UNIVERSITE PARIS VI - PIERRE ET MARIE CURIE
U.F.R. D'INFORMATIQUE

|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS VI

Discipline : Informatique

présentée et soutenue publiquement
par

GUILLAUME HUTZLER

Le **14 janvier 2000**

Du Jardin des Hasards
aux Jardins de Données:

une approche artistique et multi-agent des interfaces homme / systèmes complexes

---

Directeur de thèse : Jean-Pierre Briot
Co-directeur : Alexis Drogoul

JURY

MM.	**Philippe Codognet, Professeur (Université Paris 6)**	**Président**
	Paul Bourgine, Directeur de recherches (CEMAGREF)	**Rapporteur**
	Joël Quinqueton, Professeur (LIRMM), Montpellier	**Rapporteur**
	François Bousquet, Chargé de recherches (CIRAD), Montpellier	**Examinateur**
	Yann Orlarey, Chargé de recherches (Grame), Lyon	**Examinateur**
	Laurent Ponthou, Chef de projet (CNET), Issy-les-Moulineaux	**Examinateur**
	Francisco Varela, Directeur de recherches (CNRS), Paris	**Examinateur**
	Jean-Pierre Briot, Directeur de recherches (CNRS), Paris	**Directeur**
	Alexis Drogoul, Maître de conférences (Université Paris 6)	**Co-directeur**

Résumé

Ce travail se situe à la rencontre de l'Intelligence Artificielle Distribuée, de la Vie Artificielle et de l'Art Electronique, et s'intéresse à la construction de représentations visuelles destinées à faire l'interface en temps réel entre utilisateurs humains et systèmes complexes. Composés d'entités en interaction qui s'organisent dynamiquement, et dont l'évolution est émergente ou chaotique, donc potentiellement imprévisible, ces systèmes ne sont généralement pas observables directement, ce qui nécessite la construction de moyens d'observation adaptés.

Ce faisant, l'objectif est triple : contrôler, dans un contexte technique, l'état courant d'un système, afin d'en commander le fonctionnement ; analyser, dans un contexte scientifique, les processus à l'œuvre au sein d'un système, en vue de concevoir des systèmes ayant les mêmes propriétés ; utiliser, dans une démarche artistique, les propriétés créatrices des phénomènes complexes pour la construction d'œuvres évolutives.

Nous avons abordé ces questions en développant une plate-forme générique de conception d'interfaces. Un système multi-agent est utilisé pour récupérer des données décrivant le fonctionnement d'un système complexe, pour les filtrer et les hiérarchiser, avant d'en construire une représentation sensible pour un utilisateur.

La plate-forme a été utilisée dans une démarche artistique, avec le projet du Jardin Des Hasards, qui vise à restituer, sous forme visuelle et sonore, les conditions météorologiques d'un lieu distant, en y soumettant un écosystème artificiel avec lequel le spectateur peut interagir. Outre ses qualités esthétiques, nous avons pu montrer l'efficacité de l'image artistique pour la représentation de la météorologie. Par la réflexion qu'il a amenée sur la conception d'interfaces adaptatives et évolutives pour le suivi de systèmes complexes, le projet artistique a conduit à la définition du projet industriel des Jardins De Données, qui en constitue le prolongement.

Mots clés

systèmes multi-agents / systèmes complexes / interfaces homme-machine / art / didactique

---

Abstract

This work is at the confluence of Distributed Artificial Intelligence, Artificial Life and Electronic Art. It deals with the design of visual representations aimed at making the interface in real time between human users and complex systems. Being composed of interacting entities that dynamically organize and whose evolution is emergent or chaotic, therefore potentially unpredictable, these systems can generally not be observed directly. New visualization means must therefore be developed.

By so doing, the aim is threefold: controlling the current state of the system in a technical context, so as to enable the command of the system; analyzing the processes governing the evolution of the system in a scientific context, so as to design systems with similar properties; using the creative properties of complex phenomena in an artistic approach for the construction of evolving works.

We addressed these issues by developing a generic platform enabling to design interfaces for the interaction with complex systems. A multiagent system is used to retrieve data describing the functioning of a complex system, to filter and organize hierarchically, before building a sensible representation for the user.

The platform has been used in an artistic approach, with the Garden of Chances project. It aims at evoking, in a visual and sonorous form, the meteorological conditions of a distant place, using an artificial ecosystem with which the user can interact as a medium. More than its esthetic qualities, we demonstrated the efficiency of the artistic image to represent the meteorology. The reflection conducted on the design of adaptive and evolving interfaces for the representation of complex systems has lead to the definition of the industrial project of Data Gardens, which is its extension.

Keywords

multiagent systems / complex systems / computer-human interaction / art / didactic

REMERCIEMENTS

Chacun des membres du jury a influencé, directement ou indirectement, la réflexion développée au cours de cette thèse et le travail présenté dans ce document. Je tiens à remercier chacun de l'honneur qu'il me fait en examinant, rapportant ou présidant au sein de mon jury de thèse.

Je suis redevable à Alexis Drogoul de la fascination que j'éprouve à l'égard de l'*intelligence collective* et des phénomènes émergents. Je n'oublierai pas, en particulier, un lundi de Pâques un peu surréaliste que nous avons partagé dans les sous-sols de Jussieu à veiller sur des dizaines de fourmilières virtuelles. Je lui suis surtout redevable d'avoir, dès le début, été enthousiasmé par le projet du *Jardin des Hasards*, et d'avoir pris la responsabilité de l'encadrer au cours de mon DEA. Ce travail n'aurait pu aboutir sans son soutien constant, ni l'entière confiance qu'il m'a témoignée. J'espère n'avoir pas déçu ses attentes, et le prie d'excuser le clin d'œil un peu impertinent de l'avant-propos.

Jean-Pierre Briot a assumé la (lourde) responsabilité de diriger une thèse d'informatique dans laquelle il est (presque) autant question d'art que d'informatique. Sa sensibilité artistique et sa rigueur informatique m'ont été précieuses pour conserver l'équilibre entre les deux facettes principales de ce travail.

Il n'est pas trop fort de dire que cette thèse est également le fruit du travail et des idées de Bernard Gortais, sans qui elle n'aurait jamais pu voir le jour. Bien que je me le sois approprié, *Le Jardin des Hasards* est son projet, issu de ses propres recherches artistiques. Je lui dois de m'avoir initié à l'art et à la pensée de W. Kandinsky et P. Klee. Nos innombrables discussions ont été une source constante d'inspiration et d'idées pour cette recherche qui je l'espère, a également enrichi son travail de peinture.

Le Centre National d'Etude des Télécommunications (centre de recherche et développement de France Télécom) a soutenu financièrement le projet des *Jardins de Données*, sous la forme d'un contrat de recherche dans le cadre des Consultations Thématiques Informelles, et sous la forme d'une bourse de thèse attribuée à Valérie Renault.

Plusieurs étudiants ont apporté une aide technique au travail présenté dans cette thèse, certains ayant également contribué à l'avancée des idées ; qu'ils en soient tous remerciés. En particulier, Jérôme Cailly et Antoine Melki, du DESS GLA, ont apporté une aide substantielle dans le cadre du projet des *Jardins de Données*. Valérie Renault, du DEA IARFA, a quant à elle participé activement à la maturation de ce même projet, qui constitue désormais le sujet de sa thèse.

Une partie du travail présenté dans cette thèse a été rendue possible par la participation bénévole d'une dizaine de « cobayes » qui m'ont accordé une heure de leur temps, et je leur suis reconnaissant de s'être soumis de bonne grâce aux expériences que je leur proposais. Je remercie en particulier ceux qui ont participé à la phase d'élaboration des différents protocoles expérimentaux. De manière plus générale, je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à la mise au point de ce document, par leur relecture attentive et leurs remarques souvent pertinentes.

Même s'ils ont pu être déroutés par les choix que j'ai effectués tout au long de mes études, mes parents les ont toujours respectés. Je tiens à les remercier, ainsi que l'ensemble de ma famille (au sens large), pour leur soutien, leur confiance et leur affection.

Par son amour sans cesse renouvelé, Sophie a contribué à l'aboutissement de ce travail d'une manière qui n'est pas directement quantifiable ni perceptible mais qui n'en est que plus importante. A mon tour, je lui exprime ici tout mon amour.

« On ne comprend vraiment quelque chose que quand on peut l'expliquer à sa grand-mère »

Albert Einstein

Ce document est dédié à chacune de mes grands-mères, à qui je n'ai cessé de penser lors de sa rédaction…

…en espérant avoir, au moins en partie, réussi à rendre compréhensibles et accessibles des concepts qui, comme le titre l'indique bien, sont complexes, sans sacrifier pour autant à la rigueur scientifique et technique que ce genre d'exercice impose…

… et à Sophie, pour son amour

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES

Avant-propos

Introduction

Première partie - Introduction à la représentation de systèmes complexes

Chapitre I - De l'observation à la représentation

Chapitre II - Systèmes complexes et représentation

Chapitre III - Complexité du système et de l'observateur

Deuxième partie - Construction d'un système d'interface

Chapitre IV - Positionnement de la démarche

Chapitre VII - Eléments de conception d'interfaces

Conclusion

TABLEAUX

AVERTISSEMENT

"The most fruitful developments have always emerged where two different kinds of thinking met."[1]

W. Heisenberg

Constater que les processus créateurs propres à l'artiste et au scientifique sont, sinon semblables, du moins très similaires, est presque devenu aujourd'hui un lieu commun (voir notamment [Boden 1994]). Ce qui n'est pas forcément d'un très grand secours, ni pour comprendre effectivement ces processus, ni pour en tirer des principes applicatifs intéressants. Les exemples de coopération véritablement réussie entre art et science sont d'ailleurs très peu nombreux depuis Léonard de Vinci qui réalisait la synthèse des deux talents (voir [Valéry 1957]).

Il est courant, voire systématique, que les avancées technologiques et scientifiques les plus récentes soient utilisées ou détournées par les artistes pour leur création. Mais souvent, il ne s'agit que d'un outil au même titre que le pinceau. Il est courant également que l'imagerie scientifique révèle une esthétique et une beauté certaine, d'où la tentation parfois de l'élever au rang d'art. Mais la beauté n'est alors qu'un effet de bord, un produit dérivé de l'activité scientifique. Il est moins fréquent que les artistes s'intéressent à la démarche scientifique, et non plus seulement à ses outils, moins fréquent également que les scientifiques s'intéressent à l'art comme processus de recherche et de création, et non plus seulement comme résultat incident. Il est encore plus rare que s'établisse, entre artistes et scientifiques, un dialogue constructif où chacun questionne l'autre alternativement, selon ce que J. Wagensberg appellerait un cercle vertueux [Wagensberg 1997], c'est-à-dire selon une spirale de questionnements toujours renouvelée, produisant parfois quelques réponses, artistiques ou scientifiques.

Cette dernière démarche est celle qui, consciemment ou non, a depuis le début caractérisé notre recherche, en interaction permanente avec la recherche artistique du peintre Bernard Gortais. De ce fait, il ne sera pas possible d'exposer les problématiques abordées ni les solutions retenues du seul point de vue scientifique, puisqu'elles doivent aussi beaucoup au point de vue artistique. Cette thèse sera donc à

[1] « Les développements les plus fructueux ont toujours émergé à la rencontre de deux modes de pensée différents. » (traduction personnelle)

l'image de la recherche qu'elle présente, une alternance de questionnements artistiques et scientifiques, où certains pourront, je l'espère, y trouver quelques réponses.

AVANT-PROPOS

A. Drogoul (ou plutôt *La Tortue*) décrit de la manière suivante le test de Fourming, analogue du Test de Turing•[2] pour l'évaluation d'une fourmilière artificielle (dans [Drogoul 1993], p. v) :

« La Tortue	*Si je vous demandais, par exemple, de construire de A à Z un système• qui reproduise exactement une fourmilière. Je veux dire, un système qui, si je l'observe, ne m'apparaisse pas différent d'une fourmilière dans des conditions normales.*
Achille	*Quelque chose que vous ne pourriez distinguer d'une fourmilière? Un peu comme dans le test de Turing?*
La Tortue	*Tout à fait. Appelons ce test le test de Fourming. Je prends d'un côté une fourmilière, de l'autre votre système. Puis je les regarde et au besoin, j'interagis avec chacun d'entre eux mais sans les voir. Disons, par l'intermédiaire d'un opérateur à qui je donne des ordres, "Mettez plus de nourriture", "Ecrasez les fourmis qui sortent", etc. et qui me rapporte fidèlement le comportement de l'ensemble en réaction à chacun de ces événements. Votre système passera le test de Fourming si les réponses qu'il me fournit, par l'intermédiaire de l'opérateur, sont telles que je suis incapable de distinguer la vraie colonie de votre colonie artificielle. »*

Le langage verbal peut sembler approprié pour le test de Turing dans la mesure où il s'agit d'évaluer les performances d'un système censé reproduire « l'intelligence » d'un être humain, notamment ses capacités à communiquer par des mots et des phrases. Il apparaît par contre très insuffisant et pauvre pour le test de Fourming, où c'est la dynamique organisationnelle d'un système distribué comme la fourmilière qu'il s'agit d'évaluer. Un peu comme si l'on prétendait décrire par des mots une symphonie de Mozart ou une peinture de Michel-Ange. Ceci explique sans doute que le test de Fourming, tel qu'il est décrit, n'ait jamais été appliqué pour valider le système MANTA de simulation de fourmilière. Cette validation s'est effectuée sur la base de comparaisons statistiques concernant l'évolution de populations ou la division du travail, mais aussi (et peut-être même surtout) sur la base de comparaisons visuelles qualitatives de la dynamique des systèmes naturels et artificiels [Drogoul 1993]. Ceci explique sans doute aussi l'étonnant lapsus de *la tortue* : "je les **regarde** et au besoin, j'interagis avec chacun d'entre eux mais **sans les voir**", comme pour suggérer que la vue serait peut-être un moyen plus approprié que le langage pour comprendre le fonctionnement de la fourmilière.

[2] Les mots marqués par le symbole • sont regroupés dans le glossaire en fin de document. Les mots ne sont marqués qu'à leur première occurrence.

La conversation aurait pu se poursuivre de la manière suivante :

Achille (*perplexe*) Je ne suis pas sûr de bien comprendre. Vous me dites que vous regardez la fourmilière et mon système mais sans les voir. Comment pouvez-vous les regarder puisque vous ne les voyez pas ?

La Tortue C'est une façon de parler. Je voulais dire par là que la description que me donne l'opérateur de l'un ou l'autre des deux systèmes me permet d'en construire une image dans ma tête. A chaque nouvelle indication qu'il me donne, je complète cette image mentale. C'est comme pour un puzzle, j'ajoute une pièce.

Achille S'il a autant de pièces qu'il y a de fourmis, vous n'êtes pas près de le terminer, votre puzzle ! Surtout qu'elles n'arrêtent pas de bouger, les fourmis. Je n'ai jamais réussi à toutes les compter. A chaque fois que je commence, il y a toujours l'une ou l'autre qui bouge, ça m'embrouille et je suis obligé de tout recommencer depuis le début. C'est trop compliqué, il y en a au moins mille.

La Tortue Vous avez tout à fait raison, mon cher Achille. Vous vous rappelez la parabole des deux horlogers ?

Achille Celle que racontait Monsieur Simon dans le livre que vous m'avez offert ? Je ne m'en souviens plus très bien. Comment s'appelait-il d'ailleurs ce livre ?

La Tortue *Science des systèmes, sciences de l'artificiel*[3]. La parabole raconte l'histoire de deux frères qui fabriquaient des montres contenant 1000 pièces. Le premier les fabriquait en assemblant des sous-ensembles de 10 pièces, eux-mêmes assemblés en groupes de 10 sous-ensembles, et l'assemblage de ces groupes produisait la montre. Le deuxième, par contre, assemblait en une seule étape les 1000 pièces, de sorte que s'il interrompait son travail pour une raison ou pour une autre, il devait tout recommencer à zéro.

Achille (*excité*) Oui, ca y est, je m'en souviens à présent ! Plus il vendait de montres, plus les gens lui téléphonaient pour commander des montres. Plus les gens lui téléphonaient, et plus il s'interrompait. Plus il s'interrompait et moins il pouvait finir de montres. Et évidemment, moins il finissait de montres, moins il pouvait en vendre. Le pauvre, il devait s'arracher les cheveux.

La Tortue Probablement. L'autre par contre, qui était interrompu tout aussi souvent par le téléphone, avait moins de travail à chaque fois pour reconstituer l'assemblage de 10 éléments qu'il était en train d'effectuer. De cette manière, il pouvait finir et vendre plus de montres.

Achille (*s'illuminant*) Je crois que je vois ou vous voulez en venir ! Vous voulez dire qu'au lieu de compter toutes les fourmis une à une, je pourrais les assembler en plusieurs petits groupes. Ainsi, si je me trompe dans le compte d'un groupe, je ne serai pas obligé de tout recompter.

La Tortue C'est tout à fait cela !

Achille Ce n'est pas bête, je n'y avais jamais pensé ! Mais quel est le rapport avec l'opérateur qui vous décrivait la fourmilière ?

[3] voir [Simon 1991], p. 177.

La Tortue Et bien au lieu de décrire l'activité de la fourmilière, fourmi par fourmi, il pourrait décrire cette activité de manière plus globale, comme l'activité de groupes de fourmis.

Achille Je crois qu'il me faudrait un exemple.

La Tortue Imaginez que toutes les fourmis se déplacent de manière complètement aléatoire.

Achille Le Fourmilier nous a dit que beaucoup le faisaient, mais de là à penser que toutes le font, vous y allez un peu fort.

La Tortue Bien sûr que toutes ne le font pas dans la réalité. Ce n'est qu'un exemple. Donc, imaginez que toutes les fourmis se déplacent de manière aléatoire. Comment pensez-vous pouvoir décrire le comportement de la fourmilière ?

Achille Et bien j'essaie de les regrouper en fonction de leur direction. Non, de leur vitesse. Et puis…

La Tortue Leur direction et leur vitesse sont aléatoires, ne l'oubliez pas. Et une même fourmi peut avancer, s'arrêter, repartir, accélérer, tourner, s'arrêter encore, de manière totalement imprévisible.

Achille Alors là, je ne comprends pas. Si je ne peux pas les décrire une par une, et que je ne peux non plus les répartir en sous-groupes, je ne vois pas ce qu'il nous reste, nous sommes bloqués.

La Tortue La réponse est dans la question.

Achille (*de plus en plus perplexe*) Vos devinettes « zen » ne m'amusent pas beaucoup.

La Tortue Gros bêta, ce n'est pas une devinette ! Quand les physiciens étudient les propriétés d'un gaz, ils ne s'intéressent pas à ce que fait chaque molécule de gaz. Peu leur importe. Tout ce qui compte est que ce gaz présente, d'un point de vue global, certaines propriétés particulières de température ou de pression. C'est la même chose pour la fourmilière. Quand je vous ai dit que toutes les fourmis se déplaçaient de manière aléatoire, et bien tout ce que l'on peut dire pour décrire l'activité de la fourmilière, c'est précisément que toutes les fourmis se déplacent de manière aléatoire. La réponse au problème était contenue dans ma question. Puisque toutes ont le même comportement, elles ne forment qu'un seul groupe. Tout au plus peut-on donner leur nombre ou bien caractériser leur vitesse moyenne, ou ce genre de choses.

Achille (*grommelant*) Hmm, vous m'avez encore piégé… (*il réfléchit, puis reprend, croyant tenir sa revanche*) Mais puisque ce n'est jamais le cas, il ne sert à rien votre exemple. Comment faites-vous avec une véritable fourmilière ?

La Tortue Justement, j'allais y venir. Vous vous rappelez les fourmis l'autre jour sur votre table basse[4] ?

Achille (*encore plus renfrogné*) Si je m'en souviens ? Elles prenaient mon salon pour une autoroute, les unes derrière les autres, en colonne.

La Tortue Vous pouvez répéter ce que vous venez de dire ?

Achille (*un peu agacé*) Auriez-vous des problèmes d'audition, Madame la Tortue. Ou alors, vous n'écoutez pas les réponses à vos propres questions !

[4] voir [Drogoul 1993], p viii.

La Tortue (*très calmement*) Ni l'un ni l'autre, je souhaitais juste que vous me répétiez ce que vous venez de dire.

Achille (*il soupire*) Si cela peut vous faire plaisir. Je disais qu'elles prenaient mon salon pour une autoroute, (*il marque une pause, puis, un peu hésitant*) les … unes … derrière … les … autres … en … colonne (*son visage s'illumine tout d'un coup*).

La Tortue Vous voyez Achille, sans vous en rendre compte, vous venez de me décrire l'activité de tout un ensemble de fourmis par une simple phrase.

Achille C'est ma foi vrai. Je vous dois des excuses Madame la Tortue, je crois que je me suis un peu laissé emporter.

La Tortue Ce n'est rien Achille. D'ailleurs, je vous dois, moi aussi, des excuses.

Achille Pardon ?

La Tortue Oui, je n'ai pas été très honnête avec vous.

Achille Comment cela ?

La Tortue Votre première objection était tout à fait recevable ; à savoir qu'il est difficile de voir sans regarder. Et une description verbale peut difficilement, à cet égard, remplacer la vision directe des phénomènes.

Achille Je me disais bien aussi ! (*maintenant fier de lui*) Mais pour la colonne de fourmi, cela marche plutôt bien.

La Tortue Bien sûr ! Parce qu'il s'agit aussi d'un exemple simple … et à condition de ne pas être trop exigeant.

Achille Que voulez-vous dire ?

La Tortue Tout d'abord, il faut remarquer que l'exemple de la colonne n'est pas plus compliqué que celui où toutes les fourmis se déplacent aléatoirement, puisque dans un cas comme dans l'autre, toutes les fourmis ont le même comportement.

Achille Ce n'est peut-être pas plus compliqué, mais c'est plus intelligent !

La Tortue Je ne serais pas aussi affirmatif que vous, Achille. Souvenez-vous de notre discussion de l'autre jour à propos de l'intelligence des colonnes de fourmis[5], et de ce qu'en disait mon ami Rodney Brooks.

Achille (*à nouveau un peu vexé*) Je m'en souviens bien. « L'intelligence est dans l'œil de l'observateur ». (*il se lève et se dirige vers la fenêtre*) Mais je ne suis toujours pas très sûr d'avoir bien compris les implications de cette affirmation. Oh ! Regardez ce nuage ! On dirait un poulet rôti !

La Tortue Auriez-vous faim Achille ?

Achille Pas du tout, je disais simplement que ce nuage me faisait penser à un poulet rôti.

La Tortue Et le poulet rôti, est-il dans le nuage ou dans votre œil ?

Achille Dans le nuage bien sûr ! Enfin, non, dans mon œil. Ou plutôt ni l'un ni l'autre. D'ailleurs, il n'y a plus de poulet !

La Tortue Et pourtant il vous a semblé le voir…

Achille Je ne sais plus très bien. Vous m'embrouillez.

[5] ibid, p. viii.

La Tortue La perception est un phénomène bien étrange, Achille. La plupart des gens croient que ce que l'on voit est une donnée objective, qui ne dépend que des objets présents devant nous, et pas de la personne qui regarde. En fait, c'est beaucoup plus complexe que cela. Ce que l'on voit dépend bien sûr des objets physiquement et objectivement présents devant nous, mais également de notre culture, de nos connaissances, de nos attentes, et même de nos émotions, toutes choses en partie inconscientes qui nous aident à interpréter ce que nous voyons.

Achille Je ne vois pas très bien où voulez en venir.

La Tortue C'est simple. Pour commencer, si vous voyez un poulet rôti, c'est que vous savez ce qu'est un poulet rôti.

Achille Oui, bien sûr !

La Tortue Mais dans ce nuage, vous auriez pu voir aussi bien un ballon de rugby, ou un hélicoptère.

Achille Je suppose.

La Tortue Donc si vous avez reconnu de la nourriture, plutôt qu'un ballon ou un hélicoptère, peut-être était-ce parce que vous aviez faim ?

Achille (*interloqué*) Vous voulez dire que lorsque j'ai faim, j'ai plus de chances de voir des poulets rôtis dans les nuages ?

La Tortue C'est exactement cela.

Achille Donc, en suivant votre raisonnement, si j'avais vu un ballon de rugby, cela aurait voulu dire que j'avais envie de jouer, et si j'avais vu un hélicoptère, que j'avais envie de partir en voyage ?

La Tortue Ce n'est pas toujours aussi simple que cela, mais l'idée est la bonne. C'est le principe de ce que l'on appelle les épreuves psychologiques projectives, et plus particulièrement celui du Rorschach. Ils sont dits projectifs parce qu'ils sont basés sur des figures ambiguës pouvant être interprétées de plusieurs manières différentes. L'interprétation se fait alors en « projetant » dans la figure des éléments personnels, généralement inconscients.

Achille C'est extraordinaire. Et pour les fourmis c'est la même chose. Je crois qu'elles sont intelligentes parce que je suis moi-même intelligent.

La Tortue (*elle toussote*) Hum, hum. Oui, si l'on veut. Vous interprétez la colonne de fourmis par assimilation avec les colonnes que vous avez déjà eu l'occasion de voir. Des colonnes de soldats par exemple, avec leur chef devant. Vous attribuez à la colonne de soldats une certaine intelligence, n'est-ce pas ?

Achille Naturellement. A leur chef en tout cas.

La Tortue Bien. Lorsque vous voyez une colonne de fourmis, puisque la forme globale est assimilable à celle d'une colonne de soldats, vous identifiez un isomorphisme• entre les deux types de colonnes. Par analogie, vous supposez alors que les mécanismes sous-jacents sont les mêmes.

Achille Je suppose que vous avez raison.

La Tortue Et vous supposez donc que la colonne de fourmis est dirigée par une espèce de chef-fourmi qui serait un peu plus intelligente que les autres.

Achille C'est à peu près cela.

La Tortue (*hilare et triomphante*) Vous n'avez plus qu'à imaginer que le chef-soldat soit aussi bête que les autres et qu'il s'est égaré, et l'intelligence de votre file de fourmis ne vous posera plus de problème !

Achille (*penaud*) Vous vous moquez de moi. Ce n'est pas très gentil.

La Tortue (*contenant son fou-rire avec peine*) Vous avez raison. Hum, revenons à nos moutons. Enfin, nos fourmis.

Achille Soyez un peu sérieuse, Madame la Tortue.

La Tortue (*se calmant enfin*) Bien. Je vous avais dit que l'exemple de la colonne de fourmis n'était pas plus compliqué que celui des fourmis au déplacement aléatoire. Ce n'est pas tout à fait exact. D'abord, si l'on peut considérer que toutes les fourmis ont les mêmes règles de comportement, c'est-à-dire effectuent les mêmes actions en réponse aux mêmes perceptions, toutes ne se comportent pas de la même manière à un instant donné puisque leurs perceptions peuvent être différentes. Ainsi, certaines se dirigent vers les miettes de gâteau alors que d'autres, chargées de miettes, retournent vers le nid, les unes interagissant parfois avec les autres.

Achille Tout ceci serait difficile à décrire simplement avec des mots.

La Tortue Bien sûr ! On peut dire que le système est caractérisé par une crypticité• importante, c'est-à-dire qu'il est difficile d'en fournir une description exhaustive. Le système a pourtant une *complexité effective* faible, c'est-à-dire qu'il est relativement simple de décrire les règles de comportement que les fourmis utilisent pour rechercher leur nourriture. En d'autres termes, le modèle permettant d'expliquer le comportement des fourmis est simple, mais cela peut donner lieu, d'un point de vue global, à des phénomènes d'une grande complexité.

Achille Et encore, il n'y en avait que quelques unes dans mon salon. Les autres étaient restées dans leur nid !

La Tortue Evidemment. Le problème serait encore plus ardu si l'on avait affaire à l'ensemble de la fourmilière et qu'il fallait décrire toutes les relations intervenant entre les fourmis qui vont chercher de la nourriture, celles qui soignent les œufs ou les larves, celles qui défendent le nid, sans compter celles dont le comportement semble aléatoire. Le langage verbal n'est pas vraiment adapté pour rendre compte rapidement de relations ou de structures compliquées, surtout s'il s'agit de structures spatiales.

Achille Mais alors, pour en revenir à votre opérateur, comment fait-il pour décrire correctement ce qui se passe ?

La Tortue Et bien mon opérateur, s'il ne dispose que de moyens verbaux pour décrire le phénomène, devra en donner une description fonctionnelle d'un niveau de généralité assez élevé, par exemple, « une colonne de fourmis vient chercher de la nourriture sur la table basse ». Tout ce que je peux supposer du phénomène est que des fourmis vont et viennent entre leur nid et la table basse, et que le résultat de cette opération est l'augmentation de la quantité de nourriture dans le nid. Et encore, je peux le faire seulement parce que je connais l'organisation et le fonctionnement d'une fourmilière.

Achille C'est embêtant !

La Tortue Comme vous dites. Surtout que pour être tout à fait honnête, il y a encore un problème.

Achille Lequel ?

La Tortue En décrivant un ensemble de fourmis comme une colonne qui va chercher de la nourriture, l'opérateur, comme je vous l'ai expliqué tout à l'heure, interprète le phénomène par rapport à ce qu'il connaît déjà. S'il interprète le comportement de la fourmilière artificielle par rapport à celui qu'il connaît de la fourmilière naturelle, il fausse le test puisqu'il n'est plus neutre.

Achille Mais le but n'est-il pas justement de comparer l'activité des deux fourmilières ?

La Tortue Si, mais je souhaite pouvoir faire la comparaison moi-même. Pour cela, il faut que l'opérateur soit totalement neutre. Laissons donc tomber l'opérateur puisque je vous ai dit qu'il valait mieux voir les phénomènes plutôt que d'en parler. Il faudrait imaginer, à sa place, une représentation visuelle construite de manière automatique et qui renvoie de nos fourmilières, une image qui en reflète les évolutions.

Achille En représentant les fourmis artificielles comme des fourmis réelles ?

