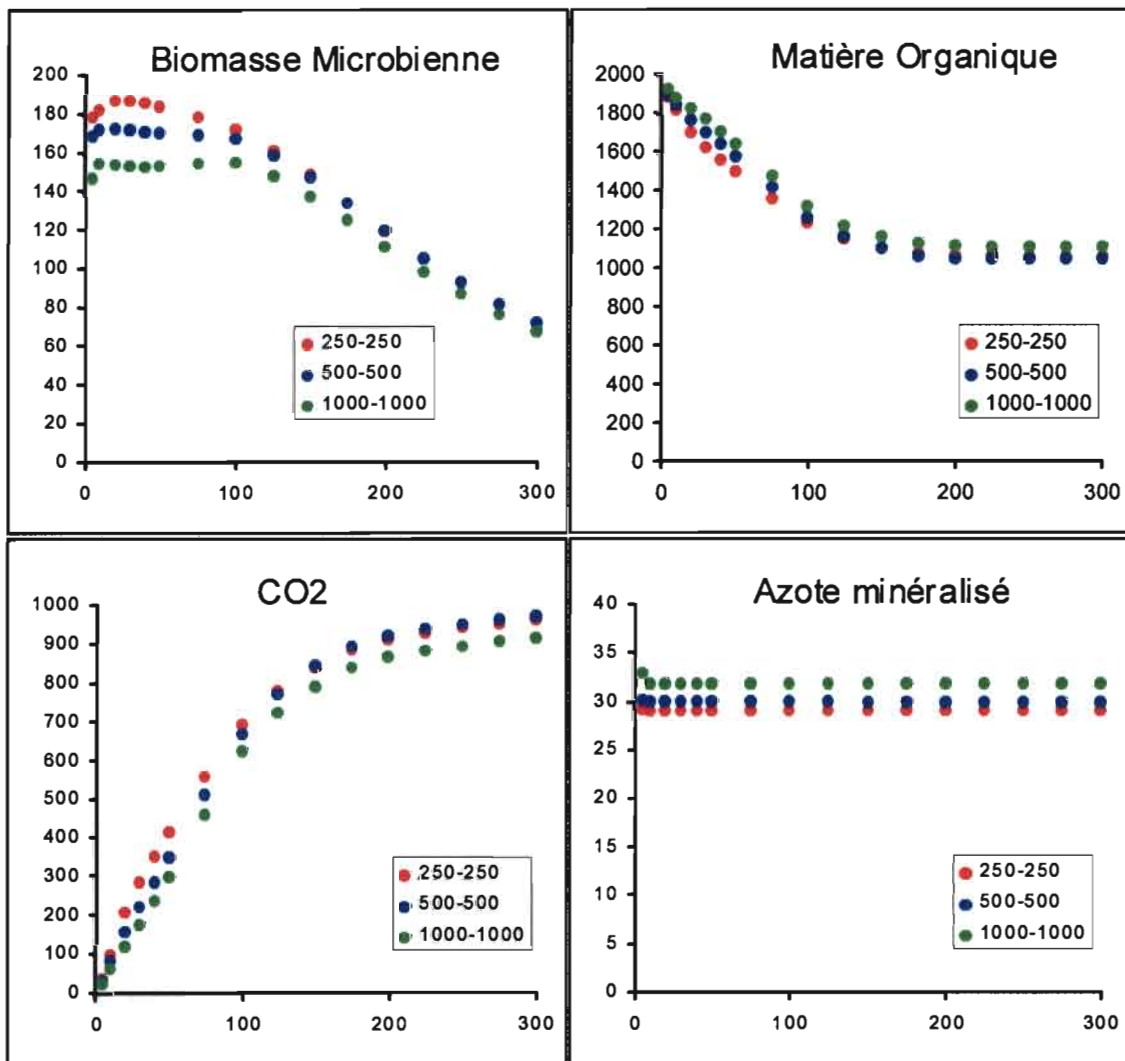


Figure 16 : Evolution de certaines données en sortie du simulateur pour des nombres différents de MetaMiors et d'OmSpheres

Une analyse sommaire de ces courbes permet de noter un comportement « logique » du modèle, en ce sens que l'on observe qu'elles présentent toutes une allure générale

identique pour des populations d'acteurs différentes. Cela laisse présager de l'issue favorable de l'étape de validation, avec la confrontation de ces résultats avec ceux issus des expérimentations réelles.

c. Validation du modèle

La phase de validation d'un modèle offre l'opportunité de savoir si les objectifs initiaux ont été atteints. Elle conditionne donc l'utilisation du modèle de simulation en tant qu'outil d'aide et d'assistance à la recherche.

Dans le cas de MIOR, il apparaît que cette phase n'est pas réellement entamée, même s'il paraît difficile d'établir des frontières nettes entre les différentes étapes du processus de modélisation et de simulation. Jusque là, le travail consiste à analyser les données fournies par le modèle pour toujours mieux le calibrer ; le but étant à terme d'obtenir un outil le plus fiable et le plus complet possible. C'est alors seulement que l'on pourra faire les comparaisons avec les données réelles pour juger de la valeur du modèle informatique.

Il est à signaler à ce propos que les expérimentations réelles ont déjà été effectuées en laboratoire et qu'il reste à en analyser les résultats.

## **IV. Bilan général**

### **1 - Conditions générales de travail**

Si l'apport de l'informatique dans tous les domaines de notre vie est de nos jours incontesté, il reste que les avantages induits par l'usage de cette technique se situent en aval d'une lourde tâche préalable du concepteur en informatique. Cette phase initiale est marquée très souvent par des difficultés diverses et variées.

