

## Chapitre

## 02

## Ecosystèmes

**Introduction**

Le développement impressionnant des technologies de l'information, l'augmentation de la puissance de calcul et de mémorisation des informations sur ordinateur ont permis aux scientifiques de modéliser et de simuler des systèmes de plus en plus complexes à travers des logiciels informatiques. La conséquence de ce développement est l'augmentation de nos connaissances sur des phénomènes pour lesquels auparavant nous n'avions qu'une vague compréhension. Cela inclut, certes, les systèmes industriels, économiques, sociaux et physiques, mais également les systèmes biologiques et les écosystèmes.

Un écosystème est défini comme une unité de base formée par le milieu et les organismes qui y vivent. Ces organismes ont normalement des formes d'interaction complexes, qui rendent difficile la compréhension de certains phénomènes. Cette complexité impose l'emploi d'outils et de méthodes aptes à faciliter la compréhension de tels phénomènes. Le processus de modélisation et simulation est un de ces outils.

Le domaine de la simulation d'écosystèmes requiert la contribution de plusieurs disciplines, notamment certaines liées à l'informatique et à la biologie.

Dans ce chapitre, nous effectuerons dans une première partie, un survol sur les concepts d'écosystèmes. Dans une deuxième partie, quelques exemples de simulations seront exposés.

## 2.1 Des systèmes complexes : les écosystèmes

### 2.1.1 Notions de base

#### 2.1.1.1 Ecologie

Le terme d'écologie vient du grec "*oikos*" : la maison et "*logos*" : la science. Il existe plusieurs définitions de l'écologie. La plus répandue est : « *étude des interactions entre les organismes vivants et leur milieu, et des organismes vivants entre eux dans les conditions naturelles* ». On peut également dire que l'écologie est l'étude des interactions qui déterminent la distribution et l'abondance des organismes, ou encore l'étude des écosystèmes [Gaudin 97].

Une autre définition (Ernst Haeckel, 1866) : science de l'habitat. D'abord études disjointes des espèces puis nécessité de prendre en compte les autres espèces et le milieu environnant avec lesquels chaque espèce interagit [Bertelle 03,+a].

L'écologie moderne a pour objet l'étude des êtres vivants dans leur milieu (y compris l'homme) et pour méthodes non seulement la méthode expérimentale mais aussi les méthodes de nombreuses autres sciences avec lesquelles elle travaille: paléontologie, géographie, économie, philosophie. Elle a une dimension pratique (art) qui en fait aussi une science appliquée qui a donc une dimension politique et sociale.

#### 2.1.1.2 Qu'est-ce qu'un écosystème ?

Le mot *écosystème* est une contraction de deux mots: *écologie* et *système*. «éco» signifie habitat ou maison; «système» se rapporte à l'interdépendance de chaque élément vivant et non vivant d'une communauté naturelle. Les écosystèmes naturels fonctionnent à peu près de la même façon. On y retrouve les parties non vivantes, appelées abiotiques (p. ex. les roches, l'air, le sol et l'eau) et les parties biotiques (comme les plantes et les animaux). Les éléments vivants et non vivants d'un écosystème sont liés par la circulation de l'énergie et le cycle des éléments chimiques [Espaces 02].

Tansley (1935), a défini un écosystème : système d'interaction entre les populations de différentes espèces vivant dans un site et entre ces populations et le milieu physique. Les écosystèmes sont des systèmes ouverts. Ils sont ainsi constamment traversés par des flux de différentes natures [Bertelle 03,+a].

Un écosystème est constitué par l'association dynamique de deux composantes en constante interaction :

- un environnement physico-chimique, géologique, climatique ayant une dimension spatio-temporelle définie : le biotope,
- un ensemble d'êtres vivants caractéristiques : la biocénose.

L'écosystème est une unité fonctionnelle de base en écologie qui évolue en permanence de manière autonome au travers des flux d'énergie.

L'écosystème peut être divisé en trois catégories [Gaudin 97]:

- **les producteurs** : ce sont tous les végétaux, algues et plantes, et en particulier les algues microscopiques du phytoplancton. Ils utilisent la lumière solaire pour fabriquer des matières organiques par photosynthèse. Les plantes aquatiques consomment le gaz carbonique contenu dans l'eau, ainsi que des sels minéraux et des nutriments comme l'azote, le phosphore et la silice, et elles rejettent de l'oxygène.
- **les consommateurs** : ce sont des herbivores, des omnivores ou des carnivores. On y trouve notamment le zooplancton, les invertébrés et mollusques, les poissons, ainsi que certains oiseaux et petits mammifères. Certains se nourrissent de plantes (consommateurs primaires) ou d'autres animaux (consommateurs secondaires et tertiaires) pour obtenir l'énergie et les éléments nutritifs dont ils ont besoin. Ces animaux respirent en consommant l'oxygène produit par les plantes et en rejetant du gaz carbonique.
- **les décomposeurs** : ce sont les micro-organismes tels les bactéries ou les champignons, qui décomposent les matières et cellules mortes. Ces organismes utilisent également l'oxygène produit par les plantes et remettent dans le circuit des sels minéraux qui vont être à leur tour assimilés par la flore pour une nouvelle photosynthèse. Ils permettent aussi d'épurer les écosystèmes. Leur rôle est donc prépondérant et ils bouclent ainsi la chaîne alimentaire.

### 2.1.2 Propriétés caractéristiques

Les écosystèmes sont caractérisés par [Bertelle 03,+a]:

- Structuration en une grande variété d'échelles d'espace-temps (d'une souche d'arbre en décomposition à l'organisation écologique planétaire).
- Flux d'énergie les traversant (rayonnement solaire, énergie de mise en mouvement de matière telle que l'eau ou l'air) permettant la mise en relation d'entités qui interagissent ...source du développement de structures organisées;
- Interactions multiples et non réductibles.

### 2.1.3 Exemples de relations biotiques dans les écosystèmes

#### 2.1.3.1 Compétition [Gaudin 97]

Il y a *compétition* quand deux ou plusieurs organismes (ou populations) :

- utilisent des ressources communes présentes en quantité limitée,
- utilisent des ressources communes présentes en grande quantité,

mais dont la recherche implique une nuisance entre les organismes.

Par ressource, on entend des ressources :

- **trophiques** (eau, aliments, éléments minéraux),
- **d'ordre spatial** (site de ponte ou de nidification, abris),
- **d'ordre reproductif** (partenaires sexuels).

On distingue :

- compétition *intra-spécifique* : il y a alors compétition entre individus de la même espèce et,
- compétition *inter-spécifique* : compétition entre individus d'espèces différentes.

D'une manière ou d'une autre, la compétition a un effet aboutit le plus souvent à une diminution de la contribution des individus à la génération suivante. Ainsi, la concurrence entre prédateurs pour une proie qui se fait rare diminue le nombre de portées et la chance de survie des jeunes.

On admet habituellement que l'intensité de cet effet dépend de la densité. Ainsi, quand la compétition devient trop forte (dépassement d'un certain seuil, la *capacité biotique*, notée  $K$ ), il y a régulation de la densité (diminution du nombre des individus). Bien entendu, lorsqu'on est en dessous de ce seuil, il y a augmentation de la population. Les effets de la surdensité sur la qualité et les performances des individus sont multiples.

On peut noter :

- un affaiblissement physiologique,
- un ralentissement de la croissance individuelle,
- une diminution de la longévité et de la fécondité,
- des modifications du comportement.

### 2.1.3.2 Symbiose (ou mutualisme) [Gaudin 97]

On parle de *symbiose* quand il y a une association profitable entre deux espèces. On réserve généralement le terme de mutualisme aux associations qui ne sont pas obligatoires et celui de symbiose aux associations obligatoires. Dans le premier cas, les deux espèces peuvent vivre l'une sans l'autre, dans le second, c'est impossible.

On peut donner un exemple forestier de symbiose : Lors de la reproduction chez les Angiospermes, on peut avoir diverses formes de symbiose. Par exemple la *pollinisation*, qui est très souvent assurée par les insectes. Il y a dans ce cas symbiose car la plante fournit des substances nutritives à l'insecte (nectar) et celui-ci allant de plante en plante transporte le pollen pour la plante. On a ainsi une pollinisation croisée très efficace. On constate même des phénomènes de co-évolution et de spécialisation de plantes et d'insectes (beaucoup d'insectes ne pollinisent qu'une espèce de plante dans une période de l'année donnée).

### 2.1.3.3 Parasitisme [Gaudin 97]

Les parasites vivent au moins une partie de leur vie aux dépens d'un organisme vivant (hôte). Toutefois leur présence ne signifie pas toujours la mort de l'hôte. En effet, un parasite peut infester un hôte et s'y développer sans qu'il y ait nécessairement mort de l'hôte.

Les parasites se caractérisent par une extrême *spécialisation* dans l'exploitation des ressources. Beaucoup d'espèces de parasites dépendent en effet d'une seule espèce-hôte, contrairement à la majorité des prédateurs et des herbivores non parasites qui apparaissent comme des consommateurs généralistes. La spécialisation n'implique pas seulement, lorsqu'elle est extrême, une dépendance totale du parasite vis-à-vis de l'hôte. Elle signifie aussi que l'espèce consommatrice a développé des *adaptations* morphologiques, biochimiques, physiologiques, éthologiques et démographiques qui interviennent de manière essentielle dans la dynamique et l'évolution de la relation parasite-hôte.