La Tortue Ou en représentant les fourmis réelles comme des fourmis artificielles. Qu'en pensez-vous ?

Achille C'est idiot, une fourmi artificielle n'a pas de forme, puisqu'elle est virtuelle.

La Tortue Justement, puisqu'elle n'a pas de forme, il est peut-être possible de lui en donner une qui soit plus adaptée.

Achille Je ne comprends plus. Votre monsieur Darwin n'a-t-il pas dit que les formes des animaux s'étaient progressivement adaptées pour leur permettre de survivre dans leur environnement ?

La Tortue Vous avez tout à fait raison, Achille. Il appelle cela l'évolution par sélection naturelle. Mais n'oubliez pas que ce qui nous intéresse est de simuler le comportement des fourmis, pas leur forme. Une forme adaptée serait donc pour nous une forme qui nous permette de comprendre l'activité de la fourmi, et plus globalement celle de la fourmilière.

Achille Et quelle forme serait selon vous la mieux adaptée ? Un carré, un rond, un triangle ? Et de quelle couleur ? Jaune, rouge, bleu ?

La Tortue Vous m'avez mal comprise. Aucune forme ni aucune couleur n'est meilleure qu'une autre *a priori*. Et l'on peut utiliser à la fois différentes formes et différentes couleurs pour représenter des fourmis différentes.

Achille Ah oui je vois ! On peut choisir des combinaisons uniques de formes et de couleurs pour identifier chacune des fourmis.

La Tortue On peut le faire, mais ce n'est peut-être pas ce qu'il y a de plus adapté. Autant leur donner des numéros. C'est ce que font par exemple les éthologues[6]. Ils collent des petits numéros sur le dos des fourmis pour les identifier et ils prennent ensuite des photos successives de la fourmilière pour voir les occupations de chaque fourmi au cours du temps. Non, pensez plutôt à nos deux horlogers.

Achille Qu'ont-ils encore à voir avec notre problème, ces deux-là ?

La Tortue Vous ne voyez vraiment pas ?

Achille Et bien, je suppose que vous voulez dire qu'il faudrait, là encore, décomposer l'activité de la fourmilière en groupes de fourmis … euh, peut-être en fonction de leurs occupations ?

[6] Voir [Corbara et al. 1986].

La Tortue Et donc ?

Achille (*excité*) Et donc identifier chaque groupe par une forme ou une couleur spécifique, et donner à chaque fourmi une apparence différente en fonction du groupe auquel elle appartient, donc en fonction de la tâche qu'elle est en train d'effectuer.

La Tortue Un triangle jaune, un carré rouge, un rond bleu par exemple. Mais l'on peut également représenter l'état des fourmis plutôt que leur activité, ou encore, en se plaçant à un niveau de généralité plus élevé, ne visualiser que les groupes eux-mêmes et les relations entre eux. Les possibilités sont immenses.

Achille (*un peu perplexe*) Le problème va être de choisir entre toutes ces solutions…

(*entre alors le Fourmilier avec un grand panneau*)

Le Fourmilier Bonjour mes amis, je ne vous dérange pas au moins ?

La Tortue Pas du tout. Au contraire, vous tombez bien. Nous discutions du meilleur moyen de construire une interface artificielle permettant de comprendre le fonctionnement d'une fourmilière.

Le Fourmilier (*retournant son panneau*) Et bien justement, admirez donc le tableau qu'a fait mon ami Wassily Kandinsky de ma fourmilière. Il l'a appelé « Jaune-Rouge-Bleu ». N'est-ce pas évocateur ? On croirait que les fourmis vont sortir de la toile !

figure 1 – W. Kandinsky « Jaune-Rouge-Bleu ».

Achille N'est-ce pas plutôt un poulet rôti que l'on peut voir là dans cette tâche jaune ?

Le Fourmilier Pardon ?

La *Tortue* Ne faites pas attention à Achille, Monsieur le Fourmilier. Achille a faim depuis un moment et il ne veut pas l'avouer. (*Achille grommelle dans son coin*) Votre tableau est magnifique, et très expressif. Il ne lui manque plus que le mouvement !

INTRODUCTION

> *"Simple extrapolations of interactive art can embellish the behavioral model to include inputs from the weather, time of day, Dow-Jones average, and the results of sport events, elections, or film ratings."*[7]
>
> *N. Negroponte [Negroponte 1979]*

La vision de l'art interactif proposée par N. Negroponte résume remarquablement bien l'esprit de la recherche présentée dans cette thèse. Il faut en effet imaginer une œuvre artistique numérique, alimentée en données décrivant la météorologie d'un lieu particulier, qui se transforme et évolue de manière à toujours proposer une représentation visuelle et sonore traduisant l'ambiance climatique du lieu. Des agents-plantes s'y développent, plus ou moins favorisés par la météorologie, servant de nourriture à des agents-animaux. Ce faisant, l'image fonctionne comme une fenêtre virtuelle à travers laquelle le spectateur peut accéder à une réalité distante, en en retirant une compréhension intuitive du temps qu'il y fait. C'est le principe du *Jardin des Hasards*. En transposant, on peut imaginer alimenter la même plate-forme informatique de données décrivant par exemple les évolutions de la bourse ou l'activité d'un réseau, qu'il soit informatique, routier ou encore social. En construisant, de chacun de ces systèmes, une représentation ambiante, un utilisateur pourra en retirer une perception immédiate de la « météorologie » du système représenté, lui permettant de savoir intuitivement à chaque instant si tout va bien, ou si quelque chose d'anormal est arrivé. Tant que la météorologie est bonne, l'utilisateur peut se consacrer à d'autres tâches, la représentation ambiante proposée ne nécessitant qu'une attention réduite. En revanche, lorsque le temps se couvre, il aura alors la possibilité de choisir des modes de représentation moins abstraits, offrant une vision hiérarchisée du fonctionnement du système. Pour ce faire, agents-plantes et agents-animaux font place à des agents qui organisent par exemple les actions d'un portefeuille en fonction de leurs performances, ou qui regroupent et organisent les alarmes de fonctionnement d'un réseau en fonction de leur gravité. En alternant des représentations correspondant à différents niveaux

[7] « En extrapolant ce que propose l'art interactif, on peut facilement imaginer de prendre en compte l'influence de la météorologie, de l'heure de la journée, de la bourse, des résultats sportifs, des élections ou encore des entrées de cinéma. » (traduction personnelle)

d'abstraction, l'utilisateur pourra obtenir une compréhension fine du fonctionnement ou des dysfonctionnements d'un système.

La thématique principale du travail présenté dans cette thèse concerne donc la ***représentation*• *en temps réel de systèmes complexes*•*, sous forme visuelle et sonore***, et plus généralement l'étude de ***l'interaction entre un utilisateur humain et un système complexe, réel ou virtuel***. On peut dire, en première approximation, que représenter un système, c'est permettre à un utilisateur de s'en construire une représentation mentale•. Pour ce faire, trois opérations sont nécessaires : mesurer le fonctionnement du système par un ensemble de données numériques, filtrer et organiser ces données, et enfin en construire une représentation sensible à destination de l'utilisateur (voir figure 2). Notre recherche a englobé ces trois aspects, mais nous nous sommes plus particulièrement intéressés à ***l'utilisation de systèmes multi-agents*• *pour filtrer et réorganiser dynamiquement l'information décrivant le système à représenter.***

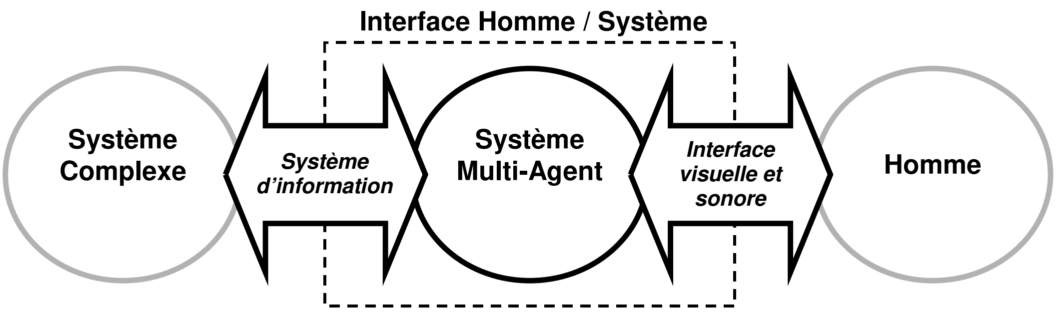


figure 2 - Interface Homme / Système Complexe.

On peut faire correspondre la représentation• des systèmes complexes à trois problématiques principales : dans une première problématique, l'objectif est d'obtenir en permanence une image du système qui en traduise l'état courant, de manière à ***contrôler*•** son bon fonctionnement et à pouvoir le ***commander*•** en cas de besoin ; dans une seconde problématique, l'objectif est de rendre perceptibles les processus à l'œuvre au sein du système, de manière à pouvoir ***analyser*•** son fonctionnement, en vue d'améliorer sa conception ou de ***concevoir*•** des systèmes ayant les mêmes propriétés. Enfin, de par sa capacité à construire dynamiquement des mondes virtuels à la fois visuels et sonores, le système d'interface ainsi constitué possède, outre ses qualités pour la représentation de systèmes complexes, un très grand potentiel

artistique et ***didactique*•**. Outil pour les artistes, ceux-ci ont en retour un rôle important à jouer pour la construction de représentations sensibles, à la fois efficaces et expressives, de phénomènes complexes. La figure 3 montre la progression que nous suivrons dans la première moitié du document, qui constitue une longue introduction à la représentation des systèmes complexes, depuis la présentation des fondements artistiques et scientifiques du travail jusqu'à la présentation des outils développés.

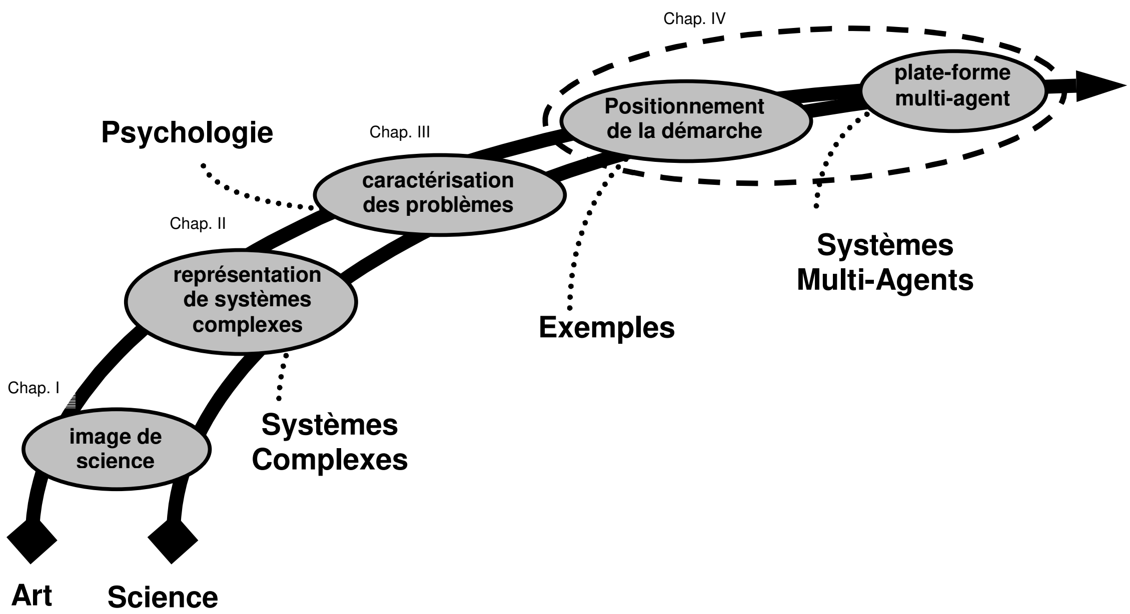


figure 3 – Progression de la réflexion dans la première moitié de la thèse.

Comme nous l'avons indiqué dans l'avertissement, notre démarche relève d'un processus en spirale, où les questionnements des uns répondent aux questionnements des autres, et où des réponses émergent parfois. Cet enrichissement s'est exprimé, dans le cadre de cette thèse, autour du projet d'art informatique intitulé *Le Jardin Des Hasards*, qui constitue lui-même le prolongement d'un projet antérieur, *Quel temps fait-il au CapLan ?,* tous deux imaginés par l'artiste multimédia Bernard Gortais. La figure 4 vise à exprimer sous forme graphique la progression en spirale qui caractérise cette collaboration. La figure présente la face informatique du processus, une spirale symétrique caractérisant la recherche de B. Gortais, coïncidant avec la nôtre selon l'axe artistique. Dans le même temps, la figure déroule le fil conducteur de la deuxième moitié du document, depuis la présentation des outils jusqu'à leur application et leur utilisation dans différents contextes, artistiques et industriels.

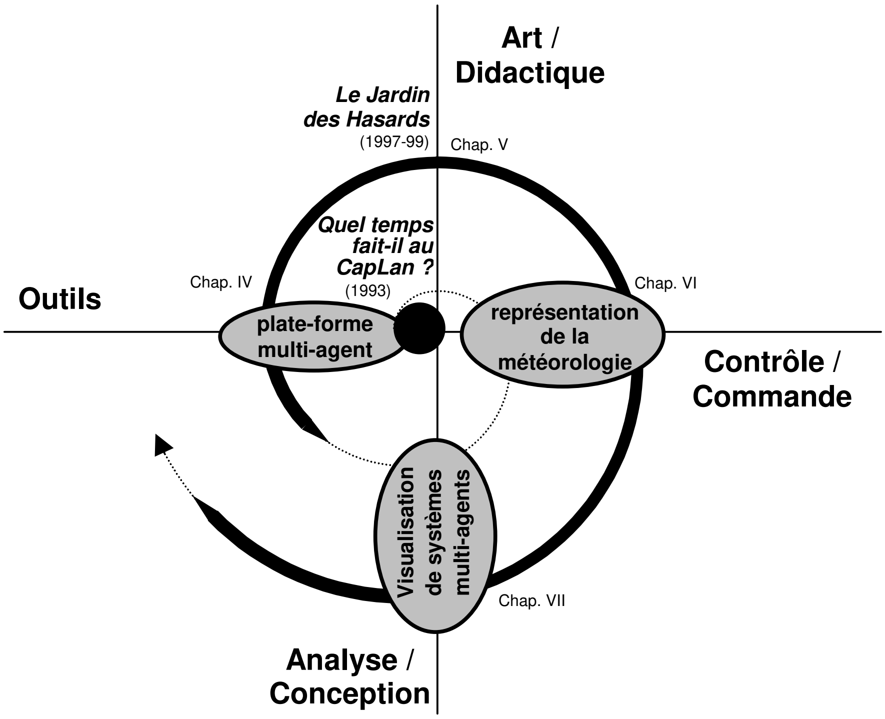


figure 4 - Processus de recherche en spirale (la figure se lit à partir du centre ; le trait plein et épais correspond à la durée de la thèse, les traits fins en pointillés, aux périodes la précédant et la suivant).

Les trois parties de la thèse correspondent approximativement aux questions « quoi ? », « comment ? » et « avec quels résultats ? ».

Quoi ? La première partie constitue une introduction au problème de la représentation de systèmes complexes. Nous présentons dans le premier chapitre le contexte général, scientifique et artistique, permettant de comprendre et de justifier notre démarche, tandis que le deuxième chapitre constitue une introduction plus spécifique aux systèmes complexes et à leur représentation, mettant en évidence la diversité des besoins associés. Enfin, nous proposons, dans le troisième chapitre, de répertorier ce qui rend la représentation de systèmes complexes particulièrement difficile, tant du fait du système lui-même que du fait de l'observateur.

Comment ? La deuxième partie aborde les solutions envisageables et envisagées pour répondre aux questions introduites dans la première partie. Dans le quatrième chapitre, nous essayons de faire le tour des solutions de représentations actuellement utilisées dans ce cadre, avant de proposer nos propres solutions en décrivant la plate-forme multi-agent que nous avons nous-mêmes développée pour aborder le problème.

Le projet artistique *Le Jardin Des Hasards*, réalisé grâce à cette plate-forme, est présenté dans le cinquième chapitre.

Avec quels résultats ? La troisième partie est consacrée à la présentation des résultats et leçons que nous avons pu retirer des développements présentés dans la partie précédente. Le projet artistique *Le Jardin Des Hasards* a servi de base à une étude de la représentation artistique de la météorologie, présentée au sixième chapitre. Enfin, nous présenterons au septième chapitre des éléments de réflexion et de solution pour la conception de représentations de systèmes multi-agents.

PREMIERE PARTIE

INTRODUCTION A LA REPRESENTATION DE SYSTEMES COMPLEXES

« Aujourd'hui le monde est messages, codes, informations. Quelle dissection demain disloquera nos objets pour les recomposer en un espace neuf ? Quelle nouvelle poupée russe en émergera ? »

F. Jacob

« On a toujours cherché des explications quand c'était [des] représentations qu'on pouvait seulement essayer d'inventer. »

P. Valéry

CHAPITRE I

DE L'OBSERVATION A LA REPRESENTATION

> *« Parmi les outils de la systémique, il est nécessaire de citer la représentation graphique, bien que celle-ci soit encore souvent considérée — de même que le recours à l'analogie — comme une forme accessoire de représentation, utile tout au plus à illustrer et compléter un texte ou un livre. »*
>
> *D. Durand [Durand 1998]*

Le rôle de l'observation pour la compréhension de systèmes complexes a souvent été souligné. Peu d'attention a cependant été accordée au fait de donner de ces systèmes une représentation sensible, de manière à faciliter cette observation et à la rendre plus efficace. Si cela restait impossible avant l'avènement de l'informatique en tant qu'outil de simulation de la complexité, cela reste encore aujourd'hui une problématique sous-estimée. En science en tout cas, car l'art pictural s'est pour sa part toujours intéressé à la représentation du monde, non pour en exécuter des copies parfaites, mais en cherchant au contraire à aller toujours au-delà des simples apparences, pour exprimer quelque chose de plus fondamental. « L'art ne reproduit pas le visible, disait P. Klee, il rend visible. » On peut rapprocher le passage de l'observation, moyen d'acquisition de connaissances, à la représentation, moyen de transmission de connaissances, du passage d'une attitude positiviste à une attitude constructiviste, et parallèlement celui d'une attitude scientifique à une attitude artistique. Passage qui permet en retour une amplification des moyens d'observation de la science. Un dialogue peut alors s'établir entre art et science, dialogue qui caractérise l'ensemble de notre travail. Il nous semble donc important de préciser le sens de notre démarche, en la replaçant dans un contexte plus général, à la fois scientifique, technologique et artistique.

I.1. IMAGINEZ…

« Un petit dessin vaut mieux qu'un long discours. »
Napoléon

Un petit exemple vaut mieux qu'un long discours, pourrait-on dire en paraphrasant Napoléon. Nous allons donc commencer par présenter rapidement, avec le *Jardin des Hasards*, un exemple qui illustre le sens de notre démarche. Auparavant, il est toutefois nécessaire de présenter la filiation de cette démarche, ce qui nous donne l'occasion d'évoquer le *Macroscope* et les *Mondes miroirs*. Donc, imaginez…

I.1.1. LE *MACROSCOPE*

« Aujourd'hui, nous sommes confrontés à un autre infini : l'infiniment complexe. Mais cette fois, plus d'instrument. Rien qu'un cerveau nu, une intelligence et une logique désarmés devant l'immense complexité de la vie et de la société. (…) Certes l'ordinateur est un instrument indispensable. Mais il n'est qu'un catalyseur. Pas encore cet outil dont nous avons tant besoin. (…) Cet outil, je l'appelle le macroscope. *»*
J. de Rosnay [de Rosnay 1975]

Avec le *macroscope*, J. de Rosnay appelait au développement d'une vision globale de la complexité [de Rosnay 1975], complexité que nous observons en spectateur, à l'œuvre dans chaque organisme vivant, mais à laquelle nous appartenons et participons également, à l'œuvre au sein de chaque organisation humaine. Constatant l'impuissance de l'approche rationaliste•, à l'honneur depuis Descartes, à rendre compte de manière satisfaisante de tels phénomènes complexes, l'approche systémique• étudie ces mêmes phénomènes d'un point de vue plus global. Cette démarche systémique, c'est le *macroscope* (voir figure I.1), par référence au microscope et au télescope avec lesquels le terme partage la même étymologie (*skopein*, observer). Mais contrairement à ces instruments, qui se contentent d'amplifier de manière passive l'image d'une réalité trop petite ou trop lointaine, le *macroscope* est conçu comme un outil d'étude et de compréhension de phénomènes trop abstraits et trop complexes pour être observés directement. Une organisation humaine, par exemple, n'a pas de réalité concrète, dans le sens où il n'est pas possible d'en obtenir une image d'ensemble. L'organisation est fondée par un réseau de relations entre des individus qui échangent de l'information, mais où ni le réseau ni l'information ne correspond à une réalité sensible. Plus qu'un instrument d'observation, le *macroscope* est donc plutôt un outil d'étude conceptuelle des systèmes complexes, « instrument symbolique, fait d'un ensemble de méthodes et de techniques » qui « filtre les détails, amplifie ce qui relie, fait ressortir ce qui rapproche » [de Rosnay 1975].

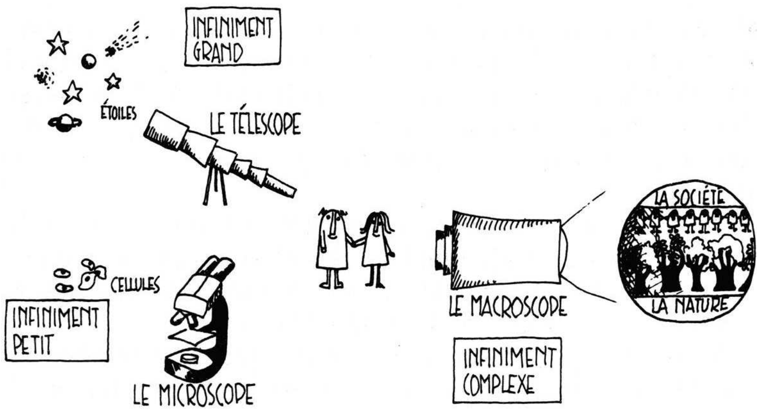


figure I.1 – Microscope, télescope, macroscope (reproduit de [de Rosnay 1975] p. 10).

On retrouve aujourd'hui des démarches voisines dans ce que certains appellent les sciences de la complexité, avec notamment les théories du chaos• [Gleick 1991] et de l'auto-organisation•. Grâce à ses capacités de simulation, l'ordinateur a cessé d'être un simple catalyseur pour devenir un véritable outil d'étude des systèmes complexes, l'ordinateur-*macroscope* [de Rosnay 1995]. Les domaines de la vie artificielle• et des systèmes multi-agents• jouent un rôle moteur dans le développement de ces nouvelles sciences, permettant non seulement d'élaborer des modèles descriptifs de phénomènes complexes, mais également de reconstruire ces phénomènes pour mieux les comprendre, réalisant ainsi la synthèse des approches analytiques et systémiques. Alors que ces techniques, en reconstruisant les phénomènes, offrent la possibilité de les observer, de les visualiser, la question de la construction de représentations sensibles permettant de mettre en évidence, sous une forme perceptible, la dynamique de systèmes complexes, a été relativement négligée. Soit le système est directement observable, un automate cellulaire• par exemple, auquel cas la question ne se pose pas ; soit il ne l'est pas, c'est le cas des algorithmes génétiques•, et la question n'est pas posée.

« Pour comprendre le monde, il faut le construire. »

C. Pavese

Le simple fait de pouvoir construire, à partir d'un phénomène réel, un modèle computationnel•, c'est-à-dire un modèle que l'on puisse simuler à l'aide de l'ordinateur, constitue un moyen très puissant de connaissance. Il nous semble cependant que cela ne devrait pas exclure une réflexion en profondeur concernant les moyens de représentation de tels systèmes complexes. L'image peut faciliter la compréhension de leur fonctionnement, mais elle peut également permettre la validation du modèle construit par comparaison avec le phénomène réel, ou encore mettre en évidence certaines propriétés émergentes de ces systèmes, qui ne sont pas décrites de manière explicite dans le modèle. La nécessité de moyens de représentation adéquats est bien entendu d'autant plus forte que le modèle est destiné à un utilisateur qui n'a pas lui-même cette expérience de construction du modèle pour interpréter les images qu'il reçoit. Alors, imaginez…

I.1.2. LES *MONDES MIROIRS*

> *"Mirror Worlds ? What are they ? They are software models of some chunk of reality, some piece of the* real world *going on outside your window. Oceans of information pour endlessly into the model (…): so much information that* the model *can mimic* the reality's *every move, moment-by-moment."*[8]
>
> *D. Gelernter [Gelernter 1992]*

Imaginez un hôpital qui possède des dossiers informatisés sur chaque patient, médecin, lit, chambre, ainsi qu'un suivi d'entités importantes mais plus abstraites telles que fond de roulement, médicaments en commande, etc. Des capteurs répartis dans tout l'hôpital enregistrent chaque mouvement de patients, chaque opération programmée, chaque rendez-vous, etc. L'état courant de l'organisation est présenté sous la forme d'une image complexe en évolution permanente, que l'on peut explorer par l'intermédiaire d'un écran d'ordinateur, de manière superficielle ou plus profonde. La description est fournie par D. Gelernter comme un exemple de ce que pourraient être ce qu'il appelle des *mondes miroirs* [Gelernter 1992], c'est-à-dire des copies informatiques de morceaux du monde réel, un hôpital par exemple, reproduisant en permanence de manière virtuelle, comme en miroir, chacune des évolutions de ce morceau de réalité. Un grand nombre de tels *mondes miroirs* existent désormais, à un détail près cependant : si l'informatisation progressive de pans entiers de nos activités

[8] « Les mondes miroirs ? Que sont-ils ? Ce sont des modèles logiciels d'un morceau de réalité, une partie du *monde réel* qui se joue derrière votre fenêtre. Des océans d'information s'écoulent sans fin dans le modèle (…) : tellement d'information que *le modèle* peut imiter chaque évolution de *la réalité*, minute par minute. » (traduction personnelle)

quotidiennes permet effectivement de récupérer des flux énormes d'information décrivant, dans leurs moindres aspects, l'évolution d'organisations humaines, voire de la société dans son ensemble, les outils manquent encore pour exploiter efficacement de telles masses de données et en présenter une vue synthétique et cohérente, ce que D. Gelernter désigne par le terme de *topsight*[9].

Le problème de la collecte des informations était un problème purement technique, il a donc été résolu de manière simple, par l'informatisation de tous les aspects du monde réel à reproduire dans le *monde miroir*. De fait, l'utilisation d'Internet ou d'un téléphone portable laisse des traces, généralement à notre insu, qui sont enregistrées dans un ou plusieurs *monde miroir*. Le problème de la construction de représentations intelligibles de ces ensembles de traces est quant à lui autrement plus difficile, et ce pour au moins deux raisons. La première en est que ces traces constituent le reflet de systèmes d'une complexité énorme, pour lesquels on ne dispose pas forcément de modèles adéquats. La vie artificielle et les systèmes multi-agents déjà évoqués permettent cependant, dans un grand nombre de cas, de construire des modèles qui reproduisent les phénomènes, même très complexes. La deuxième raison, sans doute la plus fondamentale, est que de telles représentations s'adressent à des observateurs humains, eux-mêmes d'une complexité gigantesque, mais aux capacités cognitives nécessairement limitées. En supposant que l'on dispose d'un modèle de la réalité observée, il reste donc encore à transformer ce modèle en image intelligible, c'est-à-dire adaptée aux capacités perceptives et cognitives d'utilisateurs ayant chacun des cultures, des connaissances, des états d'esprit différents.

> *« J'entends et j'oublie*
> *Je vois et je me souviens*
> *Je fais et je comprends. »*
>
> *Confucius*

Les capacités d'interaction associées à de tels mondes virtuels donnent la possibilité à l'utilisateur d'explorer cette complexité, en choisissant différents points de vue ou différentes échelles de visualisation. Les vertus explicatives des images générées par la machine s'en trouvent ainsi sensiblement améliorées. Cependant, de même que la construction d'un modèle ne permet pas à elle seule de tout comprendre des propriétés du phénomène, de même l'interaction avec un système complexe ou la

---

[9] Vision de haut, c'est-à-dire compréhension globale, par référence à l'*insight*, vision de l'intérieur, c'est-à-dire compréhension interne d'un mécanisme.

navigation à l'intérieur de ce système, risque de ne présenter qu'un intérêt limité si elle ne s'appuie pas sur une visualisation appropriée.