Ainsi, en ce qui nous concerne ici, nous avons dû faire face à des obstacles liés essentiellement au caractère inédit pour nous du thème, à savoir la modélisation informatique de « phénomènes naturels ». La nouveauté de la matière a exigé de notre part l'acquisition de notions de base propres au domaine agronomique, afin de pouvoir comprendre et discuter avec les utilisateurs. Cette étape est d'une importance capitale, puisqu'elle permet au concepteur et à l'utilisateur de poser les bases de leur collaboration à venir et de s'assurer ainsi que les résultats à terme, ne dévieront pas des objectifs visés. Pour notre part, durant cette phase, nous avons été aidé par la bonne connaissance en la matière de nos utilisateurs ; ceux-ci ayant déjà suivi des séminaires de formation dans le domaine des Systèmes Multi-Agents.

A côté de ces « entraves », l'Unité de Recherche IBIS a tout mis en œuvre pour faciliter le déroulement de ce stage. Ainsi, dès le début, nous avons bénéficié d'un voyage d'études à Dakar au Sénégal. Et durant notre séjour, nous avons eu de fructueuses séances de travail avec un spécialiste du domaine des SMA, en la personne du PR Christophe CAMBIER. M. CAMBIER est à l'auteur, entre autres, du modèle SIMDELTA (1994) faisant une synthèse des connaissances en hydrologie, écologie, biologie et sociologie sur le delta du Niger au Mali.

De plus, les ressources matérielles (ordinateur avec connexion Internet, imprimante) ont été mises à notre disposition pour nous permettre de travailler dans les meilleures conditions.

### **2 - Perspectives**

Le fait qu'un modèle soit une image réduite de la réalité n'empêche pas que lors de la modélisation, l'on veuille se rapprocher au mieux de l'objet que l'on modélise. De sorte que l'on peut dire qu'un modèle n'est jamais fini d'être totalement élaboré.

Ainsi en ce qui concerne MIOR, les améliorations futures pourront être de deux (2) ordres principaux.

a. Meilleure représentation biologique des processus

A ce niveau, un premier point d'évolution du modèle serait l'introduction d'un nouveau type d'agents à savoir les **prédateurs de bactéries** pour qui les micro-organismes constitueront des proies. Cette prise en compte de ce nouveau type d'acteurs permettra de se rapprocher davantage du milieu réel simulé.

Ensuite, l'on pourrait envisager de mieux rendre compte des processus de croissance des agents au travers de leur forme. Actuellement, tous les agents sont représentés par des cercles, ce qui est loin de la réalité ; les bactéries existent sous les formes les plus diverses (en bâtonnets, en spirale, ronde, incurvé, etc.).

Enfin, une troisième amélioration majeure du modèle consisterait en une spatialisation des interactions environnementales. Cela signifie que l'on pourrait dans un proche avenir, considérer sur l'OmMiorSphere des zones distinctes avec chacune ses ressources propres inaccessibles des autres régions, et dans lesquelles les processus se dérouleraient indépendamment des autres zones. Ce qui n'est pas le cas présentement où les ressources sont communes à tous les acteurs du milieu simulé.

b. Améliorations informatiques

A plus longue échéance, une évolution majeure consisterait à transporter le modèle final de la plate-forme actuelle (Squeak) vers une autre plus « professionnelle ». Cependant, il paraît pour l'instant judicieux de tirer le meilleur partie des avantages offerts par l'environnement actuel et décrits plus haut pour obtenir des résultats probants plus rapidement. Ensuite seulement, apparaîtrait l'intérêt de réécrire l'application dans des langages du style de Java, pour bénéficier de leurs avantages qui peuvent être :

- la gestion du parallélisme : actuellement, les traitements se font de manière séquentielle (activité des micro-organismes par exemple). Afin de mieux simuler le monde réel, il serait intéressant de faire fonctionner ces micro-organismes en parallèle. Ainsi, à titre d'illustration, toute l'activité d'un micro-organisme pourrait constituer un « processus » s'exécutant en même temps que d'autres « processus ». Dans cette optique, la concurrence d'accès aux ressources que constituent la matière organique et l'azote devra être gérée avec la plus grande rigueur ;

- la souplesse des outils de création d'interfaces graphiques : Squeak offre de grandes possibilités en matière d'interfaces mais des insuffisances notables persistent (difficultés avec les zones de saisie,

## Conclusion

Ce stage à l'IRD nous a permis de découvrir cette nouvelle approche de modélisation informatique que constitue l'approche par les SMA. Apparue il y a de cela une quinzaine d'années, cette technique se révèle d'une aide précieuse pour les scientifiques et les chercheurs de domaines très divers. Elle constitue pour eux un outil puissant d'analyse pour la conception des systèmes complexes ; et cela tient principalement au fait que, contrairement aux méthodes classiques de simulation où un moyen de contrôle global était mis en œuvre, l'approche par SMA préconise un contrôle distribué assuré par chaque agent au niveau local.

A travers le modèle MIOR et le programme de simulation associé que nous avons contribué à mettre en œuvre, nous avons pu mesurer l'utilité que présentait cette technique pour les chercheurs.

De même, nous avons pu constater que de plus en plus, la notion de « **programmation orientée agent** » (POA) s'imposait.