Un parasite se développe le plus souvent quand l'hôte est en état de faiblesse. Par exemple, les insectes « nuisibles » pour la forêt se développent à la suite de stress divers

(tempêtes, sécheresse) ou bien lorsque les essences ne sont pas bien adaptées à la station (altitude, sol, pluviosité...).

Cet état de faiblesse peut également résulter d'une surdensité de l'hôte (dépassement de la capacité biotique du milieu). La population renferme alors une proportion de plus en plus importante d'individus physiologiquement déficients.

#### 2.1.3.4 Prédation [Gaudin 97]

On appelle prédateur tout organisme libre qui se nourrit aux dépens d'un autre. Cette définition permet de considérer les animaux herbivores comme des prédateurs de végétaux. Elle élimine également les parasites qui vivent au moins une partie de leur vie aux dépens d'un hôte (que ce soit en surface ou à l'intérieur de l'hôte) et ne sont donc pas libres.

#### 2.1.4 Coevolution

Le terme de coevolution est attribué à l'étude des biologistes Paul Ehrlich et Peter Raven sur les papillons et les plantes, qui ont publié un papier sur la coevolution : "Butterflies and plants: A study in coevolution" en 1965. La coevolution peut être définie comme l'évolution d'une espèce qui affecte l'évolution des espèces avec lesquelles elle interagit, par exemple par des relations de type chaîne alimentaire, prédateur proies, symbiose, parasitisme ...etc [coevolution].

Des exemples incluent la pollinisation d'orchidées par les colibris. Ces espèces coevolvent puisque les oiseaux sont dépendant sur les fleurs pour nectar et les fleurs sont dépendant sur les oiseaux pour propager leur pollen donc ils peuvent reproduire. La coevolution est aussi utilisée pour faire référence aux interactions évolutives entre molécules dans le champ d'évolution moléculaire (par exemple, entre hormones et récepteurs).

Ces observations ont été exploitées dans ces dernières années, pour créer une sous-classe d'algorithmes évolutifs artificiels plus robustes appelés : *algorithmes coevolutionnaires*. Dans ce type d'algorithmes les espèces peuvent *coevoluer* par compétition ou bien par coopération [Zaritsky 03] [Kirley 02].

### 2.1.4.1 Coevolution compétitive

Les relations prédateur-proie sont les exemples de coevolution les plus célèbres. Il y a une forte pression évolutionnaire des proies pour défendre mieux (par exemple, en courant plus vite, etc.) en réponse que les générations futures de prédateurs doivent développer de mieux capacités pour attaquer (e.g, meilleure vue, courir plus vite, etc.). Dans telles relations, le succès pour un coté représente l'échec à l'autre côté. Ce processus de coevolution peut résulter en amélioration considérable de la proie et le prédateur.

Les algorithmes coevolutionnaires compétitifs sont inspirés des relations de prédateur-proie. L'aptitude (*fitness*) d'un individu d'une espèce est basé sur la compétition directe avec les individus d'une autre espèce. Donc, l'augmentation d'aptitude d'une espèce, implique une diminution de l'aptitude de l'autre espèce. Cette pression évolutionnaire a tendance à produire de nouvelles stratégies dans les populations impliquées comme maintenir leurs chances de survie.

### 2.1.4.1 Coevolution coopérative

Le terme *coevolution coopérative* a été inventé par Potter et De Jong [Potter 00,+]. Leur architecture exige que plusieurs individus travaillent ensemble pour résoudre un problème donné.

Les algorithmes coevolutionnaires coopératifs impliquent plusieurs espèces évoluant indépendamment, et qui forment des structures complexes, bien assorti pour résoudre ensemble un problème. L'idée est d'utiliser plusieurs populations maintenus indépendamment (espèces), chacun s'est spécialisé à accomplir une niche du problème, avec l'aptitude d'un individu selon sa capacité de collaborer avec les individus d'autre espèce pour construire une solution globale (aucun individu d'une seule espèce comprend une solution au problème à condition que toutes les espèces doivent coopérer).

## 2.1.5 Etapes d'évolution d'écosystèmes

Les étapes d'évolution d'écosystèmes sont comme le suivant [Bertelle 03,+a] :

- ↳ état juvénile : croissances importantes mais instables ;
- ↳ état de maturité: stabilisation par complexification des espèces permettant l'adaptabilité et la mise en place de structures de survie ;

- ↳ état de vieillissement: prédominance de certaines espèces aux dépens des autres et contribuant à la simplification globale ;
- ↳ Plus des perturbations générant des stress et remettant en cause l'organisation en provoquant la disparition d'espèces et favorisant le développement rapide d'autres espèces ...
- ↳ rajeunissement.