En résumé, pour atteindre l'objectif, qui est de fournir aux utilisateurs de tels systèmes une vision globale de la réalité permettant d'en comprendre le fonctionnement, il n'est pas suffisant de collecter de l'information dans le but de reproduire cette réalité avec le maximum de détails et de réalisme. Contrairement au microscope ou au télescope, les *mondes miroirs* ne peuvent pas se contenter de n'être qu'une réplique aussi fidèle que possible du phénomène observé. On n'y gagnerait aucune compréhension nouvelle par rapport au phénomène lui-même puisque celui-ci n'est ni trop petit ni trop éloigné mais trop abstrait et trop complexe. On ne peut voir d'un hôpital que les bâtiments, ou certains membres du personnel, ou des médicaments mais sans pouvoir en saisir l'organisation logique ni le fonctionnement réel. Par ailleurs, l'esprit humain a des capacités trop limitées pour pouvoir appréhender, dans son ensemble et dans ses moindres détails, une organisation d'une aussi grande complexité. Avec un modèle aussi complexe que le phénomène réel, organisé et présenté exactement de la même manière, on se contente de dupliquer la complexité, on ne la rend pas plus intelligible. Alors que l'un des problèmes majeurs de la société de l'information en cours de construction promet d'être lié à une surcharge informationnelle des utilisateurs [Maes 1994], la duplication de cette information ne semble pas être une réponse adaptée…

Deux éléments sont donc nécessaires : d'une part un outil permettant de filtrer et de réorganiser dynamiquement le flux d'information reçu ; d'autre part un outil transcrivant cette information sous une forme directement perceptible, c'est-à-dire qui en exprime les aspects les plus importants et mette en évidence les relations existant entre les différents éléments. Il n'est pas suffisant de construire un modèle de la réalité, il faut rendre celui-ci perceptible et compréhensible. Les *mondes miroirs*, aussi bien que l'*ordinateur-macroscope*, peuvent donc être utilisés pour construire des modèles de la réalité, afin de rendre cette réalité intelligible, mais à condition de réfléchir aux moyens utilisés pour transcrire le modèle du système en représentation sensible. Maintenant, imaginez…

I.1.3. LE *JARDIN DES HASARDS*

Imaginez un jardin virtuel dont les aspects visuels et sonores changent continuellement de manière à figurer l'écoulement du temps chronologique et l'évolution du temps météorologique d'un lieu distant. En regardant l'image, ou simplement en écoutant le rythme musical, vous avez l'impression d'être transporté dans ce lieu, et l'écran d'ordinateur devient la fenêtre qui donne sur votre jardin. "*Hmm, le temps tourne à l'orage, mieux vaut rester à l'abri.*" Connecté en temps réel à des données météorologiques en provenance de n'importe quel point du globe, l'image fonctionne réellement comme une fenêtre ouverte sur une réalité distante. Cette fenêtre existe et s'appelle *Le Jardin des Hasards* (voir figure I.2) [Hutzler et al. 1997a ; Hutzler et al. 2000]. Imaginé par Bernard Gortais, il s'agit d'un projet artistique que nous avons développé conjointement et qui constitue désormais le support d'une partie de ses recherches artistiques en même temps que celui de nos propres recherches (la description technique du système informatique est donnée au chapitre IV, et le projet artistique est détaillé au chapitre V ; les recherches auxquelles le projet a servis de support sont décrites dans la troisième partie).

figure I.2 – Un aspect du *Jardin des Hasards* à l'automne.

Le *Jardin des Hasards* peut être considéré comme un système de représentation de plusieurs systèmes complexes : un système réel, celui de la météorologie ; un système simulé, le jardin artificiel qui se développe plus ou moins bien en fonction des conditions météorologiques changeantes ; enfin, le concepteur et le spectateur du jardin modifient son aspect, le premier en lui donnant sa forme initiale, le second en le « cultivant », semant des graines ou coupant des branches, ajoutant de l'eau ou de l'engrais, etc. Nous verrons par la suite que l'interaction du programme avec ces trois types de systèmes (la météo réelle, le jardin simulé, le spectateur) peut être mise en parallèle avec les trois problématiques que nous avons identifiées quant à la représentation de systèmes complexes. La visualisation des conditions météorologiques correspond à une démarche de contrôle, c'est-à-dire de perception de l'état du système en vue de prendre des décisions appropriées par rapport à cet état. La visualisation du jardin virtuel correspond à une problématique d'analyse, c'est-à-dire de compréhension du fonctionnement du système, soit dans une démarche scientifique, soit en vue de concevoir des systèmes présentant des propriétés analogues. Enfin, l'interaction avec l'utilisateur correspond à une démarche didactique, visant à rendre les concepts en jeu manipulables et compréhensibles par le plus grand nombre de personnes.

I.2. QUELQUES REPERES

Après ces quelques exemples, il nous semble important d'élargir le champ de la réflexion et d'introduire rapidement les traditions scientifiques aussi bien qu'artistiques sur lesquelles ce travail se fonde. Cela nous permettra de légitimer a priori le choix d'une démarche en partie artistique pour s'intéresser « scientifiquement » à des questions de représentation. Par ailleurs, nous croyons utile de préciser dès maintenant le statut que nous souhaitons accorder aux connaissances qui pourront être produites et transmises par la création de systèmes de représentation.

I.2.1. EPISTEMOLOGIES POSITIVISTES ET CONSTRUCTIVISTES

> *« (l'épistémologie peut se définir) en première approximation comme l'étude de la constitution des connaissances valables. »*
>
> *J. Piaget*

Nous n'avons pas l'intention de nous engager dans un débat épistémologique•, forcément polémique. Cependant, dans la mesure où notre problématique centrale concerne la construction de représentations sensibles de certains aspects de la réalité, il nous semble opportun de préciser la valeur que nous attribuons à ce type de représentations, en nous positionnant par rapport aux deux principaux courants épistémologiques actuels, dont il est utile de rappeler les hypothèses et méthodologies.

L'épistémologie positiviste•, dont on peut faire remonter l'origine à Platon, et surtout à Descartes, se base sur les hypothèses « ontologique » et « déterministe » [Le Moigne 1999]. La première postule que la Réalité existe de manière permanente, indépendante et antérieure à d'éventuels observateurs qui voudraient la connaître et la décrire [Marx et Engels 1968]. L'hypothèse déterministe postule quant à elle que cette Réalité obéit à une détermination interne qui se traduit par un causalisme, chaque effet étant le produit d'une cause antérieure. L'objet de la science est ainsi de découvrir les lois qui gouvernent la Réalité et son évolution grâce aux principes de la « modélisation analytique » et de la « raison suffisante ». Le premier de ces principes appelle à la décomposition des « difficultés (…) en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour mieux les résoudre » (Descartes). Le principe de raison suffisante indique pour sa part que « rien n'arrive jamais sans qu'il y ait une cause ou du moins une raison déterminante » (Leibniz).

L'épistémologie constructiviste• se démarque assez largement de la conception positiviste, se fondant sur les hypothèses « phénoménologique » et « téléologique ». La première hypothèse pose que « le réel connaissable est un réel en activité qu'expérimente le sujet, et que ce sujet se construit, par des représentations symboliques (…), cette connaissance de son expérience du réel » [Le Moigne 1999]. Autrement dit, indépendamment de l'existence ou non d'une réalité indépendante de l'observateur, l'hypothèse phénoménologique souligne l'impossibilité pour le sujet de connaître cette réalité autrement que par l'intermédiaire de représentations qu'il s'en construit. A partir du moment où la connaissance résulte d'une construction, donc d'une interprétation, il est inévitable que cette interprétation s'effectue en rapport avec une intentionnalité ou une finalité, autrement dit un but, de la part du sujet connaissant. C'est ce qu'exprime l'hypothèse téléologique. Sur la base de ces hypothèses, l'objet de la science n'est plus de découvrir les lois qui gouvernent le monde réel, mais plutôt de construire des modèles qui rendent compte de son évolution. C'est l'objet notamment de la modélisation systémique [Durand 1998], qui étudie les systèmes dans leur globalité, et s'intéresse pour ce faire à leurs propriétés fonctionnelles plus qu'à leur composition [Simon 1991]. Enfin, au principe de raison suffisante correspond, pour l'épistémologie constructiviste, le principe « d'action intelligente » qui indique que la raison humaine, en réponse à la perception d'un écart entre les comportements et les buts du sujet, est parfois capable d'inventer des réponses sous forme « d'actions intelligentes » [Le Moigne 1999], en vue de réduire cet écart. Autrement dit, sur la base de ses expériences antérieures, le sujet est capable d'élaborer des heuristiques• lui permettant de choisir les actions adaptées pour atteindre son but, ou en tout cas s'en rapprocher.

Cet exposé est naturellement bien trop court pour exprimer la richesse de chacune des deux positions, exposé que nous avons par ailleurs essayer de rendre le plus neutre possible. Il n'aura cependant pas échappé au lecteur attentif que nous adoptons, pour notre part, une démarche qui s'apparente à la démarche constructiviste, bien que s'en démarquant sur certains points comme nous le verrons par la suite. Nous avons discuté, avec le *macroscope* et les *mondes miroirs*, de deux paradigmes de connaissance des systèmes complexes, mettant respectivement en avant la construction et l'action comme modes de connaissance privilégiés du monde réel. Le macroscope s'intéresse à l'acquisition de cette connaissance par la construction de modèles que l'on peut ensuite simuler ; les mondes miroirs s'y intéressent par l'action d'exploration d'un modèle. Il s'agit dans les deux cas de permettre à l'utilisateur de se construire une représentation mentale• d'un phénomène complexe à partir d'une représentation computationnelle•. Dans les deux cas également, cette construction passe nécessairement par un troisième type de représentation, une représentation sensible. De même que les représentations computationnelle et cognitive que nous venons d'évoquer sont des constructions, de même cette représentation sensible•, que l'on considère généralement comme donnée, nous pensons qu'il peut être également utile, voire nécessaire, de la construire. Comme nous le rappelle G. Bachelard, « rien n'est donné, tout est construit ».

A cet effet, il est sans doute enrichissant de s'intéresser à l'imagerie produite par la science pour rendre compte des concepts qu'elle manipule, mais également à l'art pictural, dans son soucis de produire des représentations sensibles de réalités parfois concrètes (portraits, paysages, natures-mortes, etc.), parfois abstraites et insaisissables (sentiments, émotions, atmosphères, etc.)

I.2.2. L'IMAGERIE SCIENTIFIQUE

L'imagerie scientifique, c'est-à-dire l'utilisation de moyens graphiques pour traduire les résultats d'investigations scientifiques sous une forme facilement compréhensible, est probablement aussi ancienne que la science elle-même. Nous proposons ici quelques repères de cette histoire, qui trouve aujourd'hui son apogée avec la visualisation scientifique, instituant cette imagerie en tant que champ de recherche autonome.

I.2.2.1. Quelques repères

Depuis l'Antiquité déjà, et jusqu'à la Renaissance, la tradition des *Arts de la mémoire* s'est attachée à développer des moyens de représentation permettant une mémorisation aisée de grandes quantités d'information [Codognet 1996]. Pour ce faire, l'idée est d'établir une correspondance entre la mémoire du sujet et une structure architecturale imaginaire, mais dont l'organisation générale est familière, et de disposer dans cet espace des images faisant référence aux choses à retenir. En parcourant mentalement l'architecture imaginaire, le sujet a alors la possibilité de se remémorer ces choses et leurs relations ou leur séquence.

Plus près de nous, l'apparition de l'imprimerie a favorisé, dès le début du XVIème siècle, la production et la distribution de livres illustrés, alors qu'une vision appliquée et technique de la science se substituait à la vision théorique, voire idéologique, qui prévalait jusque-là. Les carnets de L. de Vinci [de Vinci 1987] ne constituent qu'un exemple parmi d'autres, que l'on peut relever dans des domaines divers : anatomie, architecture, mécanique, hydraulique, etc. Le but est cette fois-ci de produire des représentations pédagogiques par des diagrammes qui explicitent les principes de phénomènes naturels (écoulement de liquides, trajectoire de rayons lumineux, etc.), qui détaillent les aspects extérieurs de plantes et d'animaux ou les mécanismes internes de machines ou de corps humains, ou encore qui présentent le déroulement d'une expérience. Le scientifique a alors la responsabilité de traduire sous forme graphique le résultat de son travail, ce qui fait de lui, sinon un artiste, du moins un dessinateur.

Le développement de la photographie a porté un coup fatal aux talents graphiques des scientifiques (c'est maintenant aux artistes qu'il faut faire appel pour la réalisation de dessins scientifiques), mais pas à l'imagerie scientifique, bien au contraire. Couplée à des techniques d'imagerie toujours plus précises et plus puissantes, et dans un contexte de diffusion généralisée de l'information, l'image de science est devenue omniprésente dans notre civilisation occidentale, depuis l'image du fœtus dans le ventre de sa mère jusqu'aux images de la météorologie quotidienne. Enfin, avec le développement des techniques de simulation informatique, se produit un dernier glissement. A nouveau, c'est au scientifique lui-même qu'il revient de construire, par l'intermédiaire de l'ordinateur, les images de son travail. L'ordinateur produit en effet des flots de nombres, qui ne sont pas exploitables en tant que tels et qu'il est donc nécessaire de transformer en images. Cette question est elle-même devenue un champ de recherche autonome en 1986 [Pickover et Tewksbury 1994], celui de la *visualisation du calcul scientifique* (Visualization in Scientific Computing), dans lequel les artistes ont plus que jamais un rôle à jouer [Colonna 1994 ; Cox 1988 ; Wright 1994].

I.2.2.2. La visualisation du calcul scientifique

> *"Visualization is a method of computing. It transforms the symbolic into the geometric, enabling researchers to observe their simulations and computations. Visualization offers a method for seeing the unseen. It enriches the process of scientific discovery and fosters profound and unexpected insights. In many fields it is already revolutionizing the way scientists do science."*[10]
>
> *B. McCormick, T DeFanti, M. Brown [McCormick et al. 1987]*

L'*ordinateur-macroscope* [de Rosnay 1995] permet d'étudier le monde en le simulant, c'est-à-dire en le modélisant et en faisant « vivre » ce modèle par un calcul informatique. Le résultat du calcul, une immense suite de nombres, n'est accessible que pour l'ordinateur lui-même. Or, comme le rappelle R. Hamming, « le but du calcul [scientifique] est la compréhension, pas les nombres. »[11]. Pour rendre le calcul compréhensible, il est donc nécessaire de le rendre visible par une transformation « appropriée », tout le problème étant précisément de trouver la bonne transformation. Comme nous l'avons souligné à propos des *mondes miroirs*, rendre visible n'est pas suffisant ; encore faut-il que la représentation mette en évidence les aspects les plus importants du calcul, sachant qu'il est souvent difficile de savoir a priori quels aspects seront les plus importants.

Tout l'art de la visualisation consiste donc à trouver la transformation la meilleure entre les données générées par le calcul d'une part, et une image ou une suite d'images d'autre part, elles-mêmes générées par des matrices de nombres. « La visualisation est le processus de transformation d'information en une forme visuelle, permettant à un utilisateur d'observer l'information » [Gershon 1994]. Concrètement, les techniques de visualisation seront utilisées pour explorer ou exploiter un ensemble de données, pour appréhender de manière plus fine des concepts ou des processus, pour contrôler la qualité de simulations ou de mesures, ou encore comme moyen de communication et de collaboration. Pour ce faire, le but n'est pas d'obtenir des images qui soient belles ou réalistes mais des images qui soient porteuses de sens, c'est-à-dire dont l'analyse révèle le contenu informatif, en permettant de repérer certaines des données parmi l'ensemble, de les catégoriser en différents groupes, de les trier, de les associer à distance dans le temps, d'établir des corrélation entre elles, etc.

---

[10] « La visualisation est une méthode de calcul. Elle transforme le symbolique en géométrique, permettant aux chercheurs d'observer leurs simulations et leurs calculs. La visualisation offre une méthode pour voir l'invisible. Elle enrichit le processus de la découverte scientifique et favorise des compréhensions profondes et imprévues. Dans de nombreux domaines, elle est déjà en train de révolutionner la pratique scientifique. » (traduction personnelle)

[11] "The purpose of [scientific] computing is insight, not numbers".

Dans cette recherche de la « bonne transformation », le scientifique, qui connaît le modèle, a besoin des ergonomes ou des artistes, qui connaissent les propriétés des images et de leur perception par un observateur ; non pour donner une forme esthétique au calcul, dans le but de renforcer son pouvoir de séduction (voir [Bajuk 1995] pour une discussion de ce sujet), mais plutôt pour renforcer son pouvoir de compréhension [Domik 1991]. Des images fractales par exemple, le grand public ne retient que leur aspect esthétique, voire artistique [Mandelbrot 1983]. Certains mathématiciens se défendent pourtant de faire de l'art, comme A. Douady : « ce n'est quand même pas ma faute si je travaille dans un pays où il fait beau ! » [Sicard 1995]. Le « rôle » de l'artiste n'est donc pas de rendre beau mais de rendre intelligible. Dans certains cas, le simple fait de modifier la palette de couleurs utilisée pour l'affichage peut suffire à rendre visibles des phénomènes qui restaient jusqu'alors imperceptibles [Colonna 1994 ; Cox 1988]. Par sa connaissance des couleurs et de leurs contrastes, mais également par sa sensibilité et son intuition, l'artiste peut proposer des solutions de visualisation plus efficaces. De manière plus générale, la longue tradition des arts de la représentation dans la recherche de moyens sensibles pour « rendre visible » une réalité cachée, constitue une importante source d'inspiration pour la visualisation scientifique qui, elle aussi, cherche à rendre visible.

I.2.3. LES ARTS DE LA REPRESENTATION

> *« Dès l'enfance, les hommes ont, inscrites dans leur nature, à la fois une tendance à représenter (…) et une tendance à trouver du plaisir aux représentations. »*
>
> *Aristote, Poïétique, 4b5*

Par « arts de la représentation », il faut comprendre arts « dont les éléments sensibles ne sont pas seulement organisés en forme primaire, uniquement plastique, mais doivent être interprétés en plus comme voulant dire quelque chose d'autre » [Souriau 1990]. Nous faisons donc la différence entre *représentatif* et *figuratif*, une œuvre représentative pouvant prendre au choix une forme figurative, par laquelle les objets sont montrés picturalement « tels qu'ils sont » [Malévitch 1994], ou une forme non figurative, abstraite, « évoquant des éléments perceptifs, affectifs, intellectuels, isolés de leur objet originel et considérés à part » [Souriau 1990].

I.2.3.1. Quelques repères

Pour rendre une certaine réalité accessible à la compréhension, il est souvent utile de s'éloigner d'une reproduction parfaite de cette réalité. Les artistes ont parfaitement compris ce paradoxe apparent. Il a été abordé d'un point de vue philosophique par deux approches différentes, complémentaires plutôt qu'opposées : une conception « scientifique » d'une part, prétendument objectif, incarné par Platon puis Hegel ; une conception subjectiviste d'autre part, qui admet la subjectivité du sujet, peintre ou spectateur, incarné par Aristote puis Kant (voir [Cauquelin 1998] ou [Lacoste 1998] pour une présentation détaillée des principales approches philosophiques et théoriques de l'art).

Dans l'Antiquité, la pratique picturale est fondée par la *mimêsis*, c'est-à-dire l'imitation. Platon est très critique vis-à-vis de la reproduction de l'apparence de la réalité sensible, c'est-à-dire l'art du trompe-l'œil puisqu'il considère que ces apparences sont elles-mêmes trompeuses (c'est le célèbre mythe de la caverne[12] [Platon 1966], voir aussi [Maturana et Varela 1994] pour une présentation actuelle de la question). Copier la réalité sensible, c'est donc s'éloigner encore un peu de la vérité, et il est important pour Platon de revenir à l'essence des choses, à l'Idée de la chose, autrement dit adopter une attitude « scientifique ». Ce qui doit être représenté n'est pas la chose mais son modèle « idéalisé ». A défaut de pouvoir atteindre ce modèle idéalisé, il est possible d'utiliser un modèle construit, ainsi que nous le montrent les *mondes miroirs* qui ne représentent pas directement le monde réel et peuvent seulement représenter de manière indirecte un modèle de ce monde. Il ne sert à rien de reproduire l'image des bâtiments d'un hôpital, on n'y gagne aucune compréhension quant à son fonctionnement interne. De même pour Hegel, l'art du trompe-l'œil est une « occupation oiseuse et superflue, (…) un jeu présomptueux dont les résultats restent toujours inférieurs à la nature ». D'autant qu'à la conception immuable et éternelle du monde qui prévalait dans l'Antiquité s'est substituée une vision dialectique, traduisant selon Hegel, « le mouvement éternel de la lutte des contraires ». Le rôle de l'art étant de dévoiler le réel, celui de l'artiste devient de dévoiler non plus le produit mais la genèse, non plus la chose mais le processus. Ce qui fait dire au philosophe Novalis

[12] Allégorie décrite par Platon dans [Platon 1966] pour convaincre du caractère trompeur des sens : des prisonniers sont maintenus dans une caverne, face à une paroi, par des chaînes qui leur interdisent de tourner la tête. La scène est éclairée par un feu qui se trouve derrière eux, et dont la lumière se projette sur le mur. Les prisonniers ne voient donc du monde que les ombres, projetées sur le mur, provenant de personnages qui passent entre eux et le feu. Ne voyant rien d'autre que ces ombres, ils les considèrent comme étant la réalité.

que le poète « comprend mieux la nature que l'homme de science » et à Rimbaud plus tard qu'il est le « suprême Savant ». Ce point de vue romantique est ainsi résumé par E. Cassirer : « c'est dans la création, non dans l'imitation, qu'on atteindra la "vérité" de la nature, car la nature elle-même, dans son sens le plus profond, n'est pas la totalité des créatures, mais la force créatrice d'où jaillit la forme et l'ordre de l'univers. » Point de vue que ne renieraient pas aujourd'hui les sciences de la complexité qui, plutôt que de décrire les phénomènes d'une manière globale par un ensemble de règles fixes, s'attachent à les re-créer, à les re-construire, en simulant la dynamique de chacune des créatures composant le phénomène.

Cette première attitude, qui se concrétise aujourd'hui par la représentation sensible de modèles construits de la réalité, est restée largement théorique dans l'histoire de l'art. De manière parallèle s'est donc développé, d'abord avec Aristote puis avec Kant, un subjectivisme qui s'intéresse de manière plus pratique à la production d'œuvres et à leur perception, et donc à la subjectivité qui y est associée. Aristote envisageait ainsi la *mimêsis* sous l'angle de la *vraisemblance* plutôt que sous celui de la *vérité*, ce qui l'amène à considérer favorablement d'éventuels écarts par rapport au modèle. « Rendre l'imitation plus intelligible que la nature, en supprimant les détails » disait Stendhal. On peut ainsi rapprocher le *Macroscope*, qui *filtre*, *amplifie*, *fait ressortir*, d'un caricaturiste qui, en modifiant et réorganisant les éléments d'un visage, en fait mieux ressortir les caractères dominants et la structure. Autrement dit, l'artiste s'autorise à tricher, à mentir, à déformer, si cela peut lui permettre d'exprimer avec plus de force la véritable nature de la réalité représentée. « L'art est le mensonge qui nous fait réaliser la vérité » (P. Picasso). Enfin, l'attention se tourne, avec Kant, vers le spectateur et le jugement qu'il porte sur l'œuvre, forcément subjectif.

Cette vision annonce donc un glissement de la pratique artistique, d'une démarche de représentation du monde vers une démarche de communication avec le spectateur. « L'art est une activité qui permet à l'homme d'agir sciemment sur ses semblables au moyen de certains signes extérieurs afin de faire naître en eux, ou de faire revivre, les sentiments qu'il a éprouvés » (L. N. Tolstoï). Plus qu'un instrument pour créer des représentations porteuses d'une hypothétique valeur de vérité, l'art devient donc un outil permettant à l'artiste de communiquer avec celui qui reçoit son œuvre. « Un tableau ne vit que par celui qui le regarde » (P. Picasso). Ce glissement, amorcé à la fin du XIX^{ème} siècle, se retrouve dans l'art du début du XX^{ème} siècle à travers différents mouvements [Souriau 1990] : l'impressionnisme qui vise à transmettre des impressions, une atmosphère lumineuse ; le cubisme qui cherche à exprimer l'essence des choses en faisant appel aux capacités cognitives du spectateur, en « mêlant aux différentes sensations (…) suscitées par l'objet, le souvenir et sa connaissance intellectuelle » [Souriau 1990], annonçant en cela les recherches les plus récentes de la psychologie de la perception ; le futurisme qui s'intéresse à la *vie de la matière* et à ses propriétés de mouvement, d'énergie, de force, de continuité, exprimées par le principe du *dynamisme plastique* [Malévitch 1994]. La liste pourrait être encore longue et nous n'avons cité ici que les principaux mouvements.

Dans le même temps, constater que certains artistes ont abandonné la figuration pour l'abstraction comme moyen de représentation (voir [Bonfand 1995] ou [Malévitch 1994]) n'est sans doute pas le moindre des paradoxes. Il disparaît si l'on a à l'esprit qu'il ne s'agit plus alors de représenter le monde physique mais celui des sentiments. Dès lors, il ne s'agit plus de reproduire l'aspect d'objets réels, mais d'arranger les unes par rapport aux autres des formes et des couleurs de manière à susciter certaines émotions pour celui qui les regarde. Là encore, plusieurs mouvements se sont développés qui incarnent cette démarche : le suprématisme qui s'intéresse aux relations et aux interdépendances entre forme et couleur [Malévitch 1994] ; le cubisme dit « synthétique » qui prolonge la démarche du cubisme mais qui abolit tout procédé d'imitation ; le constructivisme (à ne pas confondre avec l'épistémologie constructiviste) qui vise à « substituer aux "compositions" plastiques du passé qui agençaient (…) des formes empruntées aux apparences de la nature, des "constructions" rigoureuses d'éléments inventés par l'homme » [Souriau 1990], dans le but de dégager les structures de la réalité plutôt que ses apparences ; l'expressionnisme qui utilise la couleur comme moyen d'expression pour s'adresser à l'âme. « La couleur est la touche, l'œil est le marteau. L'âme est le piano aux cordes nombreuses. L'artiste est la main qui, *par l'usage convenable* de telle ou telle touche, met l'âme humaine en vibration » [Kandinsky 1989], ce que W. Kandinsky appelle le *principe de la nécessité intérieure*, et qu'il étend à l'utilisation de la forme. Les recherches picturales de Kandinsky seront ainsi motivées par l'élaboration du « mode d'emploi » de ce piano artistique.

La recherche artistique s'oriente donc au début du XX^{ème} siècle vers une conception « systémique » qui consiste, pour rendre perceptibles des sentiments ou une certaine réalité abstraite, à manipuler des systèmes de formes, de couleurs, de matériaux, etc. pour « construire » des œuvres. Il est révélateur de constater que, à la même époque, se sont développés en sociologie, en linguistique et en psychologie, des concepts qui donneront plus tard naissance au structuralisme [Piaget 1987], c'est-à-dire l'étude des systèmes du point de vue de leur structure• et de ses transformations. Cette approche a notamment été reprise par la psychologie de la forme (ou de la Gestalt•), forme entendue ici comme structure ou organisation perceptive. Dans le domaine de l'art, elle s'est traduite par un renouveau de l'analyse structurale qui étudie « l'agencement interne des systèmes figuratifs ainsi que leurs transformations » [Souriau 1990].

I.2.3.2. L'art intermédiaire

Il apparaît assez nettement une convergence, à la fois d'intérêt et de démarche, entre certaines pratiques artistiques nées au début de ce siècle et qui se sont propagées jusqu'à nos jours sous différentes formes, et la pratique scientifique structuraliste apparue à la même époque et que prolongent aujourd'hui l'approche systémique et les sciences de la complexité. Par les possibilités qu'ils offrent pour créer, manipuler, simuler toutes sortes de systèmes complexes, les systèmes multi-agents semblent pouvoir constituer un outil particulièrement puissant et souple pour faire le lien entre art et science, à la fois outil de simulation scientifique et outil de création artistique. Rien n'empêche dès lors d'envisager de riches interactions entre les deux domaines : la simulation scientifique peut servir de base à la création artistique, ce qui fonde ce que P. Quéau désigne comme l'*art intermédiaire* [Quéau 1989] ; l'art peut en retour contribuer à l'intelligibilité de simulations scientifiques, en faisant l'hypothèse de ce que J. Wagensberg appelle la *communicabilité de complexités inintelligibles* [Wagensberg 1997].

> *« Nous assistons à la fin d'un monde. L'art demain ne produira plus des "œuvres", mais quelque chose pour lequel nous manquons d'un nom. On créera non plus des objets mais des sortes de micro-univers, en perpétuelle évolution. Ces univers seront des tissus de changements ininterrompus, des réseaux mobiles de lignes, de surfaces, de formes, de forces en constante interaction. L'art des métamorphoses de l'univers fera bientôt son apparition dans le monde des métamorphoses de l'art. »*
>
> *P. Quéau [Quéau 1989]*

Ce nouvel art dont P. Quéau présente la théorie est *intermédiaire* au même titre que les mathématiques appartiennent pour Platon à un *monde intermédiaire*, « entre les réalités matérielles et les idées pures, entre le sensible et l'intelligible, (…) entre les Formes et la Matière » [Quéau 1989]. Les mathématiques en effet permettent de formaliser les Idées (au sens platonicien, c'est-à-dire ce qui constitue l'essence des choses), en même temps qu'elles sont susceptibles d'en fournir une image sensible. De même l'âme platonicienne constitue-t-elle une réalité intermédiaire entre le sensible et l'intelligible. L'*art intermédiaire* vise donc à établir une passerelle entre des modèles computationnels, mimant ou non une certaine réalité, et leur image sensible. Les sciences de la complexité et l'ordinateur remplacent ici les mathématiques platoniciennes pour donner une image symbolique (le modèle simulé) d'un monde complexe, image symbolique que l'artiste a ensuite pour charge de transformer en image sensible, celle-ci étant à son tour transformée en représentation mentale par l'âme (au sens platonicien) de l'observateur (voir figure I.3).

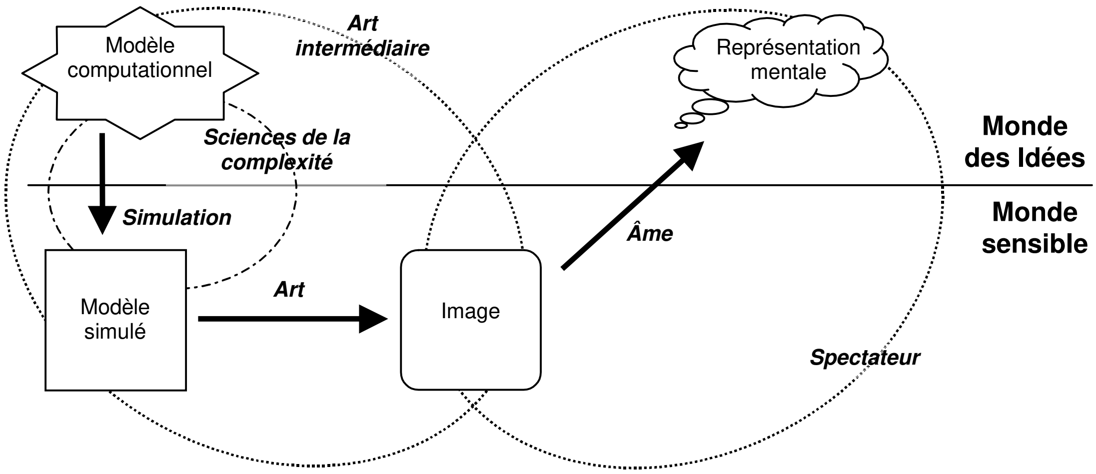


figure I.3 – L'*art intermédiaire* cherche à faire le lien entre une réalité intelligible (un modèle) et une réalité sensible (une image). Il fait appel pour cela aux sciences de la complexité, et également à toute les techniques de l'art (la figure correspond à l'interprétation que nous faisons de l'art intermédiaire tel qu'il est présenté dans [Quéau 1989]).