Un courant de pensée informatique a fait son apparition, pour lequel il est entendu que, tout comme la programmation orientée Objet (POO) est venue pallier aux insuffisances de l'approche fonctionnelle, la POA viendra combler les lacunes que présente cette dernière technique. Selon cette nouvelle vision en effet, le concept Objet est bien adapté quand il s'agit de décrire justement les objets inertes du monde réel ; il montre très vite des insuffisances lorsque l'on s'intéresse à la dynamique des phénomènes impliquant ces objets en tant qu'acteurs indépendants. Ce qui justifie le passage de la POO à la POA.

Qu'en sera-t-il réellement de l'avènement de ce nouveau paradigme ? La relative jeunesse du concept ne nous permet pas de trancher nettement.

Nous espérons pouvoir assister dans un futur proche à ce qui pourrait constituer une évolution notable dans la conception informatique dans le but de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes complexes qui régissent bien de domaines d'activités de notre vie.

## **Bibliographie**

- **Systèmes Multi-Agent et Gestion des Ressources Naturelles – Recueil de Textes**, CIRAD, TERA - Espaces et Ressources, Baillarguet 04-15 février 2002
- **"Squeak programmation"**, Xavier Briffault et Stéphane Ducasse, Eyrolles 2002

## **Références bibliographiques**

- **[Aiello, 1997]** Antoine Aiello **"Environnement Orienté Objet de Modélisation et de Simulation à Evénements Discrets de Systèmes Complexes"**, Thèse de Doctorat, Université de Corse, UFR Sciences et Techniques, 1997
- **[Berry, 2001]**, Laurent Berry, « La société des agents » - Rapport de synthèse 2001, DEA – Sciences de la cognition, Université Victor Segalen Bordeaux-2
- **[Delhom, 1996]** Delhom M. **"Modélisation et Simulation Orientées Objet - Contribution à l'Etude du comportement hydrologique d'un bassin versant"**, Thèse de Doctorat, Université de Corse, Faculté des Sciences et Techniques, 1996.
- **[Ferber, 1995]**, Jacques Ferber **"Les systèmes multi-agents"**, Inter-Editions, 1995
- **[Hait, 2000]**, Fériat Heit, **"Modélisation et apprentissage d'agents artificiels adaptés à un marché financier"**. Thèse de Doctorat, LACL, Université Paris XII, Juillet 2000
- **[Law, 1991]**, Law M.A., Kelton W.D. **"Simulation modeling and analysis"** McGraw-Gill, 1991
- **[Le Page, 1996]**, Le Page C., **"Biologie des populations et simulation individus-centrés"**, Thèse de l'Université Paris 6
- **[Perrier et al., 1995]**, Perrier E., Treuil J.P., Cambier C. et Rieu M. **"Représentation informatique d'un ensemble d'objets spatiaux structuré et déformable (à partir d'un exemple de structures microscopiques des sols gonflants)"**, in *Etudes des phénomènes spatiaux*, INRA, pp 215-226.
- **[Sabas, 2001]**, Arsène Sabas, **"Systèmes multi-agents : une analyse comparative des méthodologies de développement"**, Mémoire de Maîtrise en mathématiques et informatique appliquées, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2001



## **Adresses de liens web importants**

- [www.squeak.org](http://www.squeak.org)
- [free.uml.fr](http://free.uml.fr)
- [www.eyrolles.com](http://www.eyrolles.com)
- [cormas.cirad.fr](http://cormas.cirad.fr)
- [www.c3.lanl.gov/~rocha/complex/csm.html](http://www.c3.lanl.gov/~rocha/complex/csm.html)
- [www.mit.edu/~vteles/](http://www.mit.edu/~vteles/)
- [www.c3.lanl.gov/~rocha/complex/csm.html](http://www.c3.lanl.gov/~rocha/complex/csm.html)
- <http://www.ecs.soton.ac.uk/~nrj/abse.html>

## **Annexes**

# Annexe 1 - Fiche de renseignement thème de stage

UNIVERSITE POLYTECHNIQUE  
DE BOBO-DIOULASSO

- ANNEXE A-1 -

ECOLE SUPERIEURE D'INFORMATIQUE  
CYCLE DE FORMATION DES INGENIEURS  
DE CONCEPTION EN INFORMATIQUE

## FICHE DE RENSEIGNEMENTS

Mémoire de fin d'études année / 01 / 2021

Nom de l'étudiant : .....

### I. Identification de l'unité d'accueil

Nom du centre : Centre I.R.D.

Adresse : BP 182

N° de téléphone : 20 67 37 N° fax : .....

Activité principale : Recherche Scientifique

### II. Contact technique

Nom : MASSE Dominique

Fonctions : Ingénieur Agronome

### III. Sujet du mémoire

Modélisation informatique des systèmes complexes.  
Le Modèle MIOR : simulation des  
processus microbiens de décomposition de la  
matière organique.

### IV. Renseignements pratiques

Avantages en nature : .....

Avantages en numéraire : .....

Signature du Responsable de l'unité d'accueil



## Annexe 2 - Document de spécification des besoins

### Les micro-organismes dans le sol

#### Objectifs :

Il s'agit de simuler les interactions entre micro-organismes et matière organique vues à travers deux composants : le carbone (C) et l'azote (N). La dynamique du carbone et de l'azote révèle un système complexe car il met en présence des interactions multiples selon différents niveaux et entre un nombre extrêmement important de constituants. Notre objectif, c'est finalement aussi de proposer une méthode de simulation objets qui parvienne à prendre en compte cette complexité.