## 2.2 Exemples de simulations et de plates formes

On nomme simulation la démarche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, appelée *modèle*, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en induire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues. La démarche de simulation passe donc par trois étapes distinctes: l'étape de modélisation, qui consiste à construire le modèle du phénomène à étudier, l'étape d'expérimentation, qui consiste à soumettre ce modèle à un certain type de variations, et l'étape de validation, qui consiste à confronter les données expérimentales obtenues avec le modèle à la réalité.

La nouvelle technologie des agents et systèmes multi-agents connaît un vif succès chez les industriels pour qui elle promet des outils de conception et d'implémentation flexibles et adaptatifs. Afin de réaliser une opération alisation plus accessible des systèmes multi-agents, des travaux ont tenté de réutiliser des architectures et des langages existants pour construire des environnements de développement de ces systèmes. Les environnements de développement ou les plates-formes multi-agents sont nécessaires pour renforcer le succès de la technologie multi-agents. Les plates-formes multi-agents permettent aux développeurs de concevoir et réaliser leurs applications sans perdre de temps à réaliser des fonctions de base pour la création et l'interaction entre agents et éliminent, dans la plupart des cas, la nécessité d'être familier avec les différents concepts théoriques des systèmes multi-agents.

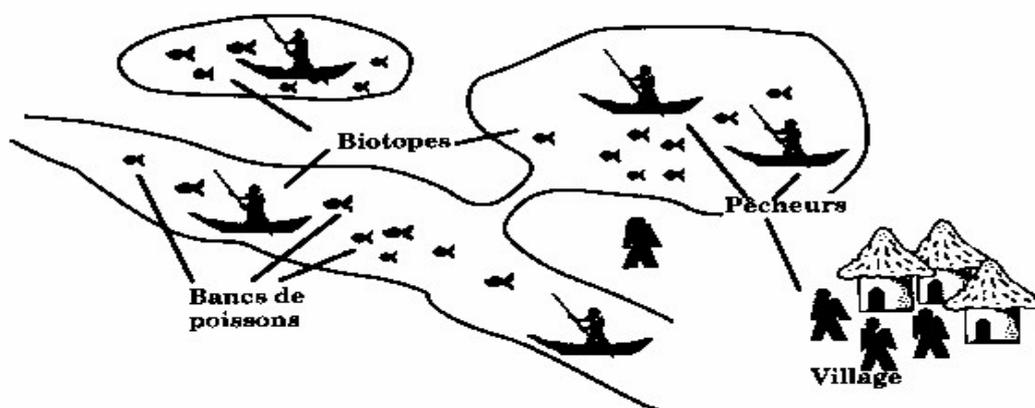
Il existe un nombre important d'environnements de développement des applications orientées agents : il y a aussi bien des produits commerciaux que des logiciels dans le domaine public.

Dans cette section, on va présenter quelques plates formes et exemples de simulations multi-agents de systèmes complexes. Il faut noter que ces plates-formes ne sont pas unique, et qu'il y a aussi d'autres plates-formes qui ont été utilisées avec beaucoup de succès pour bâtir diverses applications.

### 2.2.1 SIMDELTA

Le simulateur SimDelta a été utilisé pour synthétiser les connaissances d'un ensemble de spécialistes (halieutes, écologistes, pédologues, anthropologues, etc.) ayant travaillé pendant plusieurs années sur l'étude du système de pêche du delta central du Niger au Mali. Il s'agissait de pouvoir modéliser des informations tant quantitatives (concernant l'évolution des crues du Niger par exemples) que qualitatives (telles que les techniques de pêche).

Ce simulateur, réalisé par F.Bousquet et C.Cambier (Cambier et al 1992), permet de simuler en même temps la dynamique de population des poissons, en tenant compte des nombreux facteurs biologiques et topologiques qui peuvent affecter son évolution, et la prise de décision des pêcheurs. Les agents sont ici les bancs de poissons et les pêcheurs. La technique employée met en présence trois types d'agents (figure 2.1): les biotopes qui représentent des portions d'environnements, les poissons qui ont un comportement plutôt réactif et les pêcheurs qui se comportent comme des agents cognitifs [Cambier 94].