« Je considère l'art comme une forme de connaissance fondée sur le principe de communicabilité de connaissances non nécessairement intelligibles. »

J. Wagensberg [Wagensberg 1997]

Ce faisant, l'*art intermédiaire* satisfait à l'hypothèse de la communicabilité de complexités inintelligibles posée par J. Wagensberg [Wagensberg 1997]. Face aux principes d'objectivité (le sujet peut observer la complexité du monde de manière extérieure, indépendante et objective) et d'intelligibilité (la complexité du monde est compréhensible) posés par le positivisme, le principe de communicabilité pose comme hypothèse que l'artiste est susceptible de transmettre à d'autres personnes des complexités (des émotions par exemple) qui ne sont pas nécessairement intelligibles, c'est-à-dire dont on n'a pas forcément de modèle. On pourra objecter que l'*art intermédiaire* fonde sa pratique sur l'usage même de modèles. Il faut remarquer cependant que dans le cas de phénomènes complexes, ces modèles ne sont eux-mêmes pas forcément intelligibles. Le modèle abstrait du phénomène n'est pas directement intelligible dans la mesure où il contient le germe de phénomènes chaotiques ou émergents qui ne pourront se révéler que par la simulation. Le modèle simulé quant à lui n'est « visible », donc « intelligible », que de l'ordinateur lui-même. En tant que démarche artistique, l'*art intermédiaire* a donc besoin des sciences de la complexité. En retour, en faisant l'hypothèse d'une *communicabilité de complexités inintelligibles*, on peut espérer qu'il amène une meilleure compréhension des phénomènes complexes sur lesquels il s'appuie.

I.3. RECAPITULATION

Il est temps à présent d'effectuer une première synthèse, afin de préciser les questions abordées par ce travail, les outils employés, les hypothèses faites.

Les questions

Du point de vue le plus général, nous nous intéresserons à la représentation sensible de phénomènes complexes (chapitre II). Ces phénomènes pourront être soit des phénomènes réels dont on mesure l'état de manière continue, comme dans les *mondes miroirs*, soit des phénomènes simulés tels que les étudient les sciences de la complexité. Le but de ces représentations pourra être variable suivant les phénomènes étudiés et les domaines d'applications, mais l'on peut considérer qu'il s'agira, d'une manière générale, de rendre ces représentations aussi intelligibles que possible. De manière plus précise, nous avons vu avec le *Jardin des Hasards*, que l'on pouvait distinguer des démarches artistiques et didactiques (chapitre V), de contrôle et de commande (chapitre VI) et enfin d'analyse et de conception (chapitre VII).

Les outils

Dans un cas comme dans l'autre, notre principal outil informatique sera l'*ordinateur-macroscope*, c'est-à-dire les outils informatiques des sciences de la complexité, en particulier les techniques de la vie artificielle et les systèmes multi-agents (chapitre III). Ces outils serviront à faire le lien entre phénomènes réels, phénomènes simulés et représentations visuelles, ces dernières pouvant elles-mêmes être considérées comme des systèmes de formes et de couleurs. Plus spécifiquement, nous décrirons la réalisation d'une plate-forme de développement multi-agent (chapitre IV) qui a servi de support au projet artistique *Le Jardin des Hasards* (chapitre V), et aux études expérimentales (chapitres VI et VII) que nous avons menées par ailleurs.

La démarche

La démarche que nous avons adoptée pour l'ensemble de ce travail se fonde précisément sur une approche artistique de la création d'images ainsi que sur l'hypothèse de la *communicabilité de complexités inintelligibles* comme fondement de l'art. Nous nous sommes ainsi associés à l'artiste multimédia B. Gortais afin d'explorer les bénéfices à retirer d'une approche artistique de problèmes de visualisation scientifique. Dans une démarche proche de celle de l'*art intermédiaire*, nous avons développé des outils devant constituer le support d'une création artistique, ce qui nous a permis en retour d'expérimenter l'usage de représentations artistiques de phénomènes complexes. Notre recherche est donc fondamentalement duale, à la fois recherche scientifique et recherche artistique où chacune enrichit l'autre.

CHAPITRE II

SYSTEMES COMPLEXES ET REPRESENTATION

Nous avons vu, dans l'avant-propos, toute la difficulté inhérente à la description, de manière verbale, d'un système dont la complexité est multiforme : complexité due à la multiplicité et à l'hétérogénéité des éléments ; complexité due aux interactions entre ces éléments, qui se produisent simultanément à de multiples niveaux ; complexité due à la dynamicité des interactions elles-mêmes, conduisant à une (ré)organisation permanente de l'ensemble ; enfin, complexité due à l'observateur lui-même qui possède du système une certaine connaissance, orientant la perception qu'il peut avoir du système. Tout ceci doit être intégré dans une démarche cohérente, prenant en compte chacun de ces aspects afin de permettre la construction de représentations multimodales• qui fournissent, pour un utilisateur / opérateur / spectateur, une perception globale de différents systèmes complexes, tout en autorisant la construction de vues partielles proposant des points de vue divers d'un même problème.

Pour ce faire, il est nécessaire de préciser quelque peu les notions que nous serons amenés à manipuler. Définir la terminologie utilisée nous permettra ensuite de préciser le contexte dans lequel nous avons développé notre recherche. Il s'agit notamment d'expliciter ce que nous entendons par ***systèmes complexes*** et par ***représentation***. Ce travail de formalisation nous servira ensuite de support pour expliquer et qualifier les besoins auxquels répond la construction de moyens de représentation.

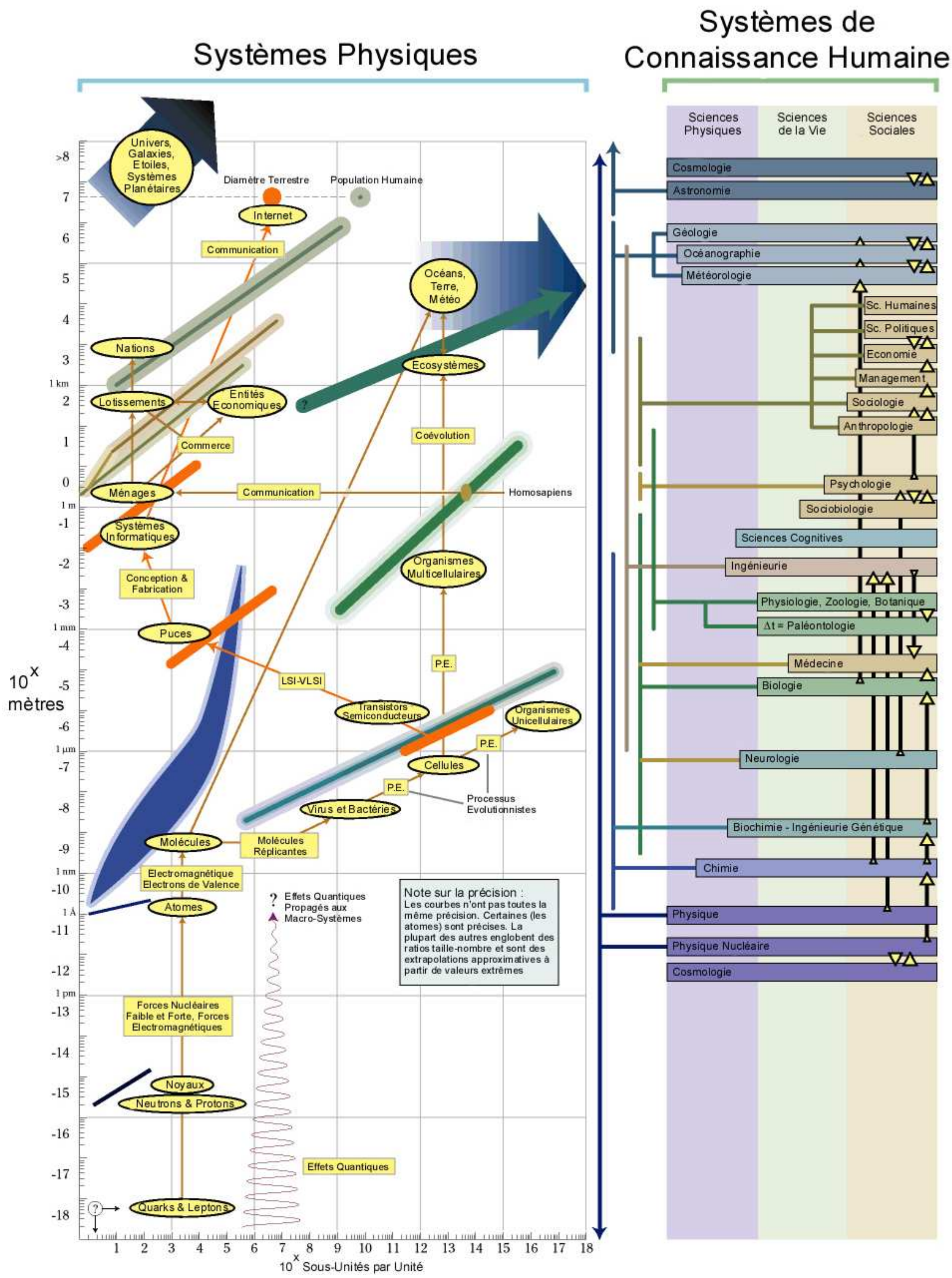


figure II.1 – Le monde est un système complexe de systèmes complexes (traduit d'après [Clemens 1999]).

II.1. SYSTEMES ET COMPLEXITE

« Il semble en premier lieu que la définition des systèmes comme "ensembles d'éléments en interaction" est si générale et si vague, qu'on ne peut pas en tirer grand chose. »

L. von Bertalanffy [von Bertalanffy 1993]

Comme le souligne L. von Bertalanffy, le concept de système est très général. Nous en convenons et il est certain que l'ajout du qualificatif « complexe » sans autre forme d'explication n'apporte, de ce point de vue, aucune précision utile. De fait, le domaine des systèmes complexes est extrêmement vaste et fourmille de concepts plus ou moins bien définis. En outre, chaque sous-domaine a parfois la tentation de réduire le champ des systèmes complexes à son propre champ d'application.

II.1.1. SYSTEME

Il suffit de relever la « profession de foi » du journal *Complexity International*, journal électronique qui affirme s'intéresser à « tous les domaines de recherche liés aux systèmes complexes », pour se rendre compte de la nécessité de définir, avec un minimum de précision, ce que nous placerons derrière le terme de ***système complexe*** : « le thème du journal est le domaine des systèmes complexes, ***la génération de comportements complexes par l'interaction de processus parallèles multiples***. Les sujets concernés incluent (mais ne se limitent pas à) : la vie artificielle, les automates cellulaires, la théorie du chaos, la théorie du contrôle, la programmation évolutionniste, les fractales, les algorithmes génétiques, les systèmes d'information, les réseaux de neurones, la dynamique non-linéaire, le calcul parallèle. Les articles traitant d'applications de ces sujets (par exemple en biologie, en économie, en épidémiologie, en sociologie) sont également encouragés ».

L'expression semble ainsi recouvrir des domaines de recherche extrêmement différents, comme en témoigne l'inventaire à la Prévert proposé, et comme le montre également la figure II.1. On pourra par exemple qualifier de complexes les systèmes suivants : un liquide en écoulement, une solution de réactifs chimiques, le système immunitaire, une société d'insectes, un écosystème biologique, un avion ou une usine, un système macro-économique ou encore un système de relations sociales. La figure II.2 montre la typologie proposée par M. Bunge qui met en évidence les rapports entre ces différentes formes de complexité dans un ordre de complexité croissante depuis le bas de la figure vers le haut [Durand 1998].

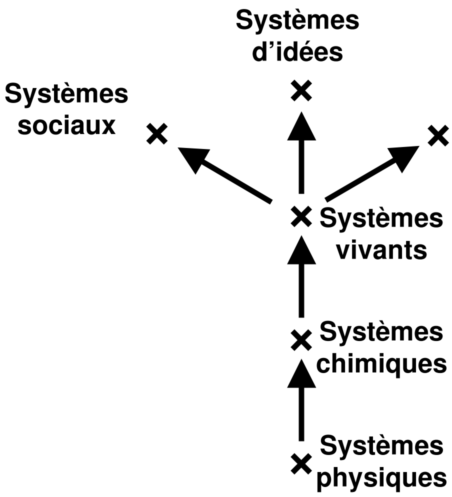


figure II.2 – Typologie de systèmes complexes d'après M. Bunge [Durand 1998].

II.1.2. SYSTEMES REELS ET VIRTUELS

La définition du journal *Complexity International* montre que la distinction entre systèmes complexes et outils d'étude de ces systèmes apparaît elle-même très floue. Avec l'informatique s'est développée la possibilité de construire des simulations de systèmes complexes « réels » qui sont elles-mêmes des systèmes complexes « virtuels ». Les techniques informatiques utilisées dans ce domaine, et notamment celles de la vie artificielle (automates cellulaires [Wolfram 1994], algorithmes génétiques [Goldberg 1989], systèmes multi-agents [Ferber 1995], etc.), prennent donc un statut un peu particulier. Elles sont en effet à la fois outils de modélisation pour l'étude de systèmes, qu'ils soient biologiques, économiques ou autres, et objets d'étude en eux-mêmes, permettant d'améliorer la compréhension de certaines des propriétés de ces systèmes. Leur importance est devenue aujourd'hui telle, que la définition donnée précédemment se centre sur ces techniques en tant que systèmes complexes, avec des applications pour différents systèmes réels, plutôt que de centrer l'intérêt sur ces systèmes réels, en considérant les techniques informatiques comme des outils permettant leur étude.

II.1.3. SYSTEME COMPLEXE

Si l'on s'en tient à cette définition, n'importe quel ensemble d'entités distinctes interagissant les unes avec les autres de manière dynamique, n'importe quel système donc, peut être qualifié de complexe. La question est donc la suivante : tout système est-il par définition complexe, ou certains le sont-ils et d'autres pas ? Et dans la deuxième alternative, peut-on expliciter ce qui fait la complexité d'un système, ce qui la caractérise ?

II.1.3.1. Le rôle de l'observateur

J.-L. Le Moigne propose que la complexité soit « une propriété attribuée, délibérément, par les acteurs aux modèles par lesquels ils se représentent les phénomènes qu'ils déclarent complexes » [Le Moigne 1990]. Autrement dit, il serait difficile de savoir si un phénomène est effectivement complexe en lui-même ; ce qui compte serait qu'il soit *perçu* comme tel par le modélisateur ou l'observateur qui s'en construit des représentations. Une telle vision ne nous semble pas complètement satisfaisante, dans la mesure où déclarer un phénomène complexe, de ce point de vue, n'aide en rien à la compréhension du phénomène. Nous préférons retenir que « la notion de complexité implique celle d'imprévisible possible, d'émergence plausible du nouveau et du sens du phénomène que l'on tient pour complexe » [Le Moigne 1990]. C'est en ce sens que nous avons évoqué, à propos de l'art intermédiaire, des modèles « non intelligibles ». Il serait sans doute plus exact de dire « non prévisibles ». Le modèle seul ne suffisant pas à prévoir le phénomène, il est nécessaire de le simuler et de le visualiser pour saisir l'évolution du phénomène. Les concepts d'**auto-organisation**• et d'**émergence**• d'une part, de **chaos**• et d'**évolution**• d'autre part sont au cœur de cette imprévisibilité fondamentale. Les premiers ont trait à l'organisation spontanée du système, les seconds à l'évolution globale du système dans le temps.

II.1.3.2. Organisation et auto-organisation

> *« L'organisation, la chose organisée, l'action d'organiser et son résultat sont inséparables. »*
>
> *P. Valéry*

Avant de parler d'auto-organisation, il est nécessaire d'évoquer, au moins rapidement, ce que l'on entend par organisation. Selon E. Morin, il s'agit d'un

« agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité complexe ou système », et qui par ailleurs « assure au système une certaine possibilité de durée en dépit de perturbations aléatoires » [Morin 1977]. Autrement dit, l'organisation « *transforme, produit, relie, maintient* ». Ainsi, et comme le rappelle P. Valéry, l'organisation désigne à la fois la structure, le squelette qui donne sa forme au système (l'organigramme d'une entreprise par exemple), et le processus par lequel cette structure a pu se mettre en place et se maintenir (l'ontogenèse• de la structure).

Les termes d'*auto-organisation* et d'*émergence* ont des significations voisines, le premier étant issu des sciences physiques et chimiques [Nicolis et Prigogine 1977], le second étant plus utilisé par la biologie, donc également par la vie artificielle [Cariani 1990 ; Steels 1991]. Le principe d'auto-organisation désigne la propriété que possèdent certains systèmes d'augmenter leur capacité d'adaptation au cours de leur fonctionnement alors qu'ils sont soumis au bruit (bruit entendu au sens de désordre). C'est ce que l'on appelle également le modèle de « l'ordre à partir du bruit » [Atlan 1979]. Le cerveau mature présente par exemple ce genre de propriété, qui lui permet de structurer le flot désordonné d'informations sensitives qu'il reçoit. Par ailleurs, on parlera de propriétés émergentes lorsqu'un système, pris dans son ensemble, manifeste des comportements qui ne sont pas présents explicitement dans chacun des composants du système, et qui sont donc le résultat de la dynamique interne du système et/ou de ses interactions dynamiques avec son environnement [Steels 1991]. Il est également possible d'interpréter ce genre de phénomène comme un couplage entre les composants en interaction (niveau *local* ou *micro*), et l'organisation du système dans son ensemble (niveau *global* ou *macro*) (voir figure II.3).

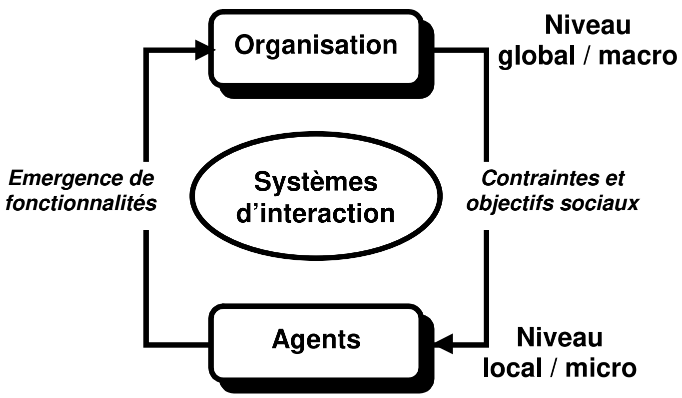


figure II.3 – La relation micro-macro dans un système complexe (d'après [Ferber 1995]).

Les comportements et interactions individuels déterminent l'*émergence* de structures globales qui, en retour, contraignent l'activité individuelle [Ferber 1995]. Des fourmis qui explorent leur environnement à la recherche de nourriture, et qui la rapportent à leur nid, s'organisent en files. Pourtant, aucune fourmi ne sait explicitement ce qu'est une file, et chacune se contente de suivre les traces chimiques laissées sur le sol par les autres fourmis à leur retour au nid. Répliqué sur un grand nombre de fourmis, ce simple comportement de suivi de traces suffit à faire émerger ce qu'un observateur identifie comme un comportement global de constitution de files [Hölldobler et Wilson 1990].

II.1.3.3. Ordre et désordre

Le chaos (voir [Gleick 1991] pour une histoire de cette discipline) désigne une imprévisibilité, à plus ou moins long terme, de l'évolution d'un système, même si celui-ci est déterministe. Une modification même minime de l'état initial du système est ainsi susceptible d'entraîner une divergence radicale dans l'évolution du système. Des corps en gravitation les uns autour des autres par exemple, ont un comportement chaotique dès qu'ils sont au moins trois. Cette notion de chaos a été popularisée par E. Lorenz avec l'image d'un papillon s'envolant d'un battement d'aile à un certain endroit du monde et provoquant, quelques jours plus tard, un ouragan à l'autre bout du monde. La météorologie est l'exemple type du système chaotique, mais les exemples de systèmes présentant ce type de comportements sont extrêmement nombreux.

On pourra par ailleurs parler de comportements évolutifs lorsque l'une quelconque des caractéristiques d'un système (composants, structure, interactions) est susceptible d'évolution au cours du temps. Un écosystème présente bien entendu des exemples de comportement évolutif, puisqu'il y a un renouvellement permanent des composants du système, et que la structure même des individus peuplant le système peut évoluer [Darwin 85].

II.1.4. CARACTERISATION DES SYSTEMES COMPLEXES

A la définition du journal *Complexity International*, nous préférons donc celle proposée par M. Clemens [Clemens 1999] (voir figure II.4). Déroulé textuellement, ce graphique peut s'exprimer sous la forme d'un définition linéaire.

Définition – *Systèmes Complexes* :

« Les *systèmes complexes* impliquent de nombreux composants qui interagissent dynamiquement à plusieurs niveaux ou échelles, lesquels exhibent des comportements communs pour différents types de systèmes, à différentes échelles, et donc dans différentes disciplines. »

Outre le fait qu'elle est tout à la fois plus générale (elle ne se limite pas aux systèmes complexes informatiques) et plus précise (elle fait mention des problèmes de chaos, d'évolution et d'auto-organisation), cette définition présente l'intérêt d'être graphique, explicitant les relations entre différents niveaux de complexité.

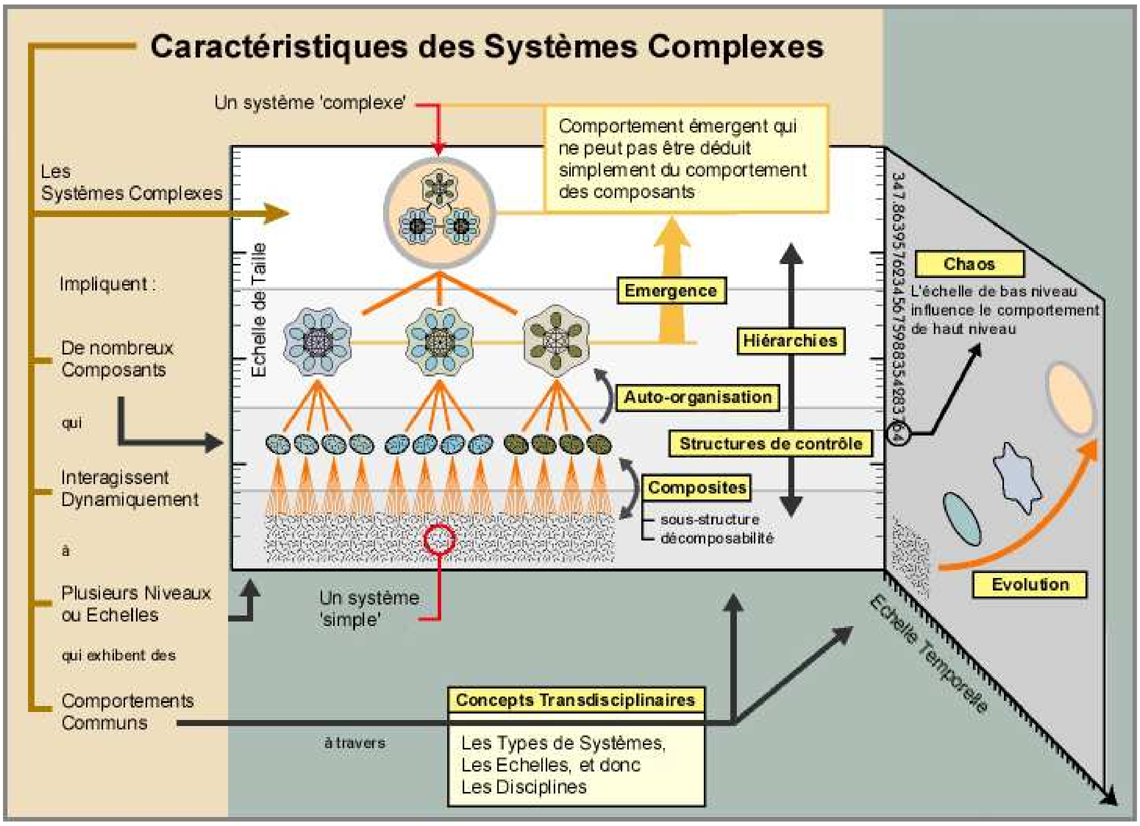


figure II.4 - Caractérisation des systèmes complexes (traduit d'après [Clemens 1999]).

Sans prétendre épuiser la richesse du graphique, on peut adjoindre à la définition linéaire les deux corollaires suivants :

Premier corollaire :

Les systèmes complexes sont organisés en niveaux, définis par composition d'éléments de niveau inférieur, ou résultant de phénomènes auto-organisateurs ou émergents.

On peut d'ores et déjà noter que cette notion de niveau est plus ou moins facile à définir selon qu'il existe une relation de composition ou d'émergence entre éléments de niveaux consécutifs. Matériel intra-cellulaire, cellules, tissus, organes, organismes entretiennent entre eux des relations de composition qui peuvent généralement être définies sans ambiguïté. Par contre, dans le cas de la constitution de colonnes de fourmis, il n'y a pas constitution d'un objet « colonne » en tant que tel, seulement émergence d'alignements entre éléments du système, reconnus par un observateur comme des entités d'un niveau supérieur à celui de la fourmi.

> **Deuxième corollaire :**
> La dynamique temporelle des systèmes complexes peut résulter de phénomènes chaotiques et/ou évolutifs.

Cette définition reste encore à un niveau de généralité très élevé, et nous serons donc amenés à expliciter la diversité des formes que peut prendre la complexité dans de tels systèmes. Celle-ci est présente aussi bien au niveau des éléments qu'au niveau de leurs interactions et de leur organisation, et elle se manifeste dans la dimension temporelle par des comportements globaux chaotiques, émergents ou évolutifs. Il faudra donc expliciter ce en quoi les systèmes complexes sont difficiles à appréhender et à comprendre. Mais auparavant, il est essentiel de montrer en quoi la représentation de ces systèmes est tellement importante, essentiel également de montrer la diversité des besoins sous-jacents.

II.2. REPRESENTATION ET INTERPRETATION

Comme suggère le paragraphe précédent, les systèmes complexes peuvent être de nature et de forme très variées. Mais surtout, ils sont omniprésents dans le monde qui nous entoure, depuis le monde physique jusqu'au monde social en passant par le monde de l'information en pleine expansion, avec notamment l'essor d'Internet. Nous sommes nous-mêmes des systèmes complexes, en interaction permanente avec d'autres systèmes complexes. Et pour étudier ces systèmes d'un point de vue scientifique, pour les concevoir, pour avoir un comportement adapté vis-à-vis d'eux ou encore pour maîtriser leur fonctionnement, il est nécessaire d'en posséder, ou plus exactement d'en construire, une représentation mentale.

II.2.1. REPRESENTATION MENTALE ET REPRESENTATION SENSIBLE

Cette représentation mentale peut être définie comme une « entité interne, correspondant cognitif individuel des réalités externes expérimentées par un sujet » [Houdé et al. 98]. Autrement dit, il s'agit d'une sorte de « modèle intériorisé » que l'individu construit pour rendre compte du monde qui l'entoure et auquel il se trouve confronté. Il s'agit naturellement d'une entité dynamique, construite de manière itérative à chaque « expérimentation ». En effet, chaque interaction avec son environnement est l'occasion pour le sujet d'affiner son « modèle intériorisé » de la réalité qui l'entoure. Le terme d'interaction doit ici être compris, dans un sens élargi, comme l'ensemble des perceptions que le sujet peut avoir de son environnement, et l'ensemble des actions qu'il est susceptible d'effectuer sur cet environnement. Se pose alors le problème des systèmes dont l'on souhaite avoir une représentation mentale, mais qui ne sont pas directement accessibles aux sens, ce qui représente la grande majorité des systèmes complexes. Il apparaît donc nécessaire d'élaborer des représentations auxiliaires qui traduisent les caractéristiques essentielles de ces systèmes sous une forme qui permette leur perception.

Deux solutions à ce problème sont envisageables. La première consiste à concevoir des techniques permettant l'observation et la manipulation des systèmes réels en fonctionnement. Ces techniques peuvent, à la manière du microscope et du télescope, fournir une image « directe » d'une réalité inobservable. Les techniques d'imagerie cérébrale en font partie, révélant quelque chose du fonctionnement du cerveau lorsque celui-ci est sollicité pour des tâches diverses. Ces techniques peuvent également, à la manière des *mondes miroirs*, proposer la synthèse d'informations hétérogènes de différentes provenances. Il s'agit donc en quelque sorte « d'instrumenter le réel » ou, ce qui revient au même, de fournir à l'expérimentateur des « prothèses » perceptives et manipulatoires. La deuxième solution consiste à élaborer, à partir du système à observer, un modèle computationnel qui reproduise artificiellement les caractéristiques de son fonctionnement. Les techniques informatiques évoquées au paragraphe précédent et permettant de simuler le fonctionnement de systèmes complexes relèvent de cette approche. L'ajout à ce modèle d'une interface permet d'une part d'en fournir une représentation qui autorise sa perception, et assure d'autre part la possibilité d'agir et d'expérimenter sur le système.