---

#### Définitions proposées :

En adoptant une même terminologie, nous souhaitons décrire les éléments de notre monde avec précision et concision. En procédant ainsi, et en associant à ces termes les processus appropriés, nous orientons fortement l'architecture de notre modèle.

**OMMIORSPHERE** : l'environnement spatial pris en compte (simulé qui est composé de matière organique et de micro-organismes).

**MIOR** : micro-organisme artificiel qui a des capacités ( $C_i$ ) de métaboliser pour ses besoins vitaux (croissance et maintenance cellulaire)<sup>2</sup>. Chaque capacité enzymatique correspond à un composé organique de l'OM et elle se définit en termes qualitatif (oui ou non). Un MIOR peut avoir une seule capacité ou plusieurs. La croissance des MIOR est de forme exponentielle et peut être définie par un taux de croissance ou un temps de génération (temps pour lequel le nombre de MIOR est doublé). Si l'énergie nécessaire à leur maintenance et leur croissance est insuffisante, les MIOR se mettent en dormance. Les MIOR meurent selon un taux de mortalité identique pour les MIOR actifs ou dormant.

**METAMIOR** : nuage de MIOR représentant une « sorte d'agrégation forcée » de MIOR situés spatialement dans un même voisinage.

**OMSPHERE** : un espace délimité par une frontière (évolutive) constitué de matière organique. Cette matière se décompose en différentes quantités d'éléments organiques ( $EO_i$ ) caractérisés par une teneur en C et en N, et pouvant interagir avec des METAMIOR en contact. Chaque composé organique est caractérisé par une décomposition exponentielle. Un coefficient  $K_i$  (constante) détermine cette décomposition et libération de C et de N disponibles pour les MIOR.

---

#### Description du processus :

L'OMMIORSPHERE décrit l'espace total simulé qui va correspondre dans la réalité à un volume de 10cm sur 1mm et que nous traiterons en 2D dans le monde simulé.

Cet espace est appréhendé à travers un maillage (CORMAS) et chaque cellule possède un attribut spécifiant une quantité d'azote minéral (azote disponible pour les MIOR).

On y trouve de la matière organique sous forme d'OMSPHERE qu'on distribue de manière aléatoire sur notre espace ainsi que les micro-organismes distribués sous forme de

---

<sup>2</sup> Ces capacités sont liées à la production d'un cocktail d'enzymes et de croissance

**METAMIOR.** La matière organique (les OMSPHERE) constitue une source d'énergie pour les micro-organismes et d'éléments constituant leur squelette. L'utilisation de cette ressource par les micro-organismes (les METAMIOR) implique une altération sur le quantité de C et de N de l'OMSPHERE. L'offre de C et de N de l'OMSPHERE est sous la dépendance de capacités d'enzymes (possible par la présence des METAMIOR) spécifiques aux éléments organiques composant l'OMSPHERE.

Les METAMIOR ont un besoin de C pour leur besoin énergétique (= respiration) et pour leur croissance. Pour cela, ils produisent des enzymes qui vont agir sur l'OMSPHERE qui offre en retour une quantité de C disponible. L'OMSPHERE en libérant du C va libérer également une quantité de N minéral dans la cellule appropriée. En fonction du C libéré par l'OMSPHERE, les METAMIOR en déduisent leur possibilité de croissance qui implique un besoin en N (respectant un rapport C/N constant) qui sera prélevé dans la réserve de N minéral des cellules « voisines », donc le N disponible déterminera à son tour la croissance possible. A chaque cycle de vie (à chaque pas de temps), une fraction des MIOR dans chaque METAMIOR meurt.

Les METAMIOR peuvent se mettre en état de dormance si la quantité d'énergie si forme de C est insuffisante ; par contre, il meurt selon un taux de mortalité habituel. Il sera réveillé (actif) dès l'instant où une OMSPHERE pourrait lui délivrer du C.

L'OMSPHERE comprend un ensemble d'éléments organiques (ex : lignine, cellulose, phénols, sucre). Chacun de ces éléments nécessite la présence d'une capacité enzymatique spécifique pour être minéralisé (libération de C). Le C libéré par l'action de tous les METAMIOR est disponible pour tous les MIOR.

L'utilisation du C par les METAMIOR détermine la réduction proportionnelle de l'espace occupé par l'OMSPHERE.

---

#### Sorties :

C et N total de l'OMMIORSPHERE  
C et N des MIOR  
CO<sub>2</sub> dégagé par l'OMMIORSPHERE  
Nombre de MIOR  
C/N des OMSPHERE

---

#### Scénarios :

Dans un premier temps, on réalise une seule introduction d'OMSPHERE pour une quantité de MIOR donnée. On pourra seulement faire varier ce scénario en jouant sur la composition en éléments organiques des OMSPHERE et également sur les capacités enzymatiques des MIOR. Ce type de scénario sera surtout utile lors de la première phase de calibrage.

Dans un deuxième temps, on pourra effectuer des introductions successives d'OMSPHERE selon des chronoséquences.

L'interface devra prendre en compte ces impératifs lors des différentes phases de simulation, avec notamment, une option de sauvegarde des résultats intermédiaires sur fichiers.