**Figure 2.1** *Le monde artificiel de SimDelta, d'après [Ferber 95]*

L'environnement est constitué de biotopes dont les connexions peuvent être modifiées dynamiquement lorsque le niveau de l'eau change. Pour chaque biotope, une fonction de ressource indique la quantité de la nourriture disponible pour une population de poissons en fonction du temps. Les bancs de poissons sont des agents qui représentent des ensembles de poissons et dont les paramètres (taille et nombre d'œufs, processus de migration, régime, etc.) caractérisent leur stratégie d'adaptation.

Chaque pêcheur est représenté sous la forme d'un agent cognitif et son comportement est décrit par un système à base de connaissances composé d'une base de données qui contient ses croyances et sa mémoire de pêcheur et d'un système de règles qui représente sa stratégie cognitive pour exploiter les biotopes.

Deux séries d'expérimentations ont été réalisées. La première a porté sur l'étude de la dynamique de population des poissons en fonction d'un effort de pêche de plus en plus grand. La simulation de la dynamique de ces poissons est fondée sur le comportement des poissons d'eau douce sahéliens et, en particulier, sur les connaissances des biologistes concernant la reproduction, la croissance, la migration et la mortalité de ces poissons. Cette simulation a permis de reproduire la courbe en trois phases caractéristiques de l'évolution d'un système de pêche limité et surtout de faire apparaître des variations portant sur la composition spécifique et la taille des poissons.

La seconde a eu pour objet de modéliser des pêcheurs qui prennent des décisions et agissent sur la réserve renouvelable. Cette modélisation a montré l'importance du mécanisme de décision sur la dynamique des poissons.

### 2.2.2 MANTA

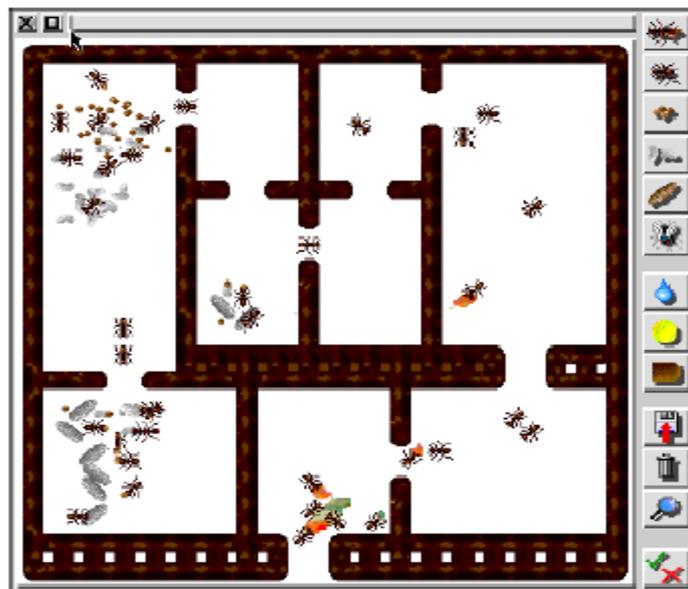
Le système MANTA est caractéristique d'une approche réactive dans laquelle l'informatique et les sciences de la vie s'apportent mutuellement de leurs apports. En effet ce projet, qui porte sur la modélisation par systèmes multi agents d'une colonie de fourmis *Ectatomma ruidum* au cours de son évolution, est né de la rencontre de deux domaines de recherches : l'éthologie et les systèmes multi agents. Les expérimentations ont porté notamment sur sa sociogenèse, c'est-à-dire sur la constitution d'une colonie mature à partir d'une (ou plusieurs) reine(s), sur l'adaptation d'une colonie à son environnement et, en particulier, sur la division des tâches (polyéthisme) et la spécialisation des ouvrières, et en fin sur la polygynie. Il s'agissait en particulier de tester une hypothèse éthologique concernant l'aspect distribué de la prise de décision dans une colonie de fourmis. Le comportement des individus suffit-il à expliquer la génération et la stabilité des formes sociales observées (division du travail, polyéthisme d'âge, dynamique de la fondation de la société, etc.)? Peut-on montrer qu'une société d'agents peut survivre sans faire appel à un système de contrôle centralisé ni à une quelconque organisation hiérarchique? C'est pour répondre à ce type de question que le système MANTA fut réalisé. Il mit en évidence que l'organisation de travail dans une colonie de fourmis peut résulter d'un ensemble d'interactions et de contrôles locaux, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir une quelconque entité centrale de régulation, les performances

adaptatives de la société étant le résultat des comportements, forcément élémentaires, de chacun de ses membres. Dans un système de simulation multi agent tel que MANTA, il s'agit de modéliser les différentes entités qui interviennent dans un nid de fourmis sous forme d'agents réactifs sans faire appel à une organisation prédéfinie ni à des spécialisation préétablies.