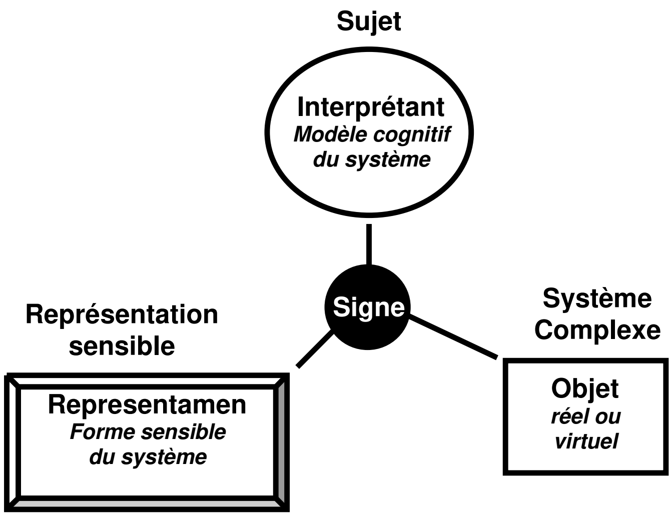


figure II.5 – Le signe triadique au sens de C. S. Peirce. Le sujet peut se construire un modèle cognitif d'un système par l'interprétation de formes sensibles qui y font référence.

II.2.2. ASPECTS SEMIOTIQUES DE LA REPRESENTATION

La construction d'un modèle cognitif pourra ainsi s'effectuer dans certains cas par la confrontation « directe » du sujet au système complexe, grâce à la médiation de son appareil sensori-moteur (essentiellement la vision, l'audition, le toucher, la proprioception). Mais cette construction s'effectuera également, dans d'autre cas, par la confrontation avec des représentations visuelles, sonores, langagières du monde, elles-mêmes élaborées pour mettre en évidence les parties d'un système et leurs interactions. Ces représentations participent à l'élaboration de signes, au sens de la sémiotique peircienne [Chandler 1994] (voir figure II.5). De ce point de vue, un signe est constitué par une triade qui met en relation un *representamen*, forme sensible qui fait référence à un *objet*, et qui produit un *interprétant*, c'est-à-dire qui produit du sens dans l'esprit de l'interprète. Autrement dit, un signe ne prend du sens que pour un interprète donné. Ou comme le dit C. S. Peirce, « rien n'est un signe tant qu'il n'est pas interprété en tant que signe ». De la même manière, on peut considérer que les modèles computationnels construits pour représenter des systèmes complexes réels sont eux-mêmes des signes, et que les représentations que l'on pourra donner de ces modèles seront donc des signes de signes.

II.3. INTERFACE HOMME / SYSTEME COMPLEXE

La construction de représentations sensibles est donc destinée à rendre le fonctionnement d'un système complexe intelligible pour un sujet. Ce faisant se constitue un système complexe de plus haut niveau contenant le système en fonctionnement, l'interface et le sujet humain. La diversité des termes utilisables pour désigner ce sujet (utilisateur / observateur / opérateur / spectateur) reflète la diversité des besoins et motivations liés à l'utilisation d'interfaces.

II.3.1. OPERATION, INFORMATION, DECISION

Un signe, comme nous venons de l'évoquer, est formé par la conjonction d'un objet, de sa représentation, et du sens qu'un interprète lui attribue. Les trois éléments sont indissociablement liés et l'on peut donc considérer qu'ils constituent ensemble un nouveau système complexe de niveau supérieur, qu'il sera peut-être également possible de représenter, pour constituer un nouveau système complexe, etc. Cette conception récursive des systèmes complexes et de leur représentation correspond, dans la classification que propose [Le Moigne 1990], au « modèle canonique O.I.D. » (pour Opération, Information, Décision) (voir figure II.6).

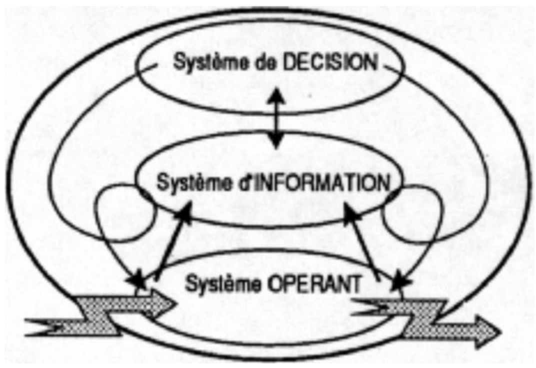


figure II.6 – La construction d'une représentation sensible d'un système complexe s'apparente à la constitution d'un système complexe de niveau supérieur, de la forme du « modèle canonique O.I.D. » ([Le Moigne 1990], p. 61).

Le système de décision (l'homme) est renseigné sur le fonctionnement du système opérant (le système complexe) par l'intermédiaire d'un système d'information (l'interface), qui lui permet également d'agir en retour pour modifier le fonctionnement du système complexe. En complexifiant le modèle, le système de décision peut lui-même avoir des capacités de « coordonner ses décisions d'action », « d'imaginer et de concevoir de nouvelles décisions possibles », et enfin de « se finaliser », autrement dit de choisir de nouveaux buts. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés aux différentes formes que pouvait prendre la relation entre système opérant et système de décision, en vue de concevoir des systèmes d'information adaptés. En fonction du système opérant et des besoins ou motivations du système de décision, la forme du système d'information pourra être très différente.

II.3.2. BESOINS ET MOTIVATIONS

Que l'on s'intéresse à l'écoulement d'un fluide, au fonctionnement d'une usine, à l'exécution d'un système informatique parallèle ou distribué, ou encore à la gestion d'une organisation, les motivations et les besoins en moyens de représentation ne sont pas les mêmes. La forme des systèmes de représentation à développer sera donc également différente suivant les cas.

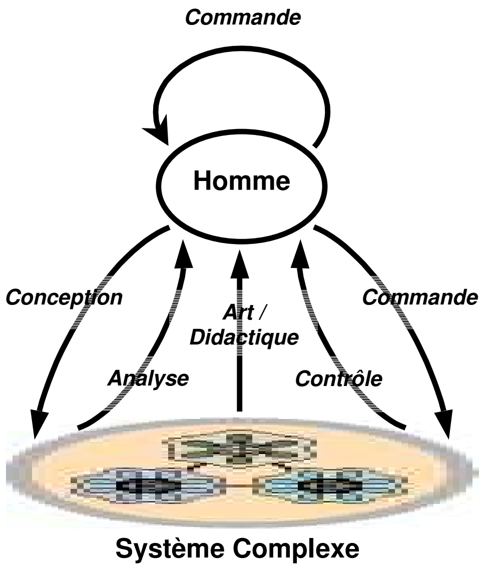


figure II.7 – La représentation de systèmes complexes relève de différentes problématiques, dont les plus importantes sont celles d'Analyse/Conception, de Contrôle/Commande et enfin d'Art et de Didactique.

De ce point de vue, nous avons identifié trois contextes distincts dans lesquels s'exprime un besoin en moyens de représentation, contextes que nous avons déjà évoqués à propos du *Jardin des Hasards* (supra I.1.3). Dans un contexte d'**analyse**, il s'agit de comprendre le fonctionnement de phénomènes complexes, compréhension qui permet en retour la **conception** de processus artificiels complexes. Dans un contexte de **contrôle**, il s'agit d'observer un système complexe en cours de fonctionnement de manière à intervenir pour modifier ce fonctionnement par la **commande**. Dans un contexte **didactique**, enfin, il s'agit d'expliquer le fonctionnement d'un système. Si l'on se réfère à la discussion épistémologique du premier chapitre, on peut considérer que les deux problématiques d'analyse et de contrôle correspondent respectivement aux principes de modélisation systémique et d'action intelligente. Ou de manière plus pragmatique, au *macroscope* et aux *mondes miroirs*. La problématique didactique correspond quant à elle plus spécifiquement au *Jardin des Hasards*, et est souvent associée à une démarche **artistique**.

II.3.3. ANALYSE ET CONCEPTION

D'un point de vue scientifique, l'étude des systèmes complexes vise avant tout à améliorer la connaissance et la compréhension que l'on possède de ces systèmes, à tous les niveaux, compréhension qui permet en retour de concevoir des systèmes possédant des propriétés similaires. Si l'on se réfère à la définition que nous avons retenue d'un système complexe (supra II.1.4), cela passe donc par l'analyse des composants du système et de leurs interactions dynamiques, et par la caractérisation du comportement global de l'ensemble, de manière à construire un modèle cognitif du fonctionnement du système. Pour ce faire, l'utilisation de représentations est d'une importance fondamentale, en complément de mesures numériques ponctuelles, pour rendre perceptible l'évolution d'un système et de ses composants. Dans un certain nombre de cas, cette représentation existe de manière naturelle ou est rendue accessible par l'utilisation d'instruments. Il est par exemple possible de rendre visibles les mouvements de fluides ou de gaz, la dynamique de certaines réactions chimiques ou encore l'activité du cerveau. Dans d'autres cas par contre, le système n'a qu'une existence abstraite, une entreprise par exemple, ou encore le réseau Internet. Il est alors tout au plus possible de mesurer les valeurs de certaines variables en différents points du système de manière à construire une représentation elle aussi abstraite du système. Cette problématique d'analyse de systèmes existants est illustrée par la boucle de droite de la figure II.8.

La phase d'analyse peut ensuite servir de support à une éventuelle phase de conception, illustrée par la boucle de gauche de la figure II.8. Cette fois-ci, l'observation du système ne vise pas à en étudier le fonctionnement, mais plutôt à valider ce fonctionnement par comparaison avec ce qui en était attendu. Dans une démarche de simulation par exemple, il s'agit de comparer le fonctionnement du

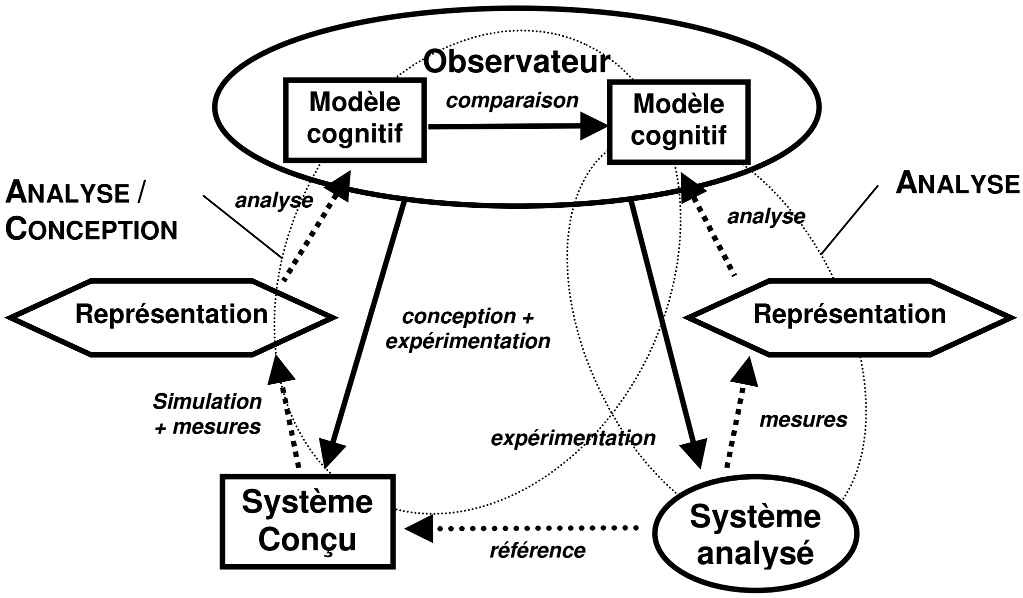


figure II.8 – Au cours du processus d'analyse, la représentation du système complexe permet la construction d'un modèle cognitif du système ; ce modèle cognitif permet en retour la conception d'un modèle computationnel, la représentation de ce dernier permettant de le valider et de l'affiner.

système que l'on souhaite simuler avec celui du modèle computationnel conçu par référence au premier. La représentation des deux systèmes permet la construction, par l'observateur, de modèles cognitifs de chacun d'entre eux, modèles qu'il peut alors confronter afin d'évaluer la qualité du modèle computationnel. Cette comparaison permet en retour d'affiner le modèle, processus itéré jusqu'à ce que celui-ci reproduise les observations effectuées sur le système réel avec suffisamment de fidélité. Ce processus s'applique donc en particulier à tout le champ de la simulation ou de la modélisation de systèmes complexes réels par des systèmes complexes artificiels (systèmes multi-agents, automates cellulaires, algorithmes génétiques, etc.). C'est ainsi que des éthologues sont par exemple capables de déterminer visuellement si une simulation d'une colonie de fourmis possède une quelconque vraisemblance par comparaison avec l'expérience visuelle qu'ils possèdent de colonies réelles [Drogoul 1993]. Mais cela s'applique également, en dehors de toute préoccupation de simulation ou de modélisation, à la conception de systèmes artificiels dont on possède un modèle du fonctionnement souhaité. Le processus de conception sera cette fois itéré jusqu'à ce que le fonctionnement observé soit jugé satisfaisant par rapport au fonctionnement souhaité.

II.3.4. CONTROLE ET COMMANDE

Pour pouvoir agir dans le monde, pour prendre des décisions appropriées, il est indispensable de comprendre comment ce monde fonctionne, ou en tout cas connaître de ce monde un état suffisamment proche dans le passé et avec suffisamment de précision, c'est-à-dire appréhender les parties qui le constituent, et les interactions qui organisent les parties et donnent sa cohérence au monde. De même que pour l'analyse, il est important de pouvoir construire une représentation des systèmes complexes avec lesquels l'individu est en interaction, de manière à lui permettre de posséder, à chaque instant, un modèle mental actualisé de l'état du système. Ce processus d'observation de l'état d'un système est ce que l'on appelle le *contrôle*. Sur la base de cette connaissance, passée et présente, de l'état du système d'une part, et sur la base d'un modèle de la dynamique du fonctionnement du système d'autre part, l'observateur est alors à même de prendre les décisions appropriées, soit pour son propre compte, soit pour modifier le fonctionnement du système.

Par rapport aux problématiques d'analyse et de conception, on se place ici dans un cadre plus opérationnel, c'est-à-dire que l'on ne recherche plus à favoriser la compréhension par l'observateur de la dynamique de fonctionnement du système. On suppose en effet qu'une phase d'analyse/conception préalable a permis à l'observateur de se construire un modèle cognitif de cette dynamique [Vicente et Rasmussen 1992]. Il s'agit donc maintenant d'assurer à l'observateur la capacité d'évoluer de manière satisfaisante au contact d'un système complexe, ou bien de lui permettre de piloter le système pour le contraindre dans certaines limites de fonctionnement. Ceci implique, par rapport à une problématique d'analyse, que l'on s'intéresse à la représentation de l'état du système davantage qu'à sa dynamique de fonctionnement. Cela implique également qu'il est primordial de pouvoir assurer la représentation en temps réel de cet état.

De manière plus précise, on peut trouver dans [Cooper 1994] une définition des notions de *contrôle* et de *commande*. Le *contrôle* désigne l'ensemble des opérations permettant « d'observer la situation présente, d'évaluer l'écart entre la situation et l'état désiré, et d'émettre de nouveaux objectifs afin de se rapprocher du résultat souhaité. » Ces nouveaux objectifs sont traduits en termes de *commande*, assimilée au fait de « manipuler les ressources disponibles (...) de manière à atteindre le résultat désiré. » Il s'agit donc, pour celui qui observe le système, soit de modifier son propre comportement en réponse à l'évolution du système, soit de modifier le comportement du système lui-même pour l'amener jusqu'à un état particulier. La figure II.9 résume ces notions de manière synthétique. Enoncés ci-dessus dans un cadre de commandement militaire, les principes très généraux de contrôle et de commande sont transposables de manière évidente pour la surveillance de processus industriels, mais également pour la gestion d'organisations économiques, la coordination de moyens de secours pour la gestion d'une crise, ou encore le travail coopératif (Computer Supported Cooperative Work) [Power 1993].

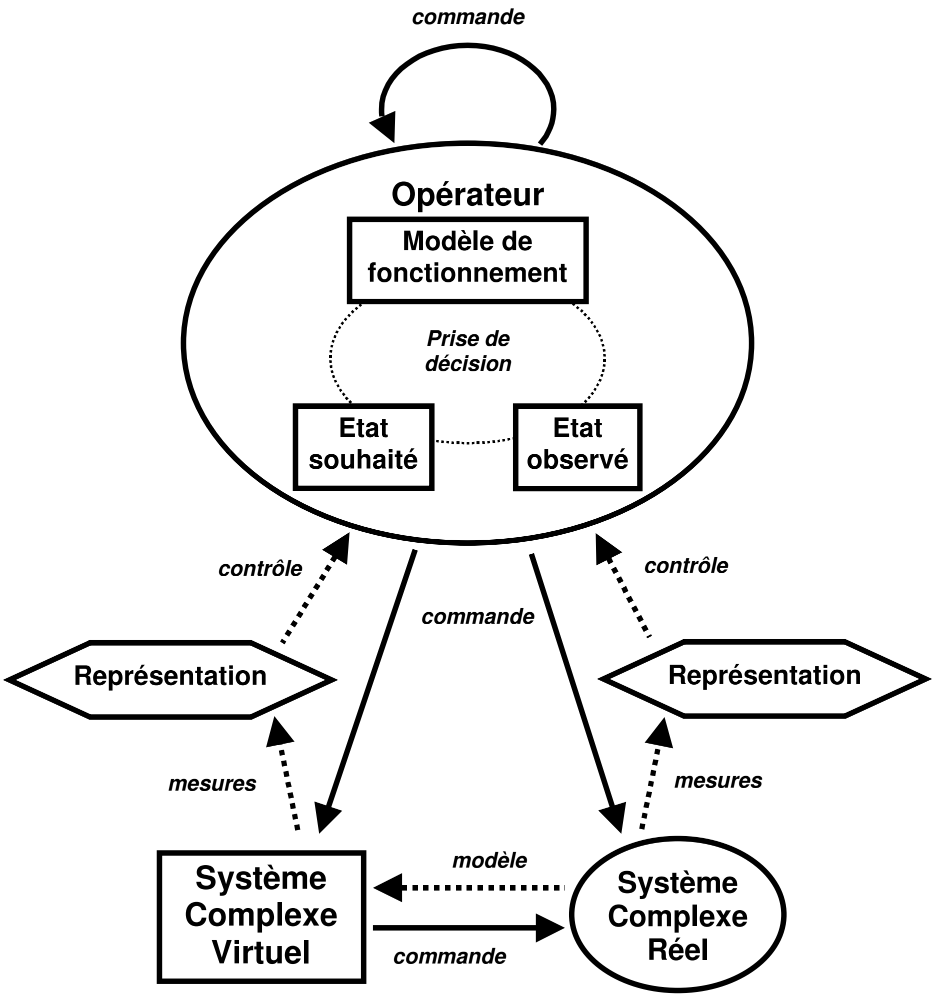


figure II.9 – Notions de *contrôle* et de *commande* dans une perspective d'interface Homme / Système complexe.

Lorsque l'on souhaite faire prendre au système un état particulier, la commande s'appliquera au système en fonctionnement. Dans le cas du contrôle d'une centrale nucléaire par exemple, le rôle de l'opérateur est de détecter lorsque la centrale sort du régime de fonctionnement normal, puis d'appliquer les mesures nécessaires au retour à une situation normale. Mais le résultat désiré peut également concerner l'observateur lui-même, dans son interaction avec le système complexe. Si l'on se rend compte par exemple que le temps tourne à l'orage, il n'est pas envisageable de modifier le système météorologique mais il est peut-être possible de trouver un abri.

II.3.5. ART ET DIDACTIQUE

L'aspect didactique de l'image a déjà été introduit dans le premier chapitre où nous avons donné quelques éléments historiques concernant l'imagerie scientifique, que prolongent aujourd'hui les techniques de visualisation du calcul scientifique, en tant qu'outil de vulgarisation scientifique. Nous avons également évoqué, avec les arts de la représentation puis l'art intermédiaire, le glissement depuis un art qui s'intéresse à la composition d'images vers un art qui s'intéresse à des processus susceptibles de composer des images. Ces deux aspects prennent une résonance particulière dans le cadre des systèmes complexes, comme nous allons le voir.

Les termes de systèmes complexes, de chaos, de phénomènes émergents ou encore d'auto-organisation pénètrent progressivement la culture scientifique populaire. Dans le même temps, les organisations et systèmes techniques sont de plus en plus souvent construits selon un modèle de contrôle décentralisé. Comme le souligne pourtant M. Resnick, penser les phénomènes observés en termes distribués reste difficile et va souvent à l'encontre de l'intuition naturelle [Resnick 1991a]. Nous avons vu dans l'avant-propos qu'il est facile de penser qu'un chef dirige les mouvements d'une colonne de fourmis. De même, un vol de canards sauvages sera perçu comme une formation ordonnée derrière un leader, alors que celui-ci ne se sera trouvé en pointe que par le jeu des interactions avec ses congénères [Heppner et Grenander 1990]. Reconstruire les phénomènes par soi-même est un moyen très puissant pour prendre conscience du rôle de l'interaction d'un organisme avec son environnement [Resnick 1988], et du rôle des interactions des organismes les uns avec les autres [Resnick 1991b], dans l'émergence des phénomènes que l'on observe. Mais le modèle cognitif que l'on se construit d'un phénomène dépend aussi largement de la manière dont il est perçu ; donc, dans le cas de simulations, de la manière dont il est représenté.

L'art s'intéresse également à ces phénomènes émergents et à la fascination qu'ils induisent. On peut trouver dans la vie artificielle [Langton 1988], le « moteur » de cette forme d'art, et les exemples sont nombreux de recherches artistiques qui s'intéressent aux concepts d'auto-organisation et d'évolution génétique artificielle pour le développement d'un art émergent, qui échappe au moins en partie au contrôle de son concepteur. Sans doute l'attrait principal de la vie artificielle pour l'art réside-t-il dans cette « vie » qu'elle recrée, et toutes les propriétés qui la caractérisent, de tensions entre équilibre stérile et déséquilibre créateur, entre prévisible et imprévisible, entre le désordre de la fumée et l'aspect figé du cristal [Atlan 1979], entre hasard et nécessité [Monod 1970] ; tout ce qui fait de la vie un déséquilibre stable, un hasard qui a du sens, en bref une expérience intéressante. Les travaux de K. Sims [Sims 1994] ou de W. Latham [Todd et Latham 1992], pour ne citer que les plus connus, en sont des exemples. C'est dans cet esprit également que nous avons développé le *Jardin des Hasards*.

II.3.6. EXEMPLES

En pratique, il est parfois difficile de faire une distinction aussi nette entre les problématiques d'analyse/conception et de contrôle/commande. C'est pourquoi nous rassemblons dans le même paragraphe, des exemples concrets de l'utilisation de moyens de représentation de différents systèmes complexes, pouvant correspondre à l'une ou l'autre de ces problématiques. Ces exemples ne présentent qu'un échantillon des applications possibles, qui vont de la visualisation de systèmes complexes virtuels tels que les systèmes multi-agents au pilotage de systèmes complexes industriels, en passant par la conception de programmes distribués ou parallèles et les applications de travail coopératif ou sur Internet.

II.3.6.1. La simulation de systèmes complexes

Dans un contexte de simulation de systèmes complexes, utilisant par exemple les systèmes multi-agents, il est bien entendu important de valider le système construit par rapport à celui qu'il modélise, en confrontant les données produites par la simulation avec les données collectées auprès du système réel. Lorsque le système réel peut lui-même être visualisé, pour la simulation de processus biologiques par exemple, il est intéressant de noter que la première validation consiste généralement en une validation visuelle qui vise à s'assurer grossièrement de la plausibilité du modèle. On n'accorde cependant que peu de crédit à ce type de validation, lui préférant une validation s'appuyant sur des données statistiques qui donnent un aperçu global de l'évolution du système, mais laissent de côté des aspects plus qualitatifs quant à la dynamique structurelle et interactionnelle du système. Ceci est évidemment d'autant plus vrai que le système réel n'est pas lui-même directement perceptible, malgré quelques travaux qui vont dans le sens d'une représentation dynamique de la structure du système [Proton et al. 97 ; Guerrin et al. 1998]. Il nous semble paradoxal, alors que les systèmes multi-agents permettent de reconstruire les phénomènes dans toute leur complexité, de réduire leur validation aux seuls aspects globaux. Il est sans doute intéressant de représenter l'évolution dynamique de simulations multi-agents, ce qui signifie également, si l'on souhaite pouvoir effectuer des comparaisons visuelles, élaborer des représentations pour des systèmes qui ne sont pas directement perceptibles.

II.3.6.2. La conception de systèmes distribués

On observe une tendance générale au passage d'un mode de programmation séquentiel des systèmes informatiques vers un mode de programmation parallèle. Cette tendance tire son origine en particulier dans le développement d'ordinateurs parallèles, où plusieurs processeurs sont capables d'effectuer des traitements de manière simultanée, et dans le développement des réseaux d'information tels qu'Internet, impliquant un support lui-même distribué. Ceci se traduit par des applications dans lesquelles plusieurs processus (quel que soit le nom qu'on leur donne, acteur [Briot 1989], agent [Ferber 1995], etc.) sont amenés à coopérer, donc à communiquer les uns avec les autres, de manière à résoudre collectivement, un problème donné. Ce passage d'un mode de pensée séquentiel à un mode de pensée parallèle, entraîne avec lui de nouvelles difficultés de conception. Les programmes parallèles, les systèmes distribués [Hart et al. 1997] ou encore les systèmes multi-agents [Giroux et al. 1994 ; Ndumu et al. 1999] renouvellent ainsi les problèmes liés à la visualisation de programme [Roman et Cox 1993] en vue de leur déboguage. Il ne suffit pas en effet de s'assurer que chaque élément du système fonctionne correctement, encore faut-il que le système dans son ensemble ait le comportement souhaité. Il est donc essentiel de pouvoir visualiser ce comportement, ce qui, pour des « systèmes avec des données, un contrôle et des processus distribués, est une tâche notoirement difficile » [Ndumu et al. 1999].

II.3.6.3. Le traitement d'information dynamique

Outre des nouvelles méthodes de programmation, l'essor d'Internet entraîne surtout de nouvelles manières d'approcher l'information. Cette tendance se retrouve également à l'échelle des entreprises avec le développement du concept d'intranet, c'est-à-dire des réseaux d'information internes. Dans un contexte de travail en réseau, l'information et les données disponibles sont toujours plus nombreuses, dynamiques, distribuées, hétérogènes. Ce qui rend la récupération et l'utilisation efficace de ces données toujours plus difficiles. De nouvelles méthodes sont nécessaires, soit pour fouiller cette masse d'informations de manière automatique [Moukas 1996 ; Jambu 1999], soit pour permettre à un utilisateur de le faire, donc en lui proposant des moyens eux aussi dynamiques de visualiser l'information [Davies et al. 96 ; Terveen et Hill 1998]. Les paradigmes classiques de visualisation d'information [Gershon et al. 1998], développés pour visualiser des ensembles statiques de données généralement homogènes s'adaptent mal à une visualisation continue d'information dynamique.

II.3.6.4. Le travail coopératif et les communautés virtuelles

Le développement des techniques de communication entraîne par ailleurs de nouvelles manières de travailler ou de se détendre à plusieurs. Travailler, parce qu'un ensemble de personnes physiquement éloignées peuvent coopérer à la réalisation en commun de tâches impossibles à réaliser de manière isolée ; se détendre par la création de communautés virtuelles d'intérêts communs. Dans un cas comme dans l'autre, il peut parfois être utile d'avoir une vision d'ensemble des personnes impliquées, de leurs actions, de leurs interactions, de la formation ou de la dissolution de groupes [Nakauchi et al. 1992], etc. Les motivations associées peuvent être quant à elles très variées : un chef d'équipe ou de projet peut vouloir contrôler le déroulement de l'exécution d'un travail ; les personnes exécutant le travail doivent savoir quelles sont les compétences des autres personnes afin de pouvoir choisir certaines coopérations plutôt que d'autres ; des personnes engagées dans des communautés virtuelles d'utilisateurs peuvent vouloir connaître les intérêts des autres personnes [Minar et Donath 1999], leurs relations mutuelles, d'éventuelles discussions en cours, etc.

II.3.6.5. Les systèmes industriels complexes

Garantir le fonctionnement correct d'un système industriel complexe est primordial, en particulier lorsque les conséquences liées à un dysfonctionnement peuvent être graves, dans une centrale nucléaire par exemple. Pour ce faire, un soin particulier doit être apporté à la conception des interfaces permettant le contrôle et la commande des systèmes, d'autant qu'il est établi que les incidents ou accidents se produisant dans des systèmes industriels ont généralement pour cause une interface mal conçue. De très nombreuses recherches sont ainsi menées pour concevoir des interfaces qui rendent perceptible le fonctionnement, ou dysfonctionnement, des systèmes industriels afin de permettre à un opérateur de prendre les mesures correctrices nécessaires [Kolski 1997]. Ces interfaces doivent prendre explicitement en compte les aspects dynamiques liés au fonctionnement en continu du système. Elles doivent prendre également en compte un certain nombre de questions ergonomiques liées au filtrage des informations les plus importantes, et aussi au choix du niveau d'abstraction le plus adéquat pour présenter les informations.

Enfin, si les systèmes techniques sont déjà complexes en eux-mêmes, l'ajout d'opérateurs humains les rend encore beaucoup plus complexes. Une voiture est un système complexe ; une voiture avec son conducteur est un système très complexe ; la complexité est encore beaucoup plus complexe lorsque plusieurs voitures se trouvent sur une même route… Ainsi, les systèmes faisant intervenir conjointement systèmes technologiques et humains, une armée par exemple, sont parmi les plus complexes, et nécessitent par ailleurs une vision globale de la situation en vue de prendre des décisions appropriées [Cooper 1994]. Dans un contexte civil, les catastrophes industrielles nécessitent la mise en place de procédures de crise, dans lesquelles interviennent un grand nombre de personnes (préfet, gendarmes, pompiers, médecins, etc.). La bonne coordination de toutes ces catégories de personnels est très délicate à assurer et nécessite la conception de systèmes de gestion de crise permettant de rendre compte de manière continue de l'évolution de la situation.