### Annexe 3 - Description détaillée des objets du modèle

Le tableau ci-après décrit les différentes classes représentant les objets du modèle.

| Classe   | Attributs                   | Description  |
|----------|-----------------------------|--|
| OmSphere | world : OmMiorSphere        | Représente l'« univers » de l'OmSphere c'est-à-dire l'OmMiorSphere dans lequel il se trouve                        |
|          | categorieOm : entier        | Représente le numéro de la catégorie de l'OmSphere   |
|          | masseOm : réel              | Représente la masse en Carbone de l'OmSphere   |
|          | compOm : liste de réels     | Représente les proportions de différents composés organiques constituant l'OmSphere                                |
|          | compOmMior : liste de réels | Représente les proportions de différents composés organiques provenant de MetaMior morts et constituant l'OmSphere |
|          | cLibere : réel              | Représente la quantité de Carbone cédé par l'OmSphere lors de sa décomposition                                     |
|          | nMineralise : réel          | Représente la quantité d'Azote cédé par l'OmSphere lors de sa décomposition  |

Tableau 4 : Description de la classe OmSphere

|          |                           |   |
|----------|---------------------------|---|
| MetaMior | world : OmMiorSphere      | Représente l'« univers » du MetaMior c'est-à-dire l'OmMiorSphere dans lequel il se trouve |
|          | categorieMeta : entier    | Représente le numéro de la catégorie du MetaMior  |
|          | nbMior : réel             | Représente le nombre de Miors (micro-organismes) du MetaMior                              |
|          | compMeta : liste de réels | Représente les proportions de différents composés organiques constituant le MetaMior      |

|  |                                    |   |
|--|------------------------------------|---|
|  | capaciteDecomp : liste de booléens | Représente la capacité du MetaMior à décomposer ou non les différents composés organiques du milieu |
|  | skel : liste de réels              | Représente la composition en Carbone et en Azote du squelette du MetaMior                           |
|  | vois : liste de OmSphere           | Représente la liste des OmSpheres présentes dans le voisinage du MetaMior                           |
|  | cRespire : réel                    | Représente la quantité totale de Carbone respiré par le MetaMior                                    |
|  | unDormant : MetaMiorDormant        | Représente le MetaMior dormant associé au MetaMior  |
|  | reserveAzote : réel                | Représente la quantité d'Azote disponible à l'usage par le MetaMior                                 |
|  | voisAzote : liste d'Azote          | Représente la liste des agents Azote présents dans le voisinage du MetaMior                         |

**Tableau 5 : Description détaillée de la classe MetaMior**

|                        |                                    |   |
|------------------------|------------------------------------|---|
| <b>MetaMiorDormant</b> | world : OmMiorSphere               | Représente l'« univers » du MetaMior dormant  |
|                        | categorieMeta : entier             | Représente le numéro de la catégorie du MetaMior dormant  |
|                        | nbMior : réel                      | Représente le nombre de Miors (micro-organismes) du MetaMior dormant  |
|                        | compMeta : liste de réels          | Représente les proportions de différents composés organiques constituant le MetaMior dormant                |
|                        | capaciteDecomp : liste de booléens | Représente la capacité du MetaMior dormant à décomposer ou non les différents composés organiques du milieu |
|                        | skel : liste de réels              | Représente la composition en Carbone et en Azote du squelette du MetaMior dormant                           |
|                        | vois : liste de OmSphere           | Représente la liste des OmSpheres présentes dans le voisinage du MetaMior dormant                           |

|  |                           |   |
|--|---------------------------|---|
|  | cRespire : réel           | Représente la quantité totale de Carbone respiré par le MetaMior dormant    |
|  | reserveAzote : réel       | Représente la quantité d'Azote disponible à l'usage par le MetaMior         |
|  | voisAzote : liste d'Azote | Représente la liste des agents Azote présents dans le voisinage du MetaMior |
|  | voisMeta : MetaMior       | Représente le MetaMior actif auquel est associé le MetaMior dormant         |

Tableau 6: Description détaillée de la classe MetaMiorDormant

|        |                   |   |
|--------|-------------------|---|
| Enzyme | unMeta : MetaMior | Représente le MetaMior auquel est associé l'Enzyme  |
|        | cRamene : réel    | Représente la quantité de Carbone que l'Enzyme a décomposé et restitué à son MetaMior associé |
|        | nRamene : réel    | Représente la quantité d'Azote que l'Enzyme a décomposé et restitué à son MetaMior associé    |

Tableau 7 : Description détaillée de la classe Enzyme

|                   |                           |   |
|-------------------|---------------------------|---|
| CategorieMetaMior | numCategorieMeta : entier | Représente le numéro de la catégorie de MetaMiors                                   |
|                   | nbMeta : entier           | Représente le nombre de MetaMiors de la catégorie de MetaMiors                      |
|                   | nbDormeurs : entier       | Représente le nombre de MetaMiors dormants de la catégorie de MetaMiors             |
|                   | nbMiors : réel            | Représente le nombre de Miors d'un MetaMior de la catégorie de MetaMiors            |
|                   | coeffMasse : réel         | Représente la masse d'un nombre donné de Miors de la catégorie de MetaMiors         |
|                   | coeffCroissance : réel    | Représente le coefficient de croissance des MetaMiors de la catégorie de MetaMiors  |
|                   | coeffRespire : réel       | Représente le coefficient de respiration des MetaMiors de la catégorie de MetaMiors |



|  |                                    |  |
|--|------------------------------------|--|
|  | coeffEnvironnement : réel          | Représente un coefficient environnemental influençant la croissance des MetaMiors de la catégorie de MetaMiors                       |
|  | tauxMort : réel                    | Représente le taux de mortalité des MetaMiors de la catégorie de MetaMiors   |
|  | rapportCN : réel                   | Représente le rapport quantité de Carbone sur celle d'Azote à respecter dans le squelette des MetaMiors de la catégorie de MetaMiors |
|  | capaciteDecomp : liste de booléens | Représente la capacité des MetaMiors de la catégorie à décomposer les composés organiques présents dans le milieu                    |
|  | compMeta : liste de réels          | Représente la proportion de chacun des composés organiques dans le squelette des MetaMiors de la catégorie de MetaMiors              |