Une colonie de fourmis peut être divisée en trois groupes d'agents :

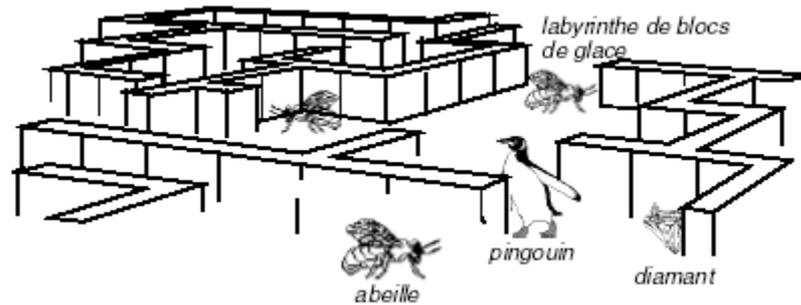
- Les "assistés": qui regroupent tous les membres du couvain, c'est-à-dire les œufs, les larves à leurs différents stades de maturation et les cocons.
- Les "assistants": qui comprennent la reine, les ouvrières et les mâles.
- Les autres: où sont regroupés les aliments, sous quelque forme qu'ils soient, les déchets et déjections en tout genre et les cadavres de fourmis.

Le lecteur intéressé pourra se référer à [Drogoul 93] qui présente la problématique, le système et les expériences avec toute la précision nécessaire. La figure (2.2) montre l'écran servant à la définition du nid et à l'observation directe de la fourmilière.



**Figure 2.2** Un nid de fourmis tel qu'il est visualisé par MANTA, d'après [Drogoul 93]

### 2.2.3 PENG1: Modélisation d'un écosystème abstrait



**Figure 2.3.** Une représentation en perspective de PENG1, du point de vue du pingouin, d'après [Drogoul 93]

PENG1 est dérivé d'un jeu vidéo nommé PENGO. Ce jeu se déroule dans un micro-monde peuplé d'un pingouin, d'abeilles, de diamants et de blocs de glace (voir Figure). Le pingouin, contrôlé par le joueur, se déplace dans un labyrinthe dont les parois sont faites des blocs de glace qui peuvent être poussés afin de libérer un chemin ou d'écraser les individus qui se trouvent de l'autre côté. Le but du jeu est de faire récolter par le pingouin un certain nombre de diamants, tout en lui évitant d'être piqué par les abeilles, ou écrasé par un bloc de glace poussé par l'une d'entre elles. Celles-ci ont un déplacement semi-aléatoire, ce qui signifie qu'elles suivent le pingouin quand elles en sont assez proches, mais qu'elles peuvent tout à coup décider de l'abandonner, la probabilité pour qu'elles le fassent étant fixée une fois pour toutes au commencement de la partie. Un bloc de glace ne peut être poussé que dans les directions où il n'est pas immédiatement adjacent à un autre bloc. Après avoir été poussé, il glisse dans la direction choisie jusqu'à ce qu'il heurte un autre bloc de glace (ou les bords de l'écran). Tout animal, abeille ou pingouin, qui croise son chemin est irrémédiablement écrasé. La stratégie que doit utiliser le joueur s'appuie donc sur deux points:

- Il doit être capable de faire réagir le pingouin à toute attaque d'abeilles en le faisant fuir ou contre-attaquer s'il en a la possibilité. Il doit ainsi faire attention à ne pas le laisser se faire enfermer par un essaim d'abeilles, dont il a peu de chance de sortir vivant.
- Il doit en même temps veiller à lui fournir un chemin correct dans le labyrinthe de manière à ce qu'il ramasse les diamants le plus vite possible. Dans la version originale du jeu, le temps imparti est en effet strictement limité.

Les types d'agents présents dans PENG1 sont au nombre de quatre. Les diamants, les cubes de glace, les abeilles et enfin le pingouin. De manière générale, voici comment a été