CHAPITRE III

COMPLEXITE DU SYSTEME ET DE L'OBSERVATEUR

> *« C'est (…) à un véritable renversement de perspective et de pratiques que nous convie la bonne utilisation du langage graphique. Mais celui-ci n'est ni facile à maîtriser ni évident à mettre en œuvre, c'est un langage à part entière avec ses règles impératives et ses qualités esthétiques et heuristiques. Il mériterait un véritable enseignement, ou mieux un apprentissage ; ceux qui en bénéficieraient y gagneraient une meilleure capacité de compréhension des systèmes complexes parmi lesquels nous vivons. »*
>
> *D. Durand [Durand 1998]*

Nous avons présenté, de manière générale, les questions liées aux systèmes complexes et à leur représentation, et les besoins auxquels cela pouvait répondre. En caractérisant de manière plus précise les difficultés liées à la représentation de ces systèmes, qui tiennent à la fois à la complexité du système lui-même et à la complexité de l'observateur, nous amorçons, de manière encore théorique, la réflexion sur les solutions à développer. Cela sera l'occasion d'introduire, de manière plus formelle, les qualités du médium visuel, par rapport au médium sonore et au langage verbal, pour la construction de ces représentations, ce qui nous amènera à discuter quelques notions de perception qui y sont attachées.

III.1. PROBLEMES DE REPRESENTATION

Comme nous l'avons déjà souligné, la définition proposée en II.1.4 reste d'une grande généralité et n'est pas d'un très grand secours pour appréhender les spécificités des systèmes complexes en terme de représentation. Nous rappelons néanmoins cette définition : « les *systèmes complexes* impliquent de nombreux composants qui interagissent dynamiquement à plusieurs niveaux ou échelles, lesquels exhibent des comportements communs pour différents types de systèmes, à différentes échelles, et donc dans différentes disciplines. » Nous allons maintenant y revenir en détaillant, point par point, ce qui rend la représentation de ces systèmes difficile, et en essayant d'en tirer les premiers enseignements concernant la conception de moyens de représentation appropriés. En caractérisant ce que sont les systèmes complexes, nous serons amenés à comprendre pourquoi il peut être tellement important de les représenter, et en quoi cela constitue une tâche extrêmement difficile.

III.1.1. LES COMPOSANTS

> *« **Les systèmes complexes impliquent de nombreux composants** qui interagissent dynamiquement à plusieurs niveaux ou échelles, lesquels exhibent des comportements communs pour différents types de systèmes, à différentes échelles, et donc dans différentes disciplines. »*

III.1.1.1. Complexité componentielle – Exemple de l'automate cellulaire

Un automate cellulaire [Wolfram 1994], composé d'une grille arbitrairement grande de cellules élémentaires, illustre bien cette multiplicité. En revanche, l'automate cellulaire constitue une simplification à l'extrême de ce que peut être un système complexe, et masque donc nombre de « complexités » susceptibles d'être rencontrées dans d'autres systèmes, un écosystème biologique par exemple.

En premier lieu, toutes les cellules de l'automate sont identiques. Même si elles peuvent se trouver ponctuellement dans des états différents, elles sont construites selon le même modèle et se comportent toutes de la même manière. A l'inverse, les composants de l'écosystème sont d'une diversité extrême, d'un point de vue morphologique autant que comportemental : organismes végétaux ou animaux, avec ou sans fleur, uni- ou multicellulaires, etc. De manière plus générale, on peut remarquer que de nombreux systèmes complexes se caractérisent par l'*hétérogénéité* de leurs composants.

En plus d'être toutes identiques, les cellules de l'automate sont élémentaires, « atomiques ». Cela veut dire que l'on ne peut pas les diviser elles-mêmes en sous-composants. Dans un écosystème, chaque élément vivant est au contraire un assemblage d'organes, eux-mêmes des assemblages de cellules, elles-mêmes des assemblages de molécules, elles-mêmes des assemblages d'atomes, qui sont eux-mêmes des assemblages… La complexité apparaît dans ce cas de manière évidente à de nombreux niveaux différents. Dans beaucoup d'autres systèmes, les composantes sont également *composites*, c'est-à-dire regroupant un certain nombre d'éléments.

Les cellules de l'automate sont par ailleurs réparties de manière très régulière, suivant un quadrillage parfait, et demeurent immobiles. Les habitants d'un écosystème se répartissent quant à eux de manière très complexe, en rapport avec la topologie ou la météorologie de leur milieu, en rapport également avec tous les autres membres de leur chaîne alimentaire, en fonction de leurs pérégrinations quotidiennes ou saisonnières, etc. La répartition spatiale est donc non seulement dynamique, mais elle se produit également dans différents milieux. Dans le cas de systèmes informatiques, Internet par exemple, on parlera de *distribution* pour exprimer cette notion de répartition de l'information sur différents supports à travers un réseau.

Dans l'automate cellulaire enfin, le nombre de cellules est une donnée du système, fixée lors de l'initialisation de celui-ci. Il ne peut donc pas varier au cours du temps, à moins de réinitialiser le système. Le nombre d'habitants d'un écosystème est au contraire en perpétuelle évolution, au gré des forces de reproduction et de mort. Plus généralement, il s'agit d'une caractéristique propre aux systèmes ouverts que d'avoir une composition, non pas fixe, mais au contraire en constante évolution, en fonction des interactions avec l'extérieur du système.

Les composants d'un système complexe sont donc non seulement nombreux, mais ils présentent souvent d'autres caractéristiques qui rendent la compréhension du système plus difficile, ce que nous proposons d'appeler la *complexité componentielle.*

Propriété 1 – *Complexité componentielle*

La *complexité componentielle* résulte de la structuration du système en une multitude de composants qui peuvent être :

- hétérogènes
- composites
- mobiles et distribués dans l'espace
- en nombre variable dans le temps

III.1.1.2. Homogénéité / Hétérogénéité

Dans certains cas, en particulier si l'on s'intéresse à la structure d'ensemble d'un système plus qu'à la nature des éléments le composant, il sera plus pratique de considérer ces différents éléments comme étant tous identiques, comme le montrent les personnages de la figure III.1. Il est ainsi possible de représenter la notion abstraite de corps humain. A l'inverse, si l'on souhaite reconnaître une personne particulière, il sera important que la représentation fasse ressortir les traits les plus spécifiques de la personne.

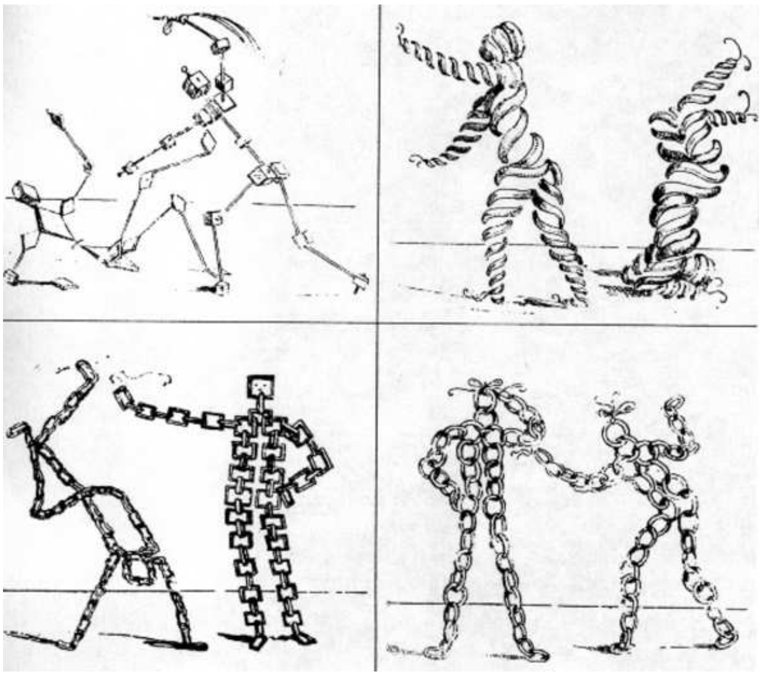


figure III.1 – Bien qu'un corps soit composé d'éléments visuellement et fonctionnellement différents, la structure du corps peut être reconnue indépendamment de la forme de ces éléments (gravure de J.-B. Braccelli, *Bizzarie di varie figure*, 1624).

Corollaire 1.1 – *Diversité des formes de représentation*

Afin de prendre en compte l'hétérogénéité des composants d'un système complexe, un système de représentation doit offrir la possibilité :

- de visualiser les composants de manière homogène ou hétérogène
- d'alterner les deux types de visualisation

Même si la formulation du corollaire peut sembler tautologique, il nous paraît important de pouvoir observer les caractéristiques des agents (niveau micro) aussi bien que celles de la structure du système (niveau macro), la représentation à donner de chacun des composants pouvant être différente dans l'un ou l'autre cas.

III.1.1.3. Niveau de représentation

De même qu'il peut être intéressant de visualiser des composants hétérogènes sous une forme homogène, il est souvent utile de représenter des éléments composites sous une forme atomique. Dans un système industriel par exemple [Kolski 1997], il n'est pas souhaitable de représenter chaque pièce d'une machine-outil si l'on a juste besoin de savoir si elle fonctionne correctement ou non. Un simple rond, rouge ou vert suivant les cas, peut suffire et évite de surcharger l'opérateur d'informations inutiles. En cas de dysfonctionnement par contre, il peut être nécessaire d'en savoir plus sur cette machine afin d'établir un diagnostic, donc nécessaire de décomposer la représentation de la machine.

Corollaire 1.2 – *Diversité des niveaux de représentation*

Afin de prendre en compte le caractère composite de certains composants d'un système complexe, un système de représentation doit offrir la possibilité :

- de visualiser les composants de manière atomique ou composite
- d'alterner les deux types de visualisation

III.1.1.4. Répartition

Nous avons souligné le fait que les composants d'un système pouvaient être répartis. Cela signifie que les informations caractérisant l'état du système à un instant donné ne sont pas disponibles de manière centralisée, mais doivent au contraire être récupérées depuis des sources diverses avant d'être intégrées au sein d'une représentation globale. Si l'on souhaite par exemple construire l'image de l'activité d'un réseau informatique tel qu'Internet, l'information correspondante devra être récupérée de chaque nœud, chaque connexion du réseau.

Corollaire 1.3 – *Diversité des sources d'information*

Afin de prendre en compte le caractère réparti de certains systèmes complexes, un système de représentation doit :

- s'appuyer sur un ou plusieurs *système(s) d'information* qui collecte(nt) l'information nécessaire
- permettre d'intégrer et de filtrer l'information reçue avant de la représenter

III.1.1.5. Modularité

Dans le cas de systèmes ouverts enfin, il est impossible de connaître a priori la liste des éléments qui composent un système puisque, par définition, cette liste est variable dans le temps, modifiée chaque fois qu'un composant est ajouté ou retiré du système. Si l'on s'intéresse par exemple à la représentation d'un tronçon d'autoroute, la composition du système évolue au rythme des entrées et sorties des voitures sur le tronçon.

> **Corollaire 1.4 – *Modularité***
> Afin de prendre en compte le caractère ouvert de certains systèmes complexes, un système de représentation doit offrir la possibilité :
> - d'ajouter et supprimer dynamiquement des éléments
> - de définir dynamiquement la composition de la représentation

III.1.2. LES INTERACTIONS ET LA STRUCTURE

> *« Les systèmes complexes impliquent de nombreux composants* ***qui interagissent dynamiquement à plusieurs niveaux ou échelles****, lesquels exhibent des comportements communs pour différents types de systèmes, à différentes échelles, et donc dans différentes disciplines. »*

III.1.2.1. Complexité structurelle

La distinction entre niveau et échelle n'est pas simple à expliciter, niveau et échelle pouvant être utilisés, dans certains cas, pour se définir mutuellement. Dans le cas le plus simple, il est possible d'associer la notion de niveau à celle de structuration du système, et la notion d'échelle à celle d'évolution du système dans l'espace et dans le temps. Nous avons ainsi introduit, au paragraphe précédent, la notion de niveau comme le résultat du caractère composite de certains éléments d'un système. Une machine-outil ne se situe pas au même niveau que les pièces qui la composent. De même, dans la plupart des organisations humaines, des niveaux sont définis de manière explicite et organisés selon une hiérarchie prédéfinie. Une entreprise pourra ainsi être décomposée en départements, eux-mêmes décomposés en équipes, etc. De manière plus générale, on considérera qu'un élément composite se situe à un niveau plus élevé que ses éléments constitutifs. C'est le cas simple au sens où la relation de compositionnalité est établie de manière explicite et fixe.

Dans la plupart des cas cependant, cette relation n'est présente que de manière implicite et il est seulement possible d'identifier des niveaux comme étant différents, du fait qu'ils font intervenir des interactions à des échelles spatiales ou temporelles différentes. Les lois physiques par exemple, depuis les forces nucléaires faible et forte jusqu'à la force de gravitation en passant par la force électromagnétique, agissent sur des échelles spatiales extrêmes, aboutissant à une structuration de l'univers en niveaux bien distincts, depuis les particules du noyau atomique jusqu'à l'univers dans son ensemble, en passant par l'atome, la planète, le système planétaire, la galaxie, l'amas de galaxies. Dans un écosystème, végétaux et animaux se développent à des rythmes temporels très différents ; une fourmi et la fourmilière à laquelle elle appartient n'évoluent pas à la même vitesse ; une interaction visuelle et une interaction chimique sont caractérisées par des temps de réaction différents.

Si l'on se replace dans l'exemple de l'écosystème, un banc de poissons, résultat des mouvements coordonnés de l'ensemble des poissons le composant, se situe à un niveau plus élevé que chacun de ces poissons pris isolément. Il faut alors faire attention qu'il n'existe pas d'objet « banc de poisson » en tant que tel, celui-ci n'étant qu'une structure émergente, reconnue comme telle par un observateur humain, du fait des échelles différentes caractérisant le poisson et le banc de poissons. Du point de vue spatial autant que temporel, poissons et banc de poissons ont en effet des propriétés différentes. Dans ce dernier cas, la notion de « niveau » n'a pas de réalité objective et l'on ne pourra donc pas en donner de définition satisfaisante. Un niveau ne sera alors reconnu comme tel que par un observateur particulier en fonction des connaissances qu'il a du système et du point de vue qu'il adopte en l'abordant. Suivant le caractère implicite ou explicite de la structuration du système, la compréhension qu'il sera possible d'avoir du système sera ainsi d'ordre différent. Cette propriété constitue ce que nous appelons la complexité structurelle du système.

Propriété 2 – *Complexité Structurelle*

La *complexité structurelle* résulte de la structuration du système en différents niveaux qui peuvent être définis de manière :

- implicite, constituant une propriété émergente du système
- explicite, constituant une donnée initiale du système

III.1.2.2. Structuration

Si la notion de niveau peut, dans un certain nombre de cas, n'être définie que de manière implicite, il apparaît néanmoins utile de pouvoir la manipuler au sein d'un système de représentation. En effet, pour pouvoir mettre en œuvre le corollaire 1.2, autrement dit, pour alterner entre représentation atomique ou éclatée d'objets composites, il est nécessaire de pouvoir spécifier explicitement un rapport de composition dans le système de représentation. Par ailleurs, dans le cas de niveaux implicites, il peut être intéressant pour un observateur de pouvoir manipuler les structures qu'il voit émerger. Dans un système qui modélise par exemple des phénomènes d'écoulements hydriques sous la forme de gouttes d'eau dévalant le relief dans le sens de la plus grande pente, il est plus facile pour un hydrologue de raisonner au niveau des mares et des ravines qu'il voit se constituer qu'au niveau des gouttes d'eau [Servat et al. 1998]. Il est donc important de lui en donner les moyens.

> **Corollaire 2 – *Structuration***
>
> Afin de prendre en compte le caractère implicite ou explicite de la décomposition de systèmes complexes en niveaux de complexité, un système de représentation doit :
>
> - permettre de modéliser et visualiser la notion de structure
> - permettre de modéliser et visualiser la notion de hiérarchisation en niveaux
> - permettre à l'utilisateur de manipuler dynamiquement ces notions

III.1.2.3. Complexité interactionnelle

Qu'ils soient implicites ou explicites, ces niveaux définissent une structure qui oriente la perception du système. Ce qui, d'un certain point de vue, ou à un certain niveau, est considéré comme élémentaire, pourra être considéré, au niveau immédiatement inférieur, comme un système complexe à part entière. Selon le point de vue adopté, les composants d'un système se situeront donc à des niveaux différents. Ceci implique évidemment la possibilité d'observer des interactions se situant à différents niveaux de complexité. L'économie s'intéresse par exemple, au niveau le plus élevé, aux échanges commerciaux entre pays, puis à un niveau inférieur, aux échanges entre entreprises, jusqu'à s'intéresser, au niveau le plus bas, aux échanges interindividuels.

Les interactions, cependant, ne se produisent pas nécessairement entre composants de niveaux identiques. On peut tout à fait imaginer des interactions s'effectuant par exemple entre un pays et une entreprise, entre un individu et une entreprise, etc. De même, dans le cas de structures implicites, on peut considérer que certaines interactions se produisent entre niveaux différents, bien que la question de l'interprétation par l'observateur se pose alors avec encore plus de force. Dans la fourmilière par exemple, les phéromones émises par la reine étant interprétées par chacune des ouvrières, tout se passe comme si la reine interagissait avec l'ensemble de la fourmilière. De même, lorsqu'un fourmilier vient se nourrir de fourmis, celles-ci réagissent de manière coordonnée pour repousser l'agresseur. Dans chacun de ces cas, il n'y a pas d'interaction directe avec un objet que l'on appellerait « fourmilière », mais une interaction avec un ensemble de fourmis qui agissent de manière identique ou en tout cas de manière coordonnée.

Les interactions entre composants d'un même système sont donc multiformes, avec des modes d'opérations extrêmement divers, relativement à la structure du système aussi bien qu'aux échelles spatiale et temporelle, ce que nous désignons sous le terme de *complexité interactionnelle.*

Propriété 3 – *Complexité Interactionnelle*

La *complexité interactionnelle* résulte de l'interdépendance entre composants, se manifestant par des interactions qui peuvent :

- être de nature très différente
- se constituer ou disparaître de manière dynamique
- opérer entre composants de niveaux différents
- opérer simultanément à différents niveaux de complexité
- opérer à différentes échelles spatiales et/ou temporelles

III.1.2.4. L'interaction comme composant

Une interaction est par nature impalpable, donc difficile à représenter. L'interaction gravitationnelle entre la Terre et une pomme qui tombe à sa surface, l'interaction chimique entre les fourmis qui se suivent en file pour ramener la pomme dans la fourmilière, l'interaction visuelle entre Newton et la pomme qui tombe ou les fourmis qui se suivent : aucune de ces interactions n'a de réalité sensible d'une part, aucune n'a d'existence indépendante des objets qu'elle met en relation d'autre part. Pourtant, nous percevons effectivement des interactions de manière tout à fait naturelle et sans effort particulier. Au XVIII^{ème} siècle, G. Vico désigna par l'*ingenium*, « cette faculté mentale qui permet de relier de manière rapide, appropriée et heureuse des choses séparées. »

On peut penser l'interaction comme une relation mutuelle entre composants, mutuelle mais pas nécessairement, voire rarement symétrique. Il existe de toute façon une asymétrie liée au déroulement temporel de ces interactions, qui implique l'irréversibilité des phénomènes perçus. C'est cette asymétrie qui permet de percevoir des relations de cause à effet entre composants distincts. Dans le cas d'organismes vivants, on pourra envisager également les interactions en termes d'action et de perception : deux organismes sont en interaction parce que les actions de l'un sont perçues (et interprétées) par l'autre, et réciproquement [Drogoul 1993]. Ce qui fera dire à P. Valery que « nous ne percevons que des opérations, c'est-à-dire des actes. »

En poursuivant le raisonnement jusqu'au bout, si l'on peut percevoir des interactions, on peut y réagir, c'est-à-dire qu'il peut s'établir des relations entre un composant d'une part, et une interaction d'autre part. Lorsque Newton voit la pomme qui tombe (une interaction entre la pomme et la Terre), il en déduit les principes de la gravitation universelle. Il y a eu interaction entre Newton et le système pomme-Terre en interaction. Il peut donc être utile de donner à une interaction le statut de composant. Ainsi, de même qu'il pouvait être intéressant de manipuler un ensemble de composants en tant que composant unique, il peut être intéressant de manipuler une interaction en tant que composant à part entière. De fait, les corollaires 1.1 et 1.4 peuvent s'appliquer aux interactions de la même manière qu'aux composants, c'est-à-dire qu'il pourra être utile de faire la distinction entre formes d'interaction différentes, utile également d'intégrer la possibilité d'une gestion dynamique des interactions.

Corollaire 3 – *Interaction*

Afin de prendre en compte la notion d'interaction entre composants, un système de représentation doit au choix :

- permettre de visualiser les actions et perceptions des composants
- permettre de manipuler une interaction à la manière d'un composant

III.1.3. L'ORGANISATION

> *« Les systèmes complexes impliquent de nombreux composants qui interagissent dynamiquement à plusieurs niveaux ou échelles,* ***lesquels exhibent des comportements communs pour différents types de systèmes, à différentes échelles****, et donc dans différentes disciplines. »*

Les automates cellulaires que nous avons évoqués précédemment reproduisent par exemple remarquablement bien les phénomènes chimiques de réaction-diffusion, tels qu'on peut les observer en particulier sur les pelages de différents animaux [de Kepper et al. 1998]. Un automate cellulaire et un coquillage sont de nature très différente, mais les comportements globaux qu'ils exhibent l'un et l'autre peuvent être très semblables ainsi que le montre la figure III.2. C'est ce qui permet d'envisager d'utiliser les uns pour simuler les autres. De la même manière, il est courant d'observer des systèmes qui présentent des comportements communs à différentes échelles. Dans le domaine physique par exemple, et bien que la mécanique quantique ait remis en cause cette conception, il peut être pratique de penser à un atome entouré de ses électrons comme l'équivalent d'une étoile entourée d'un système planétaire.

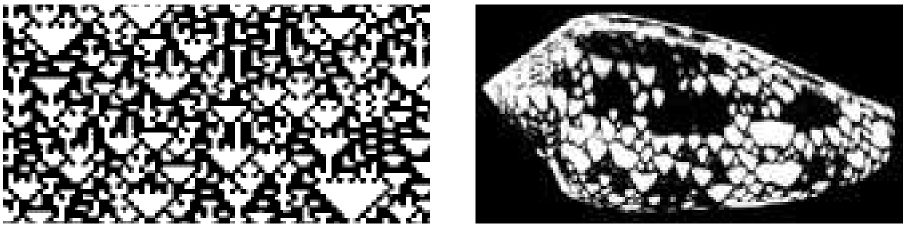


figure III.2 – La dynamique temporelle d'un automate cellulaire à une dimension peut reproduire la pigmentation de certains coquillages (extrait de [Wolfram 1994]).

Il serait possible de multiplier les exemples à l'infini, mais au-delà des ressemblances que l'on peut établir entre deux systèmes particuliers, il est possible de définir des propriétés plus générales concernant l'évolution de systèmes complexes. En effet, s'il est parfois délicat de décomposer un système en une structure particulière, il est toujours encore plus compliqué de décrire l'évolution spatiale et temporelle de ce système, et il est en général impossible de prévoir son évolution au-delà d'un courte période de temps. Ceci tient à la présence, dans la majorité des systèmes complexes, de phénomènes émergents, chaotiques et évolutifs. De ces trois propriétés résulte donc une difficulté extrême à pouvoir décrire la dynamique organisationnelle d'un système, propriétés que nous regroupons sous le terme de *complexité organisationnelle*

Propriété 4 – *Complexité Organisationnelle*

La *complexité organisationnelle* résulte de la dynamicité de la structure du système et des interactions entre composants, qui se manifeste par :

- des *comportements émergents*, qui ne peuvent pas être déduits simplement du comportement des composants
- des *comportements chaotiques*, pour lesquels les comportements de plus bas niveau peuvent influencer le comportement global du système par effet d'amplification
- des *comportements évolutifs*, pour lesquels les composants, la structure et l'organisation du système évoluent au cours du temps

III.1.4. INTERDISCIPLINARITE

« Les systèmes complexes impliquent de nombreux composants qui interagissent dynamiquement à plusieurs niveaux ou échelles, lesquels exhibent des comportements communs pour différents types de systèmes, à différentes échelles, ***et donc dans différentes disciplines****. »*

La diversité des exemples proposés jusqu'à présent montre bien le caractère multidisciplinaire de l'étude des systèmes complexes. Les implications de cette multidisciplinarité sont sans doute plus difficiles à percevoir. Elles sont pourtant fondamentales dans le cadre de ce travail.

Il convient de remarquer, en premier lieu, qu'il existe de nombreux systèmes complexes dans lesquels interviennent des domaines de connaissance variés. La plupart des systèmes complexes industriels, un avion de ligne par exemple, fait appel dans son fonctionnement à un grand nombre d'expertises différentes, ce qui complique la détection d'éventuelles anomalies, l'établissement d'un diagnostic et la prise de mesures correctives, du fait de la fragmentation des savoirs impliqués.

Par ailleurs, le fait que les mêmes phénomènes soient observés dans différents domaines de connaissance est, paradoxalement, source de richesse autant que de confusion. C'est une source de richesse car cela permet d'établir, à travers différents domaines, des transpositions, des analogies, des métaphores qui permettent d'enrichir la compréhension que l'on a d'un domaine, à partir de la connaissance que l'on possède dans un autre domaine. Cette démarche a toujours été source de progrès scientifique et d'innovations techniques. L'avion de ligne doit ainsi beaucoup à la maîtrise que possèdent tous les oiseaux, à quelques exceptions près, de la science du vol. Et aujourd'hui, c'est la fourmilière qui devient source d'inspiration pour la conception d'organisations distribuées à la fois réactives et robustes [Drogoul 1993].

Mais cette parenté entre systèmes complexes a également son revers. Les concepts manipulés étant en effet relativement « mous », c'est-à-dire difficiles à définir de manière rigoureuse, chaque domaine les redéfinit par rapport à ses propres besoins. On arrive ainsi à utiliser les mêmes termes pour désigner des concepts différents, ou bien au contraire à utiliser des terminologies distinctes pour désigner des concepts voisins.

L'ensemble de ces propriétés, liées au caractère interdisciplinaire de l'étude des systèmes complexes, constitue ce que nous désignons sous le terme de complexité interdisciplinaire.

Propriété 5 – *Complexité Interdisciplinaire*

La *complexité interdisciplinaire* résulte de la multiplicité et de l'interpénétration des champs disciplinaires potentiellement impliqués dans l'étude des systèmes complexes. Elle peut brouiller la compréhension de phénomènes complexes du fait :

- de la fragmentation des savoirs
- de la manipulation de terminologies communes pour désigner des concepts différents
- de la manipulation de terminologies différentes pour manipuler les mêmes concepts

ou au contraire faciliter cette compréhension par :

- l'utilisation de transpositions, d'analogies, de métaphores, d'une discipline à une autre

Nous aurions pu intituler ce dernier type de complexité, *complexité paradoxale*, tant il est vrai qu'elle constitue une source de difficultés en même temps qu'une très grande source de richesse dans l'étude des systèmes complexes. Il sera ainsi important de tenir compte de cette particularité dans la conception de systèmes de représentation. Nous aurons l'occasion d'y revenir plus longuement par la suite, cette recherche dépendant largement de l'exploration de cette complexité.

Mais au préalable, et maintenant que nous avons progressé dans la caractérisation des difficultés de représentation associées aux systèmes complexes eux-mêmes, il est utile de rappeler quelques notions liées à la perception visuelle. Il s'agit d'une part d'examiner les difficultés supplémentaires provenant du fait que l'observateur est aussi interprète, puisqu'il n'observe pas les phénomènes de manière externe, passive et objective, mais participe au contraire de manière active à la construction d'un modèle cognitif de ce qu'il voit [Tisseron 1997]. Il s'agit d'autre part de proposer les premiers éléments de solution au problème posé.

III.2. PROBLEMES DE PERCEPTION

Une représentation est interprétée par un observateur comme faisant référence à un objet. Cette représentation est donc difficile à construire parce que le système à observer est complexe, mais également parce que le système qui observe est lui-même complexe. Au passage, il est utile de noter que nous avons fait jusqu'à présent l'hypothèse implicite d'une représentation de type visuel. Aussi intuitive soit elle, il est nécessaire d'argumenter cette hypothèse de manière un peu plus formelle que ne l'a fait *La Tortue* dans l'avant-propos. Nous présenterons donc rapidement les qualités respectives de l'image, du son ou du langage verbal[13] pour la construction de ces représentations, ce qui nous permettra d'introduire le rôle du sujet dans les mécanismes de perception, notamment ceux de la modalité visuelle.

III.2.1. QUALITES COMPAREES DE L'IMAGE, DU SON, DU MOT

> *« (…) il porte une casquette carrée semi-ronde ovale en drap orné de pois blancs. Le fond est noir. Les pois sont de forme elliptique ; le grand axe de chacun d'eux a six millimètres de long et le petit axe quatre, soit une superficie légèrement inférieure à dix-neuf millimètres carrés. La visière est faite d'une étoffe analogue, mais les pois sont plus petits et de forme ovale. Leur superficie ne dépasse pas dix-huit millimètres carrés. Il y a une tache sur le troisième pois à partir de la gauche, en comptant face au porteur de la casquette au plus près du bord (…). »*
>
> *R. Queneau, Les fleurs bleues*
>
> *« Il y a trop de choses à dire pour pouvoir le dire. »*
>
> *J. Prévert*
>
> *« Une image vaut 10000 mots. »*
>
> *Confucius*

Pour rendre perceptible un état ou un mode de fonctionnement d'un système, différents supports sont susceptibles d'être utilisés, dont il faut évaluer les mérites respectifs. Nous utiliserons deux critères principaux pour comparer les modalités visuelle, sonore et verbale : un critère d'*efficacité* d'une part, c'est-à-dire la quantité d'information susceptible d'être transmise ainsi que la précision et la rapidité avec laquelle cette information peut être transmise ; un critère d'*expressivité* d'autre part,

[13] Bien qu'il existe de nombreuses formes de langages non verbaux (visuels, sonores, corporels, etc.), nous n'utiliserons désormais le terme « langage » que pour désigner le langage verbal.

c'est-à-dire la nature même de l'information que le médium est susceptible de transmettre.