**Tableau 8 : Description détaillée de la classe CategorieMetaMior**

|                   |                                 |  |
|-------------------|---------------------------------|--|
| CategorieOmSphere | numCategorieOm : entier         | Représente le numéro de la catégorie d'OmSphere  |
|                   | nbOm : entier                   | Représente le nombre d'OmSpheres de la catégorie d'OmSpheres   |
|                   | masseOmInitiale : réel          | Représente la masse initiale de chaque OmSphere de la catégorie d'OmSphere   |
|                   | coeffDecomp : liste de réels    | Représente les coefficients de décomposition pour chacun des composés organiques présents constituant un OmSphere de la catégorie d'OmSpheres    |
|                   | listeRapportCN : liste de réels | Représente la liste des rapports quantité de Carbone sur celle d'Azote à respecter dans la composition d'un OmSphere de la catégorie d'OmSpheres |
|                   | nbApport : entier               | Représente le nombre de fois que les OmSpheres de la catégorie sont apportés dans le milieu  |

|  |                         |   |
|--|-------------------------|---|
|  | compOm : liste de réels | Représente la proportion de chacun des composés organiques du milieu dans la constitution des OmSpheres de la catégorie d'OmSpheres |
|  | dateApport : entier     | Représente le rang d'exécution de l'expérience auquel des OmSpheres de la catégorie d'OmSpheres sont apportés au milieu             |

**Tableau 9 : Description détaillée de la classe *CategorieOmSphere***

|       |                |   |
|-------|----------------|---|
| Azote | nDispo: réel   | Représente la quantité d'azote disponible sur un agent Azote                                    |
|       | cede : booléen | Indique que l'agent Azote a cédé une partie de son azote disponible                             |
|       | utilise : réel | Représente la quantité d'azote cédé par l'agent Azote pour utilisation par les <b>MetaMiors</b> |

**Tableau 10 :Description détaillée de la classe *Azote***

|              |                      |   |
|--------------|----------------------|---|
| OmMiorSphere | nbTot : entier       | Représente le nombre total d'OmSpheres du milieu                        |
|              | nbDormeur : entier   | Représente le nombre total de <b>MetaMiors</b> dormants du milieu       |
|              | quantNlibre : réel   | Représente la quantité totale d'azote libre dans le milieu              |
|              | quantNPuise : réel   | Représente la quantité d'azote consommé du fait du besoin concurrentiel |
|              | beg : booléen        | Indique que l'expérience doit se poursuivre ou non                      |
|              | affichage: Afficheur | Représente l'écran de sortie des données-résultats de l'expérimentation |
|              | scenarioCur: entier  | Représente le rang du scénario <sup>3</sup> en cours d'exécution        |

<sup>3</sup> Un scénario définit une liste de valeurs qui servent à initialiser les paramètres d'une expérimentation avant son lancement

|  |   |  |
|--|---|--|
|  | scenariolInitial :<br>Scenario          | Représente l'ensemble des paramètres saisis pour l'expérimentation |
|  | scenario : liste de<br>valeurs diverses | Représente l'ensemble des paramètres saisis pour l'expérimentation |

Tableau 11 : Description détaillée de la classe OmMiorSphere

|          |   |   |
|----------|---|---|
| Scenario | nbTot : entier                          | Représente le nombre total d'OmSpheres du milieu                        |
|          | nbDormeur : entier                      | Représente le nombre total de MetaMiors dormants du milieu              |
|          | quantNlibre : réel                      | Représente la quantité totale d'azote libre dans le milieu              |
|          | quantNPuise : réel                      | Représente la quantité d'azote consommé du fait du besoin concurrentiel |
|          | beg : booléen                           | Indique que l'expérience doit se poursuivre ou non                      |
|          | affichage: Afficheur                    | Représente l'écran de sortie des données-résultats de l'expérimentation |
|          | scenarioCur: entier                     | Représente le rang du scénario <sup>4</sup> en cours d'exécution        |
|          | scenariolInitial:<br>Scenario           | Représente l'ensemble des paramètres saisis pour l'expérimentation      |
|          | scenario : liste de<br>valeurs diverses | Représente l'ensemble des paramètres saisis pour l'expérimentation      |

Tableau 12 : Description détaillée de la classe Scenario

<sup>4</sup> Un scénario définit une liste de valeurs qui servent à initialiser les paramètres d'une expérimentation avant son lancement