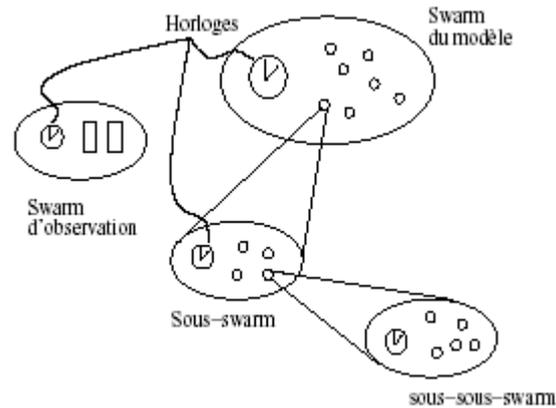
conçu le système. Le pingouin est guidé dans sa recherche de satisfaction par un gradient émis par les diamants et propagé dans l'environnement. Il émet lui même un gradient, de rayon plus limité, qui a pour effet d'attirer les abeilles quand elles le sentent (leur recherche de satisfaction est entachée d'une erreur aléatoire). A leur tour, les abeilles propagent un stimulus qui déclenche chez le pingouin son comportement de fuite. Enfin, les cubes de glace ne sont sensibles qu'au fait d'être poussés par les abeilles ou le pingouin, ce qui déclenche leur comportement de fuite. Lors de cette fuite, ils propagent un stimulus activant le comportement de fuite du pingouin. Selon le paradigme de résolution collective de problèmes, il s'avère que les deux buts informels que doit atteindre le pingouin sont, d'une part de supprimer tous les diamants de l'environnement, d'autre part de rester en vie le plus longtemps possible. Et ces buts à atteindre sont bien sûr transcrits dans l'environnement sous la forme d'une entropie globale (le gradient créé par les diamants) et de plusieurs températures locales (celles générées par les abeilles et les cubes de glace en translation), dont la perception par le pingouin déclenche ses comportements téléonomiques respectifs de satisfaction et de fuite, qui doivent avoir des propriétés néguentropiques (disparition ou évitement des gradients mentionnés).

#### 2.2.4 Swarm

Le projet *SWARM* [Cardon 03+] [Baptiste 03] a débuté en 1994 par Chris Langton, puis son développement a été repris par Dave Hiebeler, de l'institut de Santa F. La plate-forme Swarm est devenue, en l'espace de quelques années, la référence en termes d'environnement de développement de simulations multi-agents. Elle propose en effet un noyau applicatif éprouvé et très bien conçu, consacré à la modélisation, à la simulation et à l'exploration de systèmes complexes, des bibliothèques (de visualisation, de calcul) complètes, et bénéficie d'une maintenance technique régulière et du support d'une communauté extrêmement active de modélisateurs. La démarche est comme suit :

- Création du monde virtuel : environnement artificiel spatial et temporel où évoluent des entités ;
- Création d'agents d'observation qui sondent le monde virtuel précédent ;
- Fonctionnement de l'ensemble (monde virtuel + observateurs) dans une simulation discrétisée en temps avec des horloges synchronisées.

Possibilités de hiérarchies et de structures récursives. De nombreuses applications développées, notamment à caractère écologique.



**Figure 2.4.** *Swarm - structures récursives* [Cardon 03,+]

### 2.2.5 Cormas

CORMAS [Bousquet 98,+] [Baptiste 03] est un environnement développé au CIRAD, pour la programmation de modèles multi-agents. CORMAS, spécialisé dans la gestion de ressources renouvelables, offre un cadre de développement de modèles de simulation, des modes de coordination entre des individus et des groupes qui exploitent ces ressources. Le cadre de CORMAS se structure en trois modules :

- un module permettant de définir les entités du système (agents) et leurs interactions,
- un module permettant de contrôler la dynamique de la totalité du modèle,
- un module permettant d'observer la simulation depuis différents points de vue (affichages de différentes propriétés du modèle en cours de simulation).

La plupart des éléments composants ces trois modules sont prédéfinis et disponibles dans des classes SmallTalk. L'interface de développement de CORMAS est l'environnement de développement intégré de VisualWorks.

### 2.2.6 Jardins des Hasards

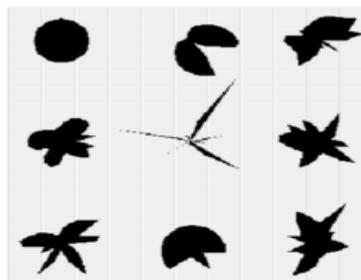
Le Jardin des Hasards [Hutzler 95] [Jardin 04] trouve son origine dans le projet artistique imaginé par le peintre Bernard Gortais, dont le but est de proposer aux spectateurs une représentation graphique poétique de l'ambiance climatique d'un lieu réel, par l'intermédiaire de la présentation d'un monde virtuel où vivent et coexistent, se déplacent et interagissent des entités de formes et de couleur différentes.

Les "Jardins des hasards" sont des jardins virtuels dont l'évolution est fonction de données numériques reçues par modem en temps réel. Ils sont composés de plusieurs familles de formes qui naissent, grandissent, meurent et interagissent entre elles suivant des comportements inspirés de la vie. Ils constituent des écosystèmes de vie artificielle.

Le Jardin des Hasards est un espace de création en même temps qu'un espace de vie artificielle, dans lequel chaque spectateur est appelé à participer à la définition d'un jardin particulier. Le Jardin du Caplan est l'un de ces jardins.