III.2.1.1. Efficacité

La première caractéristique des systèmes complexes est qu'ils mettent en jeu simultanément un grand nombre d'éléments, éléments qui sont par ailleurs dynamiques. Cela signifie donc une quantité gigantesque d'information à représenter en un temps extrêmement court, c'est-à-dire qu'il est nécessaire, sous peine de réduire considérablement l'information disponible, de choisir un canal perceptif disposant d'une grande bande passante, autorisant un grand débit d'information. Comme nous le rappellent les mots de J. Prévert et de Confucius, le langage présente, de ce point de vue, un handicap extrême par rapport à la vue. Une image véhicule en effet des millions d'informations[14] susceptibles de représenter simultanément autant d'objets, de concepts, de relations, etc., information entièrement renouvelée dix fois par seconde. Alors que dans le même temps, le langage peut difficilement rendre compte d'un seul de ces éléments, et que la perception sonore d'une manière générale se situe à un niveau intermédiaire. Ce n'est pas un hasard si 80 à 90% des informations perceptives à partir desquelles nous élaborons nos connaissances sur le monde proviennent de la vision.

Pour en revenir au langage, il s'avère particulièrement lent, aussi bien dans l'énonciation de phrases que dans leur interprétation. Il va de soi que l'énonciation d'une phrase est plus longue que la présentation d'une image, du fait de la linéarité du langage. Mais l'interprétation d'une phrase est également un processus relativement long, faisant systématiquement appel à des processus cognitifs de haut niveau. L'interprétation d'une image fait parfois appel au même genre de processus de haut niveau, mais dans un grand nombre de cas, un traitement cognitif de bas niveau, ne nécessitant pas d'intervention de la conscience ni même de l'attention, suffit pour fournir de nombreuses informations.

III.2.1.2. Expressivité

Quelle est maintenant l'expressivité de ces trois modalités, autrement dit, quelle est l'étendue des choses qui sont exprimables, représentables par chacune ? Dans le

[14] L'œil contient environ 130 millions de récepteurs, cônes sensibles à la couleurs et bâtonnets, et jusqu'à 150000 récepteurs par mm² [Bonnet et al. 1989].

contexte qui nous importe, il s'agit d'examiner la capacité de ces modalités à désigner et à qualifier des éléments, ainsi que les relations qu'ils entretiennent les uns par rapport aux autres.

S'agissant d'éléments isolés, le langage est bien adapté pour désigner ces éléments, c'est-à-dire indiquer leur présence et leur attribuer un nom. Lorsque ces éléments ont une apparence visible, le langage est cependant moins approprié que l'image pour les caractériser. La citation de R. Queneau montre que le langage peut être très précis et détaillé mais au prix de descriptions longues et laborieuses. Des éléments plus abstraits devront quant à eux être symbolisés, c'est-à-dire représentés sous une forme sensible sans rapport avec l'élément lui-même. Un mot, un son, une image pourront dans ce cas se justifier sans que l'on puisse dire nécessairement que l'un soit plus approprié qu'un autre. La supériorité de l'un ou l'autre de ces média devra alors être évaluée en fonction du contexte plus global dans lequel ils devront être utilisés.

Concernant le langage, il faut remarquer qu'il possède des qualités d'évocation très importantes, un simple mot pouvant appeler à l'esprit de l'auditeur, tout un ensemble de représentations mentales. Ce qui est parfois une qualité peut cependant devenir un défaut dans le cadre de la représentation de systèmes complexes. Le même mot pourra en effet évoquer chez trois personnes différentes, trois représentations mentales radicalement différentes, en fonction du vécu de chacune des personnes. Du fait de sa grande ambiguïté, le langage ne semble donc pas constituer un très bon candidat dans un contexte de représentation de systèmes complexes.

« Seuls les trajets que suggèrent les mélodies nous peuvent donner quelque idée ou intuition de trajectoire dans l'espace-temps. »

P. Valéry

S'agissant de la représentation de relations, la situation apparaît plus marquée en faveur du support visuel mais des nuances doivent être apportées. Il est souvent avancé que le signal sonore peut être assimilé à un signal linéaire, à une dimension en fonction du temps, impliquant donc un traitement séquentiel, alors que le signal visuel est bidimensionnel en fonction du temps, permettant un traitement en parallèle de l'information reçue. Ceci n'est qu'en partie vrai. Il est exact que, de manière instantanée, la vision transmet une image complète, traduisant des relations complexes entre les éléments qui la composent, tandis que l'audition ne transmet qu'un son. Perçu dans la durée, un son complexe peut cependant être décomposé en un ensemble de sources distinctes, de par leur timbre, leur position, leur ligne mélodique, etc., produisant ainsi une « image », un paysage sonore qui évolue dans l'espace et dans le temps. Il n'en reste pas moins qu'il est difficile par ce médium d'exprimer des relations ou des interactions riches, contrairement à ce que permet le médium visuel, du fait de sa nature spatiale. Cette composante spatiale constitue un moyen extrêmement puissant et simple pour représenter les interactions dynamiques entre éléments composant un système complexe. Les mécanismes de la vision sont ainsi faits que l'œil met naturellement en relation les différentes zones du champ visuel les unes avec les autres [Arnheim 1976].

III.2.1.3. L'image comme système complexe

> *« La cognition intuitive se situe dans un champ perceptif de formes en libre interaction. Considérons, par exemple, la façon dont une personne appréhende un tableau. En parcourant du regard la surface délimitée par le cadre, l'observateur perçoit les différentes composantes de l'œuvre, c'est-à-dire les formes, les couleurs et les rapports qui les unissent. Ces composantes exercent leurs effets perceptifs l'une sur l'autre, si bien que l'observateur reçoit l'image globale en tant que résultat de l'interaction de ces composantes. »*
>
> *R. Arnheim [Arnheim 1969]*

Le support visuel apparaît donc nettement comme le moyen le mieux adapté et le plus riche pour la représentation de systèmes complexes, ce qui n'exclut évidemment pas l'utilisation conjointe d'autres modalités sensorielles. L'utilisation conjointe de plusieurs modalités est en effet un moyen puissant pour renforcer l'efficacité de la communication [Coutaz 1996]. Si le travail présenté par la suite fait appel au texte et au son en même temps qu'à l'image, nous développerons plus particulièrement l'utilisation de l'image. On peut en fait considérer l'image comme étant elle-même un système complexe de formes colorées qui évolue dans l'esprit de l'observateur. Nous avions déjà évoqué l'apparition d'une forme « systémique » de composition picturale (voir supra I.2.2), par laquelle le processus de composition ne consistait plus à produire des reproductions de la réalité, mais à mettre en relation des formes et des couleurs de manière à exprimer certaines émotions. La citation de R. Arnheim au début du paragraphe nous rappelle que si le rôle du peintre est de construire une organisation de formes colorées, celui du spectateur est de la re-construire par l'*acte de perception*. Deux formes ou deux couleurs ne sont pas par elles-mêmes en relation, mais c'est leur perception par un observateur qui les met en relation. C'est en ce sens que nous proposons de considérer l'image comme un système complexe qui existe et évolue dans l'esprit de l'observateur, pouvant constituer en cela le double isomorphe d'un système complexe réel, une représentation donc de ce système complexe.

III.2.2. LE ROLE DU SUJET

Nous nous intéresserons désormais essentiellement à l'utilisation de la vision même si le travail réalisé fait également appel à la modalité auditive. Les problèmes soulevés par ces deux modalités perceptives sont similaires mais ils s'expriment de manière nécessairement différente.

III.2.2.1. L'acte de perception

Du point de vue le plus général, la perception peut être considérée comme relevant d'un double traitement d'information [Lindsay et Norman 80] : un traitement ascendant d'une part, ou *orienté par les données*, par lequel les informations sensorielles primaires (couleur, mouvement, orientation, texture, etc.) sont successivement regroupées en éléments perceptifs de plus haut niveau (formes, objets, relations, structure, etc.) ; un traitement descendant d'autre part, ou *orienté par les concepts*, par lequel les connaissances du sujet à propos de l'objet perçu, mais également ses attentes, sa culture ou encore ses émotions ou motivations orientent et modifient le traitement ascendant de l'information sensorielle. L'image de la figure III.3 illustre ce principe de manière parlante. Présentée sans aucune légende, l'image est difficile à percevoir. Son interprétation devient par contre beaucoup plus facile à partir du moment où l'on précise qu'il s'agit d'un dalmatien qui se dirige en reniflant le sol vers un arbre situé dans le coin supérieur gauche de l'image. Savoir ce qu'il y a à voir oriente la perception, ici en la facilitant, parfois en conduisant à des erreurs.

Ces deux modes de traitement de l'information nous semblent tout aussi importants l'un que l'autre, si l'on veut comprendre quelque chose de la perception de systèmes complexes. Nous nous intéresserons donc autant à la manière dont le système perceptif visuel traite l'information pour en extraire des structures globales, qu'à l'influence exercée sur ce traitement par l'observateur lui-même. Dans un premier temps, cependant, nous nous limiterons à l'examen du rôle du sujet, réservant la perception orientée par les données à un examen ultérieur.

figure III.3 – Savoir ce que l'image représente facilite la perception ; ici, un dalmatien se dirige en reniflant le sol vers un arbre situé dans le coin supérieur gauche de l'image.

Le sujet a un rôle à jouer notamment dans la « dernière » étape du processus de perception d'une forme, à savoir l'identification de cette forme comme la représentation d'un objet ou d'un symbole et l'attribution d'un nom à cet objet. Cette étape est sans doute celle dans laquelle interviennent le plus fortement les spécificités du sujet, c'est-à-dire pêle-mêle ses connaissances, sa culture, sa motivation, ses attentes, ses émotions, etc.

III.2.2.2. L'interprétation sémantique

"Intelligence is in the eye of the observer."[15]

R. Brooks [Brooks 1991]

L'*interprétation sémantique* désigne le processus par lequel l'observateur attache un sens, une fonction, une intentionnalité aux structures perçues. Bien que délicate à aborder, elle est cependant fondamentale pour l'étude de systèmes complexes dans lesquels des structures émergent sans avoir été spécifiées explicitement à aucun endroit du système. On est en droit de se demander dans quelle mesure ces structures existent effectivement ou ne sont que des constructions opérées dans l'esprit de celui qui regarde le système. P. Picasso disait « qu'un tableau n'existe que par celui qui le regarde ». De même, on pourrait dire que les structures émergentes d'un système complexe n'existent que par celui qui les regarde. En outre, ces structures émergentes n'ont pas de fonction particulière puisqu'elles ne sont que le résultat de l'interaction des éléments les composant. La description qu'en donnera un observateur sera pourtant

[15] « L'intelligence est dans l'œil de l'observateur. » (traduction personnelle)

généralement exprimée en termes fonctionnels, révélant la plupart du temps une anthropomorphisation des phénomènes observés [Francès 1963]. Décrire le comportement de fourragement[16] de fourmis en termes de files ou de colonnes relève de ce principe. Les fourmis n'ont en effet aucune conscience de cette notion de file, se contentant de suivre un signal chimique présent dans l'environnement.

III.2.2.3. Le rôle de la culture et la notion de code

Le lien que nous avons rapidement évoqué au paragraphe II.2.2 entre signes et objets fait bien entendu l'objet de conventions, qui peuvent être personnelles, culturelles, ou encore le résultat de l'institution d'un code. La perception des couleurs en est un exemple typique, concernant aussi bien les différences de teintes perçues que les valeurs ou émotions qui y sont attachées. Le deuil est ainsi traditionnellement associé par les sociétés occidentales à la couleur noire, tandis que les sociétés orientales y associent la couleur blanche. De même, différentes langues découpent le spectre des couleurs de manière différente, en fonction de l'importance accordée aux différentes couleurs par la culture. Les esquimaux ont ainsi plusieurs mots différents pour désigner plusieurs nuances de blanc, correspondant à plusieurs états différents de neige ou de glace. De manière similaire, une forme peut être associée par différentes cultures ou personnes à des objets ou concepts différents ; et réciproquement, un même objet ou concept peut être représenté par des formes différentes. La référence entre objets et signes n'est donc pas biunivoque, ayant valeur d'universalité, mais se base au contraire sur l'utilisation d'un code.

Lors de la construction d'une interface, il est donc très important de prendre en considération les conventions, de formes ou de couleurs, attachées à un domaine de compétence, à une culture, ou simplement à un individu particulier. Dans la conduite de processus industriels par exemple, les opérateurs ont complètement intégré l'association entre fonctionnement normal et couleur verte d'une part, fonctionnement anormal et couleur rouge d'autre part. L'interprétation de ces couleurs est ainsi devenue naturelle et inconsciente, et ne nécessite donc plus aucun effort de raisonnement conscient. Une interface qui n'adopterait pas ces conventions conduirait très certainement à de grosses erreurs d'interprétation, donc à la possibilité d'incidents voire d'accidents graves.

[16] Recherche de nourriture [Hölldobler et Wilson 1990].

III.2.2.4. Le rôle des connaissances et de l'attente

> *"I recently showed a simulation of a simple self-organizing system to four researchers. One researcher was reminded of galaxies forming, another of cities growing, the third of honeybees swarming, the fourth of excess arsenic atoms clustering within gallium arsenide. In fact, it was a simulation of slime-mold cells aggregating into clusters."* [17]
>
> *M. Resnick [Resnick 1991b]*

Par ailleurs, la perception fait appel aux savoirs de l'individu percevant. Que ce soit au contact du monde réel ou au contact d'une représentation du monde, l'individu utilise ses connaissances préalables pour interpréter ce qu'il perçoit et en extraire du sens. De fait, la vision que peut avoir un expert d'un domaine est très différente de celle d'un novice. La lecture d'une radiographie ou d'une échographie est ainsi fortement dépendante de la formation préalable de la personne qui effectue la lecture. Un médecin sait en effet quoi rechercher et à quel endroit et son système perceptif est entraîné à percevoir efficacement certaines configurations, c'est-à-dire à les extraire de ce qui constitue pour toute personne non formée, une espèce de bruit blanc. Ceci est tellement vrai que seul (paraît-il) le médecin qui fait l'échographie est capable de l'interpréter. Dans un tout autre domaine, il apparaît que l'interprétation, et la mémorisation, d'une position d'un jeu d'échecs dépendent pour beaucoup du niveau du joueur. Un grand maître sait ainsi regrouper les pièces en un ensemble de configurations partielles qui prennent du sens relativement au déroulement d'une partie. A l'inverse, un novice n'y voit qu'un ensemble de pièces dispersées au hasard sur un échiquier et sera incapable d'en saisir les caractéristiques importantes [Simon 1991].

Dans le cas de la représentation de systèmes complexes, il est clair que le niveau de compétence de l'utilisateur, c'est-à-dire la connaissance préalable qu'il possède du système ou de systèmes analogues, est fondamentale dans la détermination de la forme à donner à la représentation. La quantité d'information à transmettre, la précision avec laquelle elle est fournie à l'utilisateur, le niveau d'abstraction à laquelle elle est présentée, en résumé tout ce qui détermine la forme de la représentation devra être adapté au niveau de compétence de l'utilisateur, expert ou novice.

[17] « J'ai montré récemment une simulation d'un système auto-organisateur simple à quatre chercheurs. Un chercheur a pensé à la formation de galaxies, un autre à la croissance de villes, le troisième à un essaim d'abeilles, le quatrième à l'incorporation d'atomes d'arsenic en excès dans de l'arsénide de gallium. En fait, c'était une simulation d'amibes collectives s'agrégeant en groupes. » (traduction personnelle)

III.2.2.5. Le rôle de la motivation et des émotions

Enfin, puisque la perception résulte d'une certaine manière d'un apprentissage, les expériences antérieures du sujet influent sur ses perceptions présentes. Les aspects motivationnels et affectifs sont également susceptibles de modifier la perception, la facilitant ou l'inhibant, modifiant par exemple la dimension des objets perçus [Francès 1963]. Comme nous l'avons évoqué dans l'avant-propos avec Achille, les motivations du sujet, telles que la faim ou la soif, peuvent modifier la perception en orientant la reconnaissance d'objets [Delorme 1982]. Une récompense ou une punition associée à la perception semble pouvoir également induire une modification de celle-ci. Enfin, certaines études suggèrent que la valeur attribuée aux objets peut modifier la manière dont ils sont perçus.

A ce propos, il est intéressant de noter que le plaisir qu'un sujet éprouve à la vue d'une image est un élément important quant à sa motivation, son degré d'attention, donc l'efficacité avec laquelle l'information présentée pourra être traitée et analysée. Une représentation esthétique aura ainsi plus de chances d'être adoptée par les opérateurs qui devront l'utiliser. En adoptant une démarche artistique, il s'agit de notre part de profiter des connaissances de l'art dans la représentation du monde autant que de produire des représentations propres à susciter le plaisir et le bien-être, visant à l'obtention d'une perception intuitive et sans effort, donc également efficace, de phénomènes complexes.

DEUXIEME PARTIE

CONSTRUCTION D'UN SYSTEME D'INTERFACE

CHAPITRE IV

POSITIONNEMENT DE LA DEMARCHE

Après avoir présenté, de manière théorique, les questions attachées à la représentation de systèmes complexes, nous examinerons, dans ce chapitre, différentes solutions proposées pour y répondre. Ces solutions sont généralement attachées à un domaine d'application particulier et correspondent à une problématique particulière, ce pourquoi nous proposons une classification des méthodes de représentation des systèmes complexes selon ces deux axes. Cela nous conduira à introduire notre démarche personnelle, aussi bien sur le plan graphique que sur le plan technique.

IV.1. QUELQUES SOLUTIONS PROPOSEES

Nous nous sommes momentanément éloignés des systèmes complexes pour explorer les questions liées à la construction, par le sujet, d'un modèle cognitif de ce qu'il voit. Il est temps maintenant d'y revenir pour examiner les solutions qui ont pu être proposées aux problèmes de représentation de ces systèmes, avant d'exposer les solutions que nous avons nous-mêmes développées.

IV.1.1. TYPOLOGIE DES REPRESENTATIONS DE SYSTEMES COMPLEXES

Comme nous l'avons souligné à la section II.3, la question de la représentation est essentielle aussi bien dans une perspective d'*analyse* et de *conception* de systèmes, que dans une perspective de *contrôle* et de *commande*. Cependant, la grande diversité des systèmes, et les différents niveaux de complexité qui les caractérisent, se traduisent par une grande diversité de moyens ou solutions de représentation. L'analyse de ces solutions montre qu'elles sont fortement dépendantes du système, et plus particulièrement de la (des) forme(s) que prend la complexité dans ce système, mais également de la « culture » du domaine concerné et des objectifs associés à la représentation. Nous avons donc entrepris de faire un tour d'horizon rapide des méthodes utilisées dans différents contextes afin d'en extraire les éléments les plus importants et aussi de pointer les insuffisances et les carences de ces méthodes pour aborder et prendre en charge la complexité de certains systèmes. Pour ce faire, nous avons choisi de classer les systèmes complexes selon les deux axes qui nous semblaient les plus pertinents et les plus discriminants vis à vis de la représentation visuelle (voir Tableau IV.1) : d'une part la problématique adoptée pour l'utilisation de l'interface (analyse/conception ou contrôle/commande) ; d'autre part la nature du système (systèmes physiques et techniques, ou systèmes sociaux et système d'information).

De même que toute classification, celle-ci est à la fois partielle et partiale. Partielle, elle ne prétend pas rendre compte de tous les systèmes possibles. Elle s'accommode mal, en outre, de cas intermédiaires entre les types qu'elle distingue. Partiale, elle se fonde sur le choix de deux critères parmi d'autres (pourquoi seulement deux, pourquoi ceux-là ?) pour expliquer la difficulté plus ou moins grande liée à la représentation des systèmes complexes. Il ne s'agit donc pas d'établir une classification exhaustive et définitive des systèmes complexes, mais seulement de faciliter l'analyse de ce qui rend la représentation de tels systèmes difficile.

Problématique / Nature	Analyse / Conception	Contrôle / Commande
Physique / Technique	Simulations (physique, chimie) Programmation parallèle	Systèmes industriels
Information / Social	Simulations (écologie, sociologie, économie, etc.)	Navigation sur le Web Travail coopératif Gestion de crise

Tableau IV.1 – Classification de quelques systèmes complexes en fonction de la problématique d'interface et de la nature du système.

Le premier axe choisi reprend la distinction que nous avons établie à la section II.3.2 entre problématique d'analyse et de conception d'une part, problématique de contrôle et de commande d'autre part. Si, dans une perspective d'analyse, il est important de rendre compte efficacement du fonctionnement du système, il peut être suffisant, dans une perspective de contrôle, de rendre compte de ses dysfonctionnements. Ce qui signifie que l'on ne portera pas le même regard sur le système dans l'un ou l'autre cas. Le deuxième axe reprend quant à lui, en la modifiant légèrement, la classification des systèmes complexes établie par M. Bunge (voir figure II.2), et sa distinction entre systèmes vivants et non vivants. Les systèmes artificiels, bien que conçus par des systèmes vivants (l'homme en l'occurrence), sont considérés du point du vue des interfaces comme de simples systèmes mécaniques, et nous les avons donc placés du côté des systèmes non vivants. Cette distinction entre systèmes techniques et systèmes sociaux nous semble importante car, s'il est relativement facile d'identifier de manière automatique les dysfonctionnements techniques d'un système industriel (une variable qui sort de son domaine de fonctionnement normal par exemple), cela est impossible dès que le fonctionnement du système dépend de l'intervention d'opérateurs humains dont le comportement est au moins en partie imprévisible. Cette imprévisibilité tient en particulier à ce que H. Simon nomme la *rationalité limitée* [Simon 1991], qui implique que les décisions prises ne correspondent pas nécessairement à un choix optimal.

IV.1.2. ANALYSE-CONCEPTION / SYSTEMES PHYSIQUES ET TECHNIQUES

Cette catégorie recouvre notamment les exemples de simulation de phénomènes physiques ou chimiques, pour lesquels on cherche à obtenir, par la visualisation, une meilleure compréhension des mécanismes impliqués. La forme que prend la visualisation dépend alors de la méthode de simulation utilisée. Un automate cellulaire, un système dynamique• ou un système multi-agent ne pourront pas être représentés sous une forme identique, même s'ils modélisent le même phénomène (voir la figure IV.4 pour un exemple dans le cas d'un système biologique de proies et de prédateurs). Le cas le plus simple est celui des automates cellulaires, qui sont eux-mêmes des images puisqu'ils correspondent à une grille de cellules, chaque cellule pouvant être associée à une couleur particulière. Aucun effort de visualisation n'est donc nécessaire, sauf peut-être pour choisir les couleurs utilisées. Les systèmes dynamiques correspondent à une autre méthode de simulation, par laquelle le système est modélisé par un vecteur de *n* variables d'état qui évolue au cours du temps. La visualisation concerne alors la représentation d'un espace à *n* dimensions en fonction du temps [Löffelmann et Gröller 1998 ; Wegenkittl et al. 1997], ce qui devient notoirement compliqué dès que l'on dépasse trois dimensions. En outre, le lien entre l'évolution d'un vecteur de variables d'états et l'évolution d'un système risque d'être particulièrement difficile à effectuer. Enfin, la simulation multi-agent modélise les phénomènes en les décomposant en un ensemble d'éléments dont elle reproduit les comportements et les interactions par l'intermédiaire d'autant d'agents. Il y a donc un isomorphisme naturel entre le phénomène étudié et son modèle, ce qui rend la visualisation elle aussi naturelle [Servat et al. 1998]. Le travail de visualisation peut consister, dans certains cas, à rendre visible l'état interne des agents pour rendre perceptible l'émergence de structures globales, des lignes de force dans un tas de sable par exemple [Breton et al. 1999].

Dans cette catégorie rentrent également les programmes informatiques parallèles ou distribués. Il s'agit cette fois de mettre au point des programmes composés d'un ensemble de processus qui interagissent les uns avec les autres dans la réalisation d'une tâche donnée. En plus de vérifier la bonne exécution de chaque processus, il est donc nécessaire de s'assurer de la bonne interaction des processus les uns avec les autres. Le moyen le plus utilisé pour ce faire consiste à dérouler l'historique des différents processus en explicitant les appels entre processus (voir figure IV.1).

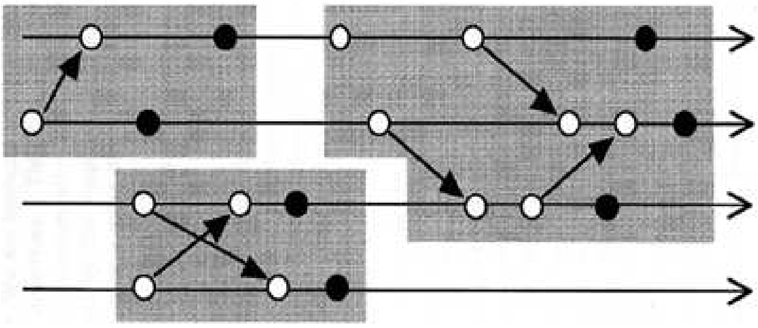


figure IV.1 – Visualisation de processus distribués [Hart et al. 1997].

IV.1.3. CONTROLE-COMMANDE / SYSTEMES PHYSIQUES ET TECHNIQUES

Cette catégorie concerne principalement les systèmes industriels complexes (usine, avion, etc.), dont il faut contrôler le fonctionnement, ou, plus exactement, dont il faut prévenir les dysfonctionnements. Il s'agit essentiellement pour l'opérateur de maintenir un certain nombre de variables dans leurs intervalles de fonctionnement respectifs. Pour ce faire, on propose donc à l'opérateur de suivre individuellement les valeurs de ces variables par des histogrammes, des cadrans, des compteurs, des courbes, etc., ou de contrôler les relations entre ces variables par des affichages synoptiques (voir figure IV.2) qui fournissent à l'opérateur une représentation graphique proche de la représentation physique et concrète du procédé ou d'une partie de celui-ci [Kolski 1997]. Cela implique naturellement que ce procédé ait une structure connue à l'avance et qui n'évolue pas au cours du temps.

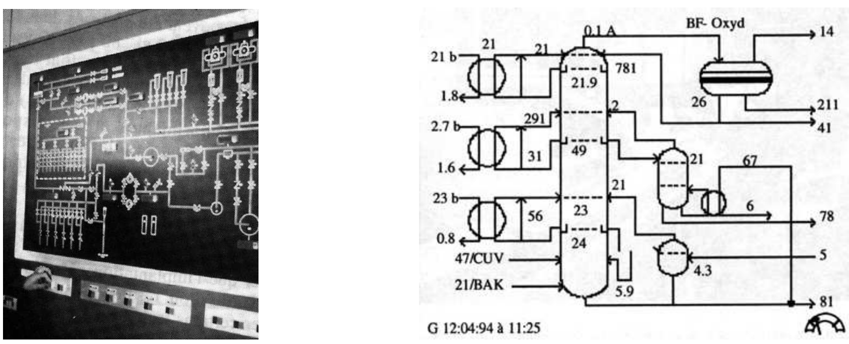


figure IV.2 – Affichages synoptiques pour des systèmes industriels complexes (d'après [Kolski 1997]).

De nouvelles techniques d'affichage se développent qui visent à la représentation sous forme synthétique d'un ensemble de données afin de détecter aisément une anomalie sur l'une de ces données. C'est le cas par exemple des méthodes d'affichage « étoile » [Coekin 1968], MDD (Mass-Data-Display) [Zinser 1993], ou encore des visages de Chernoff [Chernoff 1973] et leurs versions dérivées (figure IV.3).

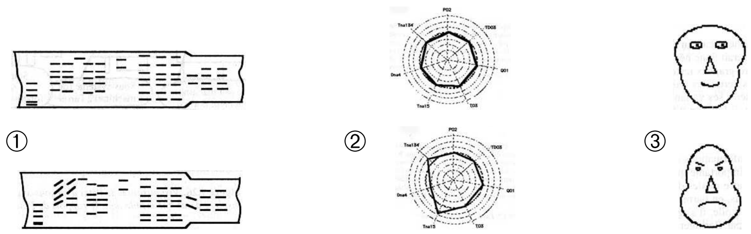


figure IV.3 – Techniques d'affichage synthétiques pour les systèmes industriels complexes. Situation normale (en haut) et anormale (en bas) pour : ① la méthode MDD ; ② la méthode « étoile » ; ③ les visages de Chernoff (d'après [Kolski 1997]).

IV.1.4. ANALYSE-CONCEPTION / SYSTEMES D'IDEES ET SYSTEMES SOCIAUX

Cette problématique d'analyse et de conception appliquée aux systèmes sociaux concerne avant tout la simulation de ces systèmes. De même que pour la simulation de systèmes physiques, la méthode de simulation choisie conditionne fortement le type de représentation qu'il sera possible de proposer (figure IV.4).

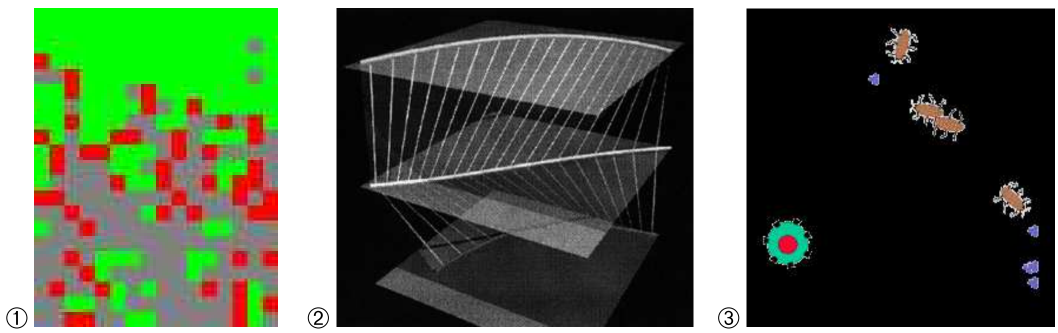


figure IV.4 –Visualisation d'un système de proies et de prédateurs : ① automate cellulaire ; ② système dynamique ; ③ système multi-agent.

Par rapport aux automates cellulaires et aux systèmes dynamiques pour lesquels les solutions de représentation sont très limitées et contraintes, les simulations multi-agents autorisent l'utilisation d'un large éventail de méthodes de visualisation. Le plus simple, dans le cadre d'une simulation biologique, consiste évidemment à représenter les organismes vivants tels qu'ils apparaîtraient en réalité (voir figure IV.5).

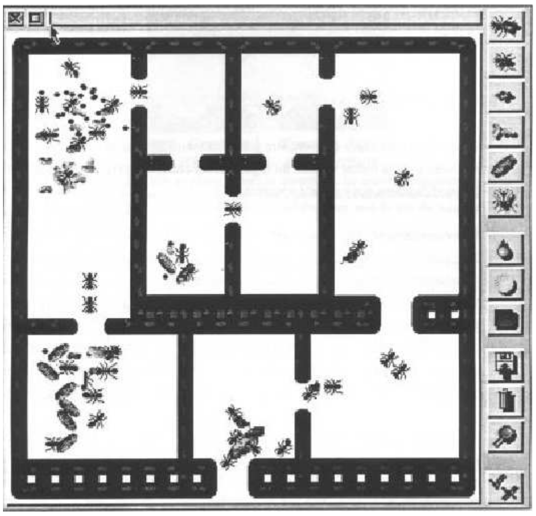


figure IV.5 – Image d'écran du système MANTA [Drogoul 1993]. La représentation reproduit le plus fidèlement possible l'image de la fourmilière que le système modélise.

Cela revient, pour un observateur, à avoir sur le système multi-agent le même regard que celui qu'il pourrait avoir sur un système naturel, observant les comportements individuels des agents du système d'un point de vue extérieur. L'intérêt d'une telle représentation est qu'elle permet de valider qualitativement les simulations effectuées en comparant l'aspect visuel de la simulation avec celui du système réel. En revanche, l'observateur n'a pas accès à l'état interne des agents et doit inférer, deviner les interactions entre les agents à partir de ses observations.

Plutôt que de se centrer sur les agents, d'autres méthodes de représentation adoptent une approche plus « sociologique », et abordent le problème d'un point de vue organisationnel en s'intéressant aux aspects structurels et dynamiques des organisations qui résultent des interactions entre les agents. Ces représentations prennent généralement la forme de graphes de relations figurant les interactions entre agents [Proton et al. 1997 ; Parunak 1996], offrant une vision plus globale des systèmes et de leur structure (voir figure IV.6).

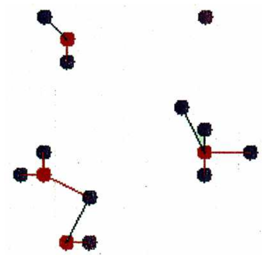


figure IV.6 – Visualisation par graphe de relations d'un système modélisant une société de chasseurs et d'agriculteurs (d'après [Proton et al. 1997]).

IV.1.5. CONTROLE-COMMANDE / SYSTEMES D'IDEES ET SYSTEMES SOCIAUX

Cette dernière catégorie concerne la visualisation de systèmes sociaux, ou de systèmes d'idées, en vue de permettre à un observateur de se positionner par rapport au système qu'il observe, et donc d'agir sur ou dans ce système. Cela concerne principalement l'usage du Web•. Le Web peut en effet être considéré comme un système d'idées en perpétuelle évolution, modelé par les personnes qui l'alimentent en information, qui modifient ou qui propagent cette information à la manière de mèmes• [Dawkins 1989]. Un certain nombre de systèmes de visualisation essaient ainsi de rendre compte de manière continue de l'organisation de cette information en pages, en sites, en réseaux, et de son évolution [Chi et al. 1998 ; Terveen et Hill 1998]. Par ailleurs, le Web est un espace social au sein duquel les utilisateurs peuvent se rencontrer, échanger. Il est ainsi possible de visualiser en continu les « mouvements » des personnes visitant des sites [Minar et Donath 1999]. Le visiteur d'un site a alors la possibilité de voir où se trouvent les utilisateurs présents sur le même site, donc savoir où se trouvent les pages, sinon les plus intéressantes, du moins les plus visitées (figure IV.7).

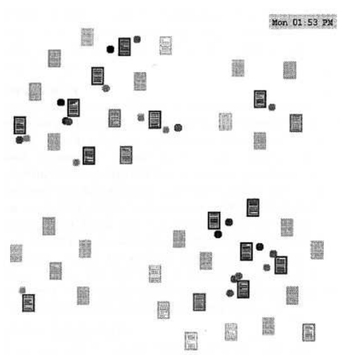


figure IV.7 – Visualisation des utilisateurs visitant un site Web (d'après [Minar et Donath 1999].

IV.2. NOTRE DEMARCHE

Avant de décrire le système développé d'un point de vue technique, il est utile de préciser certains des choix de conceptions que nous avons effectués, même si ceux-ci transparaissent inévitablement dans l'exposé qui a précédé.

IV.2.1. PRINCIPES GENERAUX

Notre problème est de faire l'interface entre un système dont on récupère en temps réel un flux de données traduisant son fonctionnement, et un observateur humain qui veut comprendre quelque chose de ce fonctionnement ou avoir une idée de son état présent. A cet effet, deux opérations doivent être réalisées, largement dépendantes l'une de l'autre (figure IV.8).

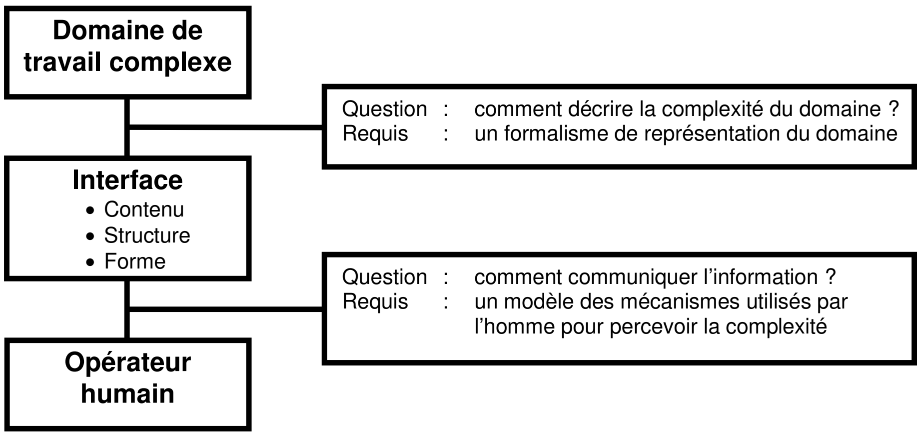


figure IV.8 - Problème de conception d'interface (d'après [Vicente et Rasmussen 1992]).

La première opération consiste à filtrer, réorganiser les données de manière à laisser de côté les détails inutiles et mettre en valeur ceux qui sont importants. Ceci nécessite de posséder, ou à défaut de construire, un modèle du phénomène à visualiser [Vicente et Rasmussen 1992]. La seconde opération concerne la transformation de ces données en une représentation visuelle et/ou sonore qui traduise les relations entre les données, mais également leurs différents degrés d'importance. Il s'agit donc de transcrire une hiérarchie de données ou d'événements en une hiérarchie picturale. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un modèle de la perception, par un observateur, de données complexes, modèle dont nous avons évoqué quelques unes des caractéristiques à la section III.2.

En pratique, le processus de conception d'interface n'est pas aussi séquentiel que la figure IV.8 pourrait le laisser penser, la manière de décrire la complexité du domaine pouvant varier en fonction de la manière de communiquer l'information. Par ailleurs, contrairement aux affichages synoptiques (voir figure IV.2) qui présentent une vision statique de la structure du système à représenter, nous nous intéressons à la construction dynamique de l'interface, afin de prendre en compte l'évolution en temps réel de cette structure. Cela nous a conduit à adopter une démarche par laquelle les connaissances que l'on possède du système à représenter sont utilisées en même temps que les connaissances que l'on a de la manière dont la complexité est perçue par un utilisateur, pour filtrer et réorganiser les informations (figure IV.9).

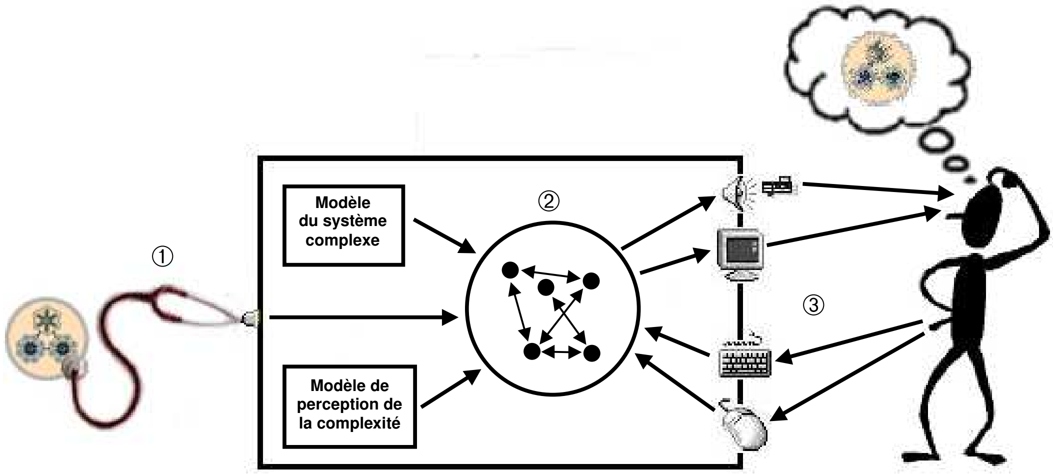


figure IV.9 – Schéma global du système d'interface : ① l'information est récupérée depuis le système complexe à observer ② elle est intégrée dans un modèle qui filtre et réorganise les données, tenant compte à la fois des spécificités du système à représenter et de celles de l'utilisateur ③ ce dernier perçoit le modèle et peut intervenir dessus.

IV.2.2. LES SYSTEMES MULTI-AGENTS COMME SYSTEMES D'INTERFACE

L'outil à développer se devait donc d'être à la fois suffisamment puissant et suffisamment souple pour permettre la mise en place de cette chaîne de transformations de système complexe en système complexe, depuis le système à observer jusqu'à son image en passant par son modèle informatique. De ce point de vue, les systèmes multi-agents présentent certaines caractéristiques intéressantes par rapport à d'autres techniques, que nous allons maintenant détailler.

IV.2.2.1. Les systèmes multi-agents

Dans « système multi-agents », il y a système. En première approximation, on parlera donc d'un ensemble organisé d'*agents* en interaction. En construisant de tels systèmes, l'objectif est double [Ferber 1995] : étudier d'une part les mécanismes d'auto-organisation, notamment par la modélisation et la simulation de phénomènes naturels ; concevoir d'autre part des systèmes artificiels capables de résoudre des problèmes distribués, par la mise en œuvre au sein d'un ensemble d'agents, d'une dynamique organisationnelle, permettant l'accomplissement collectif d'une tâche. Le postulat de base est que des agents, de par leurs comportements et interactions locales, peuvent donner lieu, à un niveau global, à un comportement d'ensemble cohérent et fonctionnel [Steels 1991].

D'un point de vue métaphorique, on peut comparer un agent à un organisme vivant. C'est une *entité autonome*, autonomie à la fois vis à vis d'un utilisateur humain [Ferber 1995] et vis à vis de l'environnement dans lequel il est plongé [Drogoul 1993]. Pour assumer cette autonomie, un agent va disposer de *ressources* qui lui sont propres et de capacités de *perception* et d'*action* dans son environnement, qui lui permettent d'interagir avec d'autres agents. Une interaction sera considérée comme une communication réciproque entre agents, une communication étant elle-même « envisagée comme une action pour celui qui la transmet et comme une perception pour celui qui la reçoit » [Drogoul 1993]. A un niveau supérieur, l'interaction établit de manière dynamique des relations entre agents, ce qui peut conduire à la création de groupes et de structures organisationnelles. Il faut noter qu'on ne fait là aucune hypothèse quant aux types de ressources, d'actions ou de perceptions dont disposeront les agents.

IV.2.2.2. Les systèmes multi-agents comme outils de modélisation

Que les phénomènes complexes que l'on souhaite visualiser soient réels ou virtuels, il est nécessaire de posséder un modèle de ce que l'on veut représenter, afin de pouvoir filtrer les données avant de les représenter. Dans le cas de systèmes virtuels, il va de soi que l'on possède un tel modèle puisque c'est précisément ce que l'on cherche à visualiser. Dans le cas de systèmes réels, la situation est moins tranchée. S'il s'agit de processus industriels à contrôler, il est bien évident que l'on devra posséder un modèle du processus, permettant d'analyser les causes ou de prévoir les conséquences d'éventuels dysfonctionnements. S'il s'agit par contre de communautés virtuelles sur le Web, il est impossible de connaître a priori le comportement des personnes qui participent à ces communautés, et il est simplement impossible de connaître à l'avance ces personnes puisque chacune va et vient à son gré. Tout modèle devra donc être construit et adapté au fur et à mesure.

> *« Toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties. »*
>
> *B. Pascal*

Les systèmes multi-agents sont de plus en plus largement utilisés pour la modélisation de phénomènes complexes de toutes natures : physiques (pour l'étude du ruissellement [Servat et al. 1998] ou de la propagation de lignes de fracture), chimiques ([McMullin et Varela 1997]), biologiques (biologie moléculaire [Kitano et al. 1997], simulation d'insectes sociaux [Hogeweg 1988], [Deneubourg et al. 1992]), écologiques (études de sociétés de chasseurs agriculteurs [Bousquet 1994]), linguistiques (étude de l'émergence du langage [Steels 1996]) ou encore sociologiques et économiques ([Gilbert et Conte 1995]).

La méthode adoptée pour ce faire est médiane entre la méthode analytique, qui réduit un système à ses éléments qu'elle étudie de manière séparée, et la méthode systémique, qui s'intéresse aux systèmes d'un point de vue global, soit comme un vecteur de variables décrivant l'état du système [von Bertalanffy 1993], soit comme une boîte noire avec des entrées et des sorties qui assurent un certaine fonction [Simon 1991]. Comme la méthode analytique, les systèmes multi-agents étudient les systèmes en les décomposant en leurs éléments constituants. Comme la méthode systémique, ils considèrent les phénomènes dans leur entier, c'est-à-dire en n'étudiant pas les éléments indépendamment les uns des autres, mais au contraire dans leurs interactions mutuelles. La simulation multi-agent fait ainsi sienne la pensée de Pascal en exergue au début du paragraphe, dans une démarche constructiviste qui vise à la « re-construction » du phénomène étudié dans toute sa complexité[18].

[18] On pourra trouver dans [Drogoul 1993] et dans [Ferber 1995], une bonne comparaison des différentes méthodes de simulation.

IV.2.2.3. Les systèmes multi-agents comme outils de conception graphique

> *« Il y a une loi de la construction dont l'analyse nous montre qu'elle est suivie aussi bien par la nature que par l'art : les différentes parties deviennent vivantes par l'ensemble. Autrement dit, effectivement, la construction est une organisation. »*
>
> *P. Sers [Kandinsky 1991]*

Si la perception opère par la mise en relation de formes colorées les unes avec les autres, la composition picturale consiste, symétriquement, à organiser ces éléments picturaux de manière à orienter la perception de telle ou telle manière. C'est ce que rappelle P. Sers en introduction au travail de W. Kandinsky [Kandinsky 1991]. P. Klee souligne également que "la composition elle-même (...) est bien davantage que les parties et réclame une élaboration plus complexe. La norme de la composition est l'ensemble constitué par le fonctionnement coordonné des organes". L'œuvre picturale, et plus généralement l'image, serait donc une organisation, un organisme, dont les organes seraient les formes et les couleurs qui la composent. Rien n'empêche, dès lors, de modéliser et de simuler cet organisme en décrivant les formes et les couleurs que peuvent prendre ses éléments primaires, et en explicitant la manière dont ces formes interagissent les unes avec les autres.

C'est l'approche que l'on trouve par exemple dans [Ishizaki 1996], qui considère la construction d'une interface pour la visualisation dynamique de groupes de discussion ou de courrier électronique, comme l'activité coordonnée d'un ensemble d'agents qui improvisent à la manière de danseurs ou de musiciens. Les agents déterminent leur aspect et leur position en fonction de l'importance des informations qu'ils ont à transmettre, et en fonction également de l'aspect et de la position des autres agents. C'est une démarche similaire que nous avons suivie, par laquelle l'image du système résulte, à chaque instant, de l'activité coordonnée d'un ensemble d'agents en interaction.

IV.2.3. LA DEMARCHE GRAPHIQUE

Ces images que le système d'interface sera amené à construire, nous souhaitions leur donner l'aspect le plus naturel possible, répondant en cela à une démarche artistique ; naturel mais pas réaliste ni même nécessairement figuratif, préférant transmettre par une ambiance graphique et sonore une connaissance intuitive de l'état du système. Ce faisant, nous voulions étudier dans quelle mesure une représentation « artistique » d'un système complexe était susceptible de fournir une compréhension de ce système. Pour cela, l'idée est de s'inspirer des travaux des premiers peintres abstraits, en particulier W. Kandinsky [Kandinsky 1989 ; Kandinsky 1991], P. Klee [Klee 1985] ou encore K. Malévitch [Malévitch 1994], dans leurs tentatives pour établir une syntaxe et une sémantique des formes, des couleurs et de leurs interactions réciproques, de manière à formaliser les règles de composition des éléments de base, s'inspirer également des travaux des constructivistes russes [Malévitch 1994] dans leurs efforts pour traduire dans leurs constructions la structure du monde réel. Toutes ces recherches cependant, même celles de W. Kandinsky (qui est allé le plus loin dans son étude des qualités perceptives dites « primaires » des formes et des couleurs), n'ont pas pu aller très loin dans l'étude des interactions entre ces qualités primaires.

Il faut donc se tourner vers la psychologie de la Gestalt et son étude de la perception des formes (infra VII.2.1.2) et des principes d'organisation perceptive (infra VII.2.2.2 et VII.2.3.2) pour avoir des éléments permettant de comprendre la perception de structures globales dans une image. L'idée est cette fois-ci d'essayer d'exploiter ces principes d'organisation perceptive pour traduire l'organisation d'un système plutôt que d'utiliser des représentations sous forme de graphe comme celle de la figure IV.6. On peut avancer qu'un graphe de ce type permet de figurer une structure de manière plus directe et plus efficace, en explicitant les interactions entre éléments du système. Nous ne le contestons pas mais il faut souligner que ce genre de représentations devient souvent confus à partir du moment où le nombre d'éléments devient important. Il s'agit donc de figurer « virtuellement » les interactions entre éléments en jouant sur leur proximité, sur des similitudes ou contrastes de forme ou de couleur, etc.

Enfin, nous nous intéressons à l'utilisation de la perception périphérique par la construction d'un affichage « ambiant », qui ne sollicite pas toute l'attention de l'utilisateur. Nous percevons le temps qu'il fait en regardant le ciel et en consultant un thermomètre, mais nous en avons également une perception intuitive de par l'ambiance lumineuse ainsi que de tout un ensemble de petits détails que nous ne percevons pas consciemment mais qui contribuent à construire notre expérience de la météorologie. L'idée est donc de reconstruire une ambiance colorée [Ishii et Ullmer 1997] ou sonore [Gebhardt 1994] qui permette une perception intuitive d'une situation globale ou de certains événements particuliers. Ce faisant, la démarche consiste à proposer des représentations utilisant au maximum les niveaux de perception les plus bas, c'est-à-dire le niveau neuro-sensoriel par lequel les primitives visuelles sont extraites du signal visuel, et le niveau perceptif par lequel des formes sont perçues comme distinctes du fond.

IV.3. UNE PLATE-FORME DE CONCEPTION MULTI-AGENT

Nous avons jusqu'à présent abordé la question d'un point de vue très général, point de vue qui s'est traduit par la conception d'un outil lui-même très général, véritable plate-forme de création de systèmes multi-agents, en liaison d'une part avec des ensembles quelconques de données, et d'autre part avec un ou plusieurs utilisateurs. La figure IV.9 présentait une vision « conceptuelle » de l'interface entre un système complexe et un utilisateur. Nous allons maintenant nous attacher à en donner une vision « pratique ». Pour comprendre la manière dont s'est opéré ce passage de la théorie à la pratique, nous commencerons par rappeler le contexte dans lequel il a eu lieu, ce qui nous permettra, dans un premier temps, de mettre en évidence les principaux choix de conception, et dans un deuxième temps, de montrer l'articulation de ces choix au sein d'une solution générale et cohérente.

IV.3.1. CONTEXTE DE DEVELOPPEMENT

Initialement, la plate-forme a été développée pour servir de support au projet artistique *Le Jardin des Hasards*, qui constitue un jardin *virtuel* évoluant de manière continue sous les effets de la météorologie *réelle* d'un lieu particulier et avec lequel il est possible d'interagir (supra I.1.3). Travaillant en collaboration étroite avec un artiste, il était important de lui permettre d'expérimenter librement différents processus de génération des images. Il fallait donc concevoir un outil de création de tels jardins et non un jardin particulier, ce qui nous a conduit à développer une plate-forme de conception de systèmes multi-agents plutôt qu'un système multi-agent spécifique. De manière plus précise, cela signifie que nous nous sommes efforcés de faire un minimum d'hypothèses concernant la nature d'un agent ou de son environnement, laissant le soin à l'utilisateur de choisir les agents qu'il souhaite voir évoluer et de définir leur comportement, par l'intermédiaire d'un langage de script adjoint à la plate-forme. En cela, la démarche est proche de celle de l'environnement StarLogo [Resnick 1991b], dans lequel un langage de programmation très simple permet d'expérimenter les mécanismes à l'origine de phénomènes collectifs, en décrivant le comportement d'un individu et en dupliquant ce comportement sur un nombre arbitrairement grand d'individus.

Puisqu'il s'agissait de reproduire l'évolution d'un jardin, le modèle d'agent choisi est particulièrement simple, concernant aussi bien les capacités de représentation des agents que leurs capacités de communication, adoptant en cela une conception plus

« réactive• » que « cognitive• » [Drogoul 1993]. Nous verrons par la suite qu'il est pourtant possible, sur la base de ces capacités minimales, de concevoir des comportements très complexes grâce au langage de script.

Par ailleurs, ce *jardin* est conçu comme une interface entre un système météorologique et un utilisateur humain. C'est donc un système ouvert qui doit pouvoir échanger de l'information avec le monde qui l'entoure, et notamment avec d'éventuels utilisateurs humains. De ce point de vue, système météorologique et utilisateur humain ne sont pas si différents qu'on pourrait le croire. Le premier influence le *jardin* par l'intermédiaire des données numériques qui le caractérisent, température ou précipitations par exemple. Le second interagit grâce à des périphériques d'interface, clavier ou souris, qui eux-mêmes transmettent au jardin des données traduisant son activité. Dans un cas comme dans l'autre, le *jardin* reçoit des données d'un système qui lui est extérieur et chaque agent du *jardin* peut y réagir d'une manière qui lui est propre.

Enfin, jouer le rôle d'interface signifie également transmettre de l'information, en plus d'en recevoir. *Le Jardin des Hasards* est destiné à restituer, pour le spectateur, l'ambiance climatique d'un lieu particulier. L'image que le système multi-agent, et avec lui chaque agent, donne de lui-même, est fondamentale dans ce contexte. Une attention particulière a donc été apportée aux capacités de « concrétisation » des agents, c'est-à-dire les moyens dont ils disposent pour manifester leur présence de manière sensible, soit en s'affichant sous forme visuelle, soit en émettant des sons.

IV.3.2. ARCHITECTURE GENERALE

Ces différentes contraintes ont abouti à l'élaboration d'une architecture permettant la mise en œuvre flexible de systèmes multi-agents ouverts, en interaction avec un ou plusieurs autres systèmes, utilisateurs humains compris. La figure IV.10 en montre l'organisation globale. Elle met en évidence la distinction entre deux types d'agents : d'une part des agents que l'on pourrait qualifier d'*agents d'information*, dont le rôle est de récupérer des données en provenance d'un système complexe, l'utilisateur étant lui-même considéré comme un système complexe dont il s'agit de surveiller les actions ; d'autre part des agents constituant ensemble ce qui, dans l'exemple du *Jardin des Hasards*, s'apparente à un jardin virtuel, mais qui peut prendre potentiellement n'importe quelle forme. Le rôle de ces derniers agents, que l'on qualifiera d'*agents de simulation*, est de filtrer et de réorganiser le flux de données transmis par les agents d'information afin d'en construire, à destination de l'utilisateur, une représentation visuelle et/ou sonore.

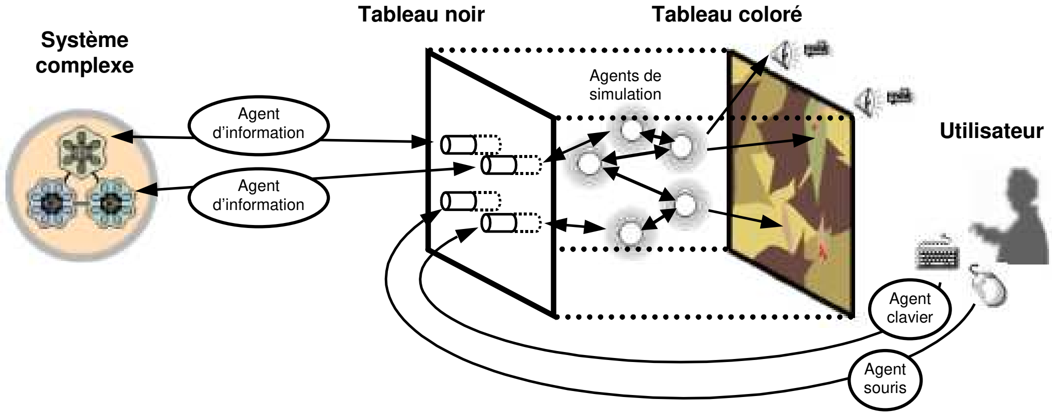


figure IV.10 – Architecture générale de la plate-forme de conception de systèmes multi-agents.

Agents d'information et de simulation peuvent communiquer par l'intermédiaire d'une structure de données commune sur laquelle les premiers peuvent écrire des informations que les seconds peuvent lire, comme dans le cas des tableaux noirs [Engelmore et Morgan 1988]. Chaque agent d'information peut y déposer des données dans un tableau qui lui a été réservé (infra IV.3.4). Tous les agents, quels qu'ils soient, ont accès à ces données mais ce sont les agents de simulation qui ont vocation à les lire et les traiter. Ces derniers évoluent dans un environnement simulé. Construits sur le modèle d'organismes végétaux ou animaux, ils disposent de ressources propres, peuvent émettre des signaux dans leur environnement, et sont capables d'effectuer des actions ou de prendre des décisions en réponse à ce qu'ils perçoivent (infra IV.3.5). Finalement, ces agents ont accès à leur propre représentation graphique et peuvent la modifier de manière à informer l'utilisateur de leur identité, d'éventuelles modifications de leur état interne, des actions qu'ils sont en train d'effectuer, etc. Les agents de simulation concourent ainsi à la composition d'images avec lesquelles l'utilisateur peut interagir. Grâce à deux agents dédiés à la gestion du clavier et de la souris, les agents de simulation sont renseignés sur l'activité de l'utilisateur et peuvent donc y réagir. Suivant la manière dont les agents de simulation ont été conçus, l'utilisateur peut déplacer des agents, modifier leurs ressources, inhiber certains de leurs comportements ou encore en activer d'autres.

IV.3.3. UNE BASE COMMUNE

La plate-forme que nous avons développée et utilisée peut donc être considérée à la fois comme un système d'information, un système de simulation multi-agent et un système d'interface. Ces trois fonctions ne correspondent pas, en pratique, à une séparation aussi nette, puisque toutes trois sont prises en charge par des agents qui possèdent les mêmes capacités de base. Nous allons maintenant décrire cette structure commune. Sans rentrer dans tous les détails de la conception de la plate-forme, cette partie sera nécessairement plus technique. N'étant pas indispensable à la compréhension de la suite, elle peut être laissée de côté par les lecteurs que cet aspect technique pourrait rebuter.

IV.3.3.1. Principe général

La caractéristique la plus importante pour comprendre ce qui suit réside dans la « philosophie » qui a présidé à la conception de la plate-forme. En particulier, nous avons souligné l'importance accordée à la conception d'un outil de création ouvert plutôt que d'un système dédié, sans possibilités d'évolution. Ceci s'est traduit par une conception objet[19] dans laquelle un agent correspond à une classe très simple, comprenant seulement quelques structures de données génériques et vides, et des méthodes pour les manipuler. Pour créer un système multi-agent particulier, l'utilisateur doit compléter la classe d'agent en précisant les « connaissances » d'un agent et les comportements lui permettant de les manipuler, d'agir dans son environnement ou encore d'interagir avec d'autres agents.

La deuxième contrainte était que ce processus de création d'un système multi-agent particulier soit accessible à des non-informaticiens. Dans un premier temps, cette contrainte s'est exprimée par un paramétrage de certaines des caractéristiques d'un agent, paramétrage accessible par l'intermédiaire d'un fichier de configuration. Dans un deuxième temps, en raison du nombre de caractéristiques qui devenaient exprimables