## Annexe 4 - Graphiques résultant de quelques expériences

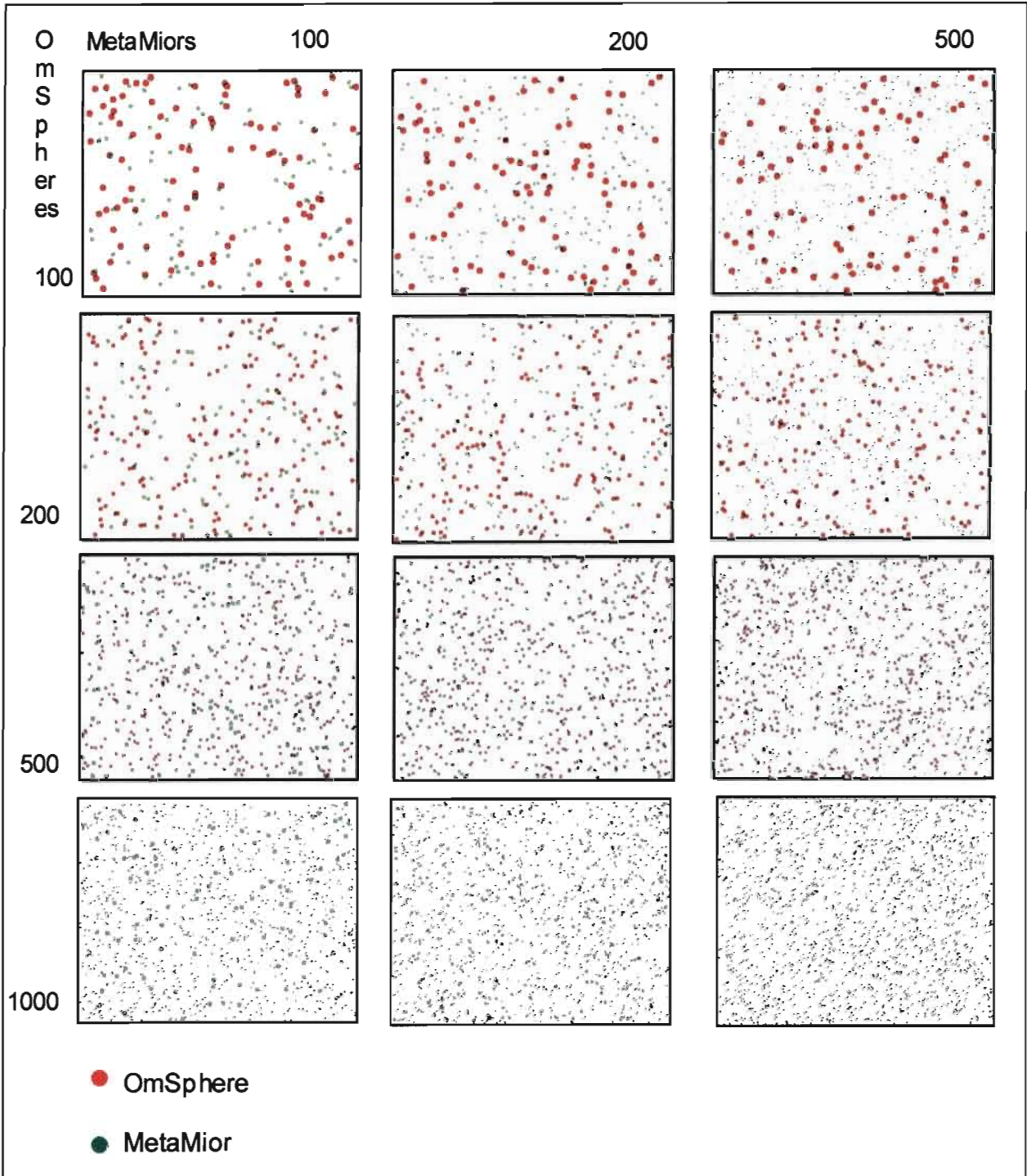


Figure 17 : Images de l'OmMiorSphere avec des OmSpheres et des MetaMiors repartis aléatoirement dans le milieu en vue de simulations

## Annexe 5 - Exemple de fichier de sortie de l'application recensant les paramètres d'une simulation

-----  
PARAMETRES GENERAUX DU MILIEU :  
-----

-> Quantite initiale de N libre : 40  
-> Besoin concurrentiel d'azote : 0  
-> Distance maximale d'interaction OM-MM : 15  
-> Distance voisinage OmS. : 15  
-----

PARAMETRES RELATIFS AUX DIFFERENTES CATEGORIES DE METAMIORS :

-> Nombre de categories de metamiors : 1  
-----

-> Categorie de metamiors : 1  
-> Nombre de metamiors : 60  
-> Nombre de metamiors dormants : 30  
-> Nombre de miors/MetaMior : 2.166  
-> Taux de mortalite de miors : 0.01  
-> Coefficient de respiration des miors : 0.2  
-> Coefficient de croissance des miors : 1  
-> Rapport C/N des miors : 6  
-> Coefficient de la masse des metamiors : 0.8  
-> Coefficient environnemental : 1

Le nombre de MetaMiors decomposant le compose :

----> Compose 1 : 60.0  
----> Compose 2 : 9.0  
----> Compose 3 : 30.0  
----> Compose 4 : 2.0  
----> Compose 5 : 0.0

Ratio des differents composes dans les metamiors :

----> Compose 1 : 0.4  
----> Compose 2 : 0.2  
----> Compose 3 : 0.2  
----> Compose 4 : 0.2  
----> Compose 5 : 0.0  
-----

PARAMETRES RELATIFS AUX DIFFERENTES CATEGORIES D'OMSPHERES :

-> Nombre de categories d'omspheres : 1  
-----

-> Categorie d'omspheres : 1  
-> Nombre d'omspheres : 50  
-> Masse de l'omsphere : 120  
-> Nombre d'apports de la categorie : 1  
-> Ratio des differents composes dans les omspheres :  
----> Compose 1 : 0.225  
----> Compose 2 : 0.221  
----> Compose 3 : 0.324  
----> Compose 4 : 0.23  
----> Compose 5 : 0.0  
-----

-> Ratio des rapports CN dans les omspheres :

----> Compose 1 : 50.0  
----> Compose 2 : 34.0  
----> Compose 3 : 250.0  
----> Compose 4 : 28.0  
----> Compose 5 : 33.6  
-----