Dans les Jardins des Hasards, des données numériques prélevées de manière continue dans le monde réel constituent la "météorologie" d'un jardin virtuel de formes colorées. Chacune de ces formes va bénéficier de manière individuelle de la présence ou de l'absence de certaines données pour se déplacer et interagir avec d'autres formes, croître, se reproduire si les conditions sont favorables ou disparaître lorsque les ressources s'épuisent.

Chaque jardin est ainsi un écosystème virtuel imaginaire dont l'évolution est soumise à l'influence d'un système complexe réel. Cet écosystème est peuplé de formes graphiques qui sont autant de métaphores d'organismes vivants, essayant de survivre dans un environnement dont le perpétuel renouvellement traduit les évolutions des données décrivant le système complexe réel. De ce point de vue, un jardin est un fenêtre virtuelle offrant un nouveau regard sur l'évolution d'un système complexe réel.



**Figure 2.5** Exemples de formes générées [Hutzler 95,+]

Le système peut être décrit de manière générique comme un ensemble d'entités indépendantes (des agents) qui évoluent dans un espace continu (l'environnement). Dans le "Jardin des hasards", les formes de chaque famille ont un comportement autonome dans l'espace de l'image, sous l'influence des données météo du "Caplan".

A chaque forme sont associés des paramètres qui décrivent les ressources dont elle dispose, ainsi que des signaux qu'elle peut propager autour d'elle. Par ailleurs, l'environnement est décrit par des paramètres locaux indiquant les ressources disponibles à un endroit donné ainsi que par les données météorologiques reçues par le système.

Les formes interagissent entre elles en étant mutuellement sensibles aux signaux qu'elles émettent. Les formes réagissent également aux conditions environnementales qu'elles rencontrent en se déplaçant dans l'image.

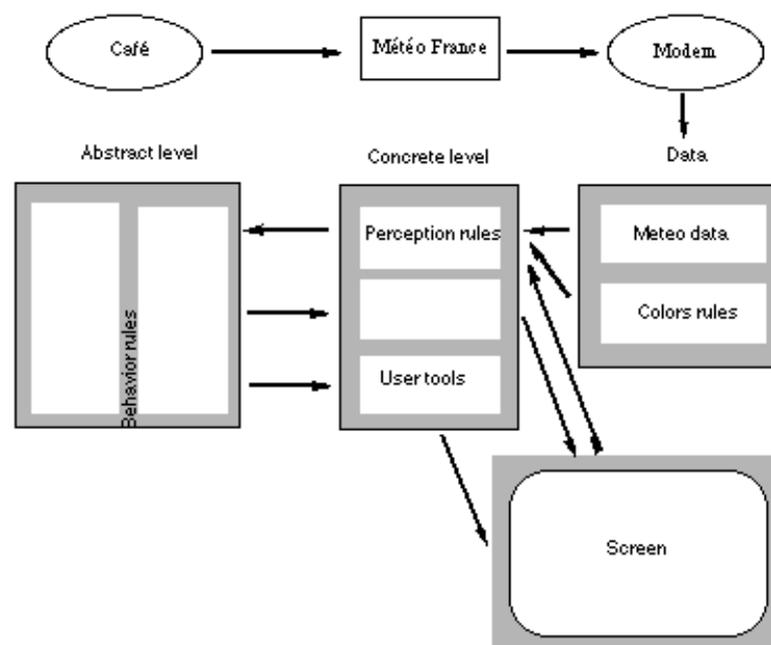


Figure 2.6 . Structure du système ``Jardin des Hasards'' [Jardin 04]

### 2.2.7 ECLPSS

Eclpss (Ecological Component Library for Parallel Spatial Simulation) [Baptiste 03] est un environnement basé sur le langage Java destiné aux écologues. Cet outil permet d'élaborer facilement des simulations d'écosystèmes dans de nombreuses échelles de temps et d'espace.

Un modèle Eclpss est composé de trois entités : un ensemble de variables, un ensemble de composants qui modifient ces états et un ensemble de simulateurs pour ces composants.

Les composants Eclpss sont développés en code java et stockés dans une bibliothèque pour réutilisation. L'intérêt principal de cet environnement est sa capacité à effectuer des simulations sur des machines parallèles.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté les concepts liés aux écosystèmes. Il a abordé également le concept de coevolution où l'évolution d'une espèce affecte l'évolution des espèces avec lesquelles elle interagit.

Le domaine de la simulation d'écosystèmes, en particulier, requiert la contribution de plusieurs disciplines, notamment certaines liées à l'informatique et à la biologie. Dans ce chapitre nous avons présenté quelques exemples de ces simulations.