-> Coefficients de decomposition des omspheres :

----> Compose 1 : 1.0  
----> Compose 2 : 1.0  
-----

---> Compose 3 : 1.0  
 ---> Compose 4 : 1.0  
 ---> Compose 5 : 0.05

### Annexe 6 - Exemple de fichier de sortie de l'application récapitulatif des résultats de la simulation (sur un cycle de 25 pas)

| Pas | Actions                 | C MM. actifs | C MM. dorm. | Masse C OmS. | C libere | Azote libre | Act. en dorm. | C OmS. issu des Miors | Moy. vois./MM | Cumul C total |
|-----|-------------------------|--------------|-------------|--------------|----------|-------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|
| 1   | Apport : 100 OmS/ 60 MM | 145,0588     | 5,3232      | 105,5478     | 19,7182  | 32,0112     | 0,0000        | 0,9161                | 7,1833        | 19,7182       |
| 2   | Apport :                | 97,4618      | 72,5878     | 70,4679      | 15,4122  | 29,1055     | 67,9979       | 1,3126                | 7,1833        | 35,1304       |
| 3   | Apport :                | 12,1158      | 156,5954    | 69,4319      | 2,3745   | 29,0920     | 85,9530       | 1,8476                | 7,1833        | 37,5049       |
| 4   | Apport :                | 12,0079      | 155,5516    | 68,2660      | 2,3177   | 29,0508     | 1,2720        | 2,2439                | 7,1833        | 39,8226       |
| 5   | Apport :                | 10,0207      | 156,2141    | 67,6371      | 1,9535   | 28,9929     | 2,9453        | 2,5446                | 7,1833        | 41,7761       |
| 6   | Apport :                | 4,8626       | 159,9361    | 68,1366      | 0,9366   | 28,9551     | 6,1013        | 3,0441                | 7,1833        | 42,7127       |
| 7   | Apport :                | 4,7290       | 158,7812    | 68,5424      | 0,8827   | 28,8955     | 0,9525        | 3,4499                | 7,1833        | 43,5954       |
| 8   | Apport :                | 4,4712       | 157,7202    | 69,0219      | 0,8394   | 28,8423     | 1,1965        | 3,9294                | 7,1833        | 44,4348       |
| 9   | Apport :                | 4,4977       | 156,4067    | 69,4679      | 0,8410   | 28,7864     | 0,8964        | 4,3754                | 7,1833        | 45,2758       |
| 10  | Apport :                | 4,8128       | 154,8096    | 69,8437      | 0,9062   | 28,7332     | 0,7266        | 4,7512                | 7,1833        | 46,1820       |
| 11  | Apport :                | 4,4444       | 153,8936    | 70,2931      | 0,8348   | 28,6823     | 0,9318        | 5,2007                | 7,1833        | 47,0168       |
| 12  | Apport :                | 4,5327       | 152,4600    | 70,7709      | 0,8676   | 28,6422     | 1,0298        | 5,6784                | 7,1833        | 47,8844       |
| 13  | Apport :                | 5,0586       | 150,6208    | 71,1141      | 0,9701   | 28,6012     | 0,8748        | 6,0216                | 7,1833        | 48,8545       |
| 14  | Apport :                | 4,7805       | 149,5921    | 71,5056      | 0,9152   | 28,5591     | 0,9868        | 6,4132                | 7,1833        | 49,7698       |
| 15  | Apport :                | 4,3575       | 148,7484    | 71,9479      | 0,8243   | 28,5137     | 0,9301        | 6,8554                | 7,1833        | 50,5941       |
| 16  | Apport :                | 4,4242       | 147,3828    | 72,3999      | 0,8469   | 28,4778     | 1,1216        | 7,3075                | 7,1833        | 51,4410       |
| 17  | Apport :                | 4,7629       | 145,7987    | 72,7383      | 0,9071   | 28,4321     | 0,8298        | 7,6458                | 7,1833        | 52,3481       |
| 18  | Apport :                | 4,3855       | 144,9211    | 73,1579      | 0,8353   | 28,3919     | 0,9031        | 8,0654                | 7,1833        | 53,1835       |
| 19  | Apport :                | 4,1104       | 144,0005    | 73,5833      | 0,7703   | 28,3440     | 0,9748        | 8,4908                | 7,1833        | 53,9538       |
| 20  | Apport :                | 4,7178       | 142,1392    | 73,9300      | 0,9072   | 28,3092     | 0,6593        | 8,8375                | 7,1833        | 54,8610       |
| 21  | Apport :                | 3,9651       | 141,7464    | 74,3397      | 0,7358   | 28,2567     | 1,2645        | 9,2473                | 7,1833        | 55,5967       |
| 22  | Apport :                | 4,1557       | 140,4050    | 74,7128      | 0,7777   | 28,2055     | 0,4985        | 9,6204                | 7,1833        | 56,3744       |
| 23  | Apport :                | 4,3210       | 139,0475    | 75,0833      | 0,8217   | 28,1656     | 0,8308        | 9,9909                | 7,1833        | 57,1961       |
| 24  | Apport :                | 4,1802       | 138,0082    | 75,4702      | 0,7933   | 28,1231     | 0,9558        | 10,3777               | 7,1833        | 57,9894       |
| 25  | Apport :                | 3,7595       | 137,3307    | 75,8742      | 0,6941   | 28,0692     | 1,0518        | 10,7817               | 7,1833        | 58,6835       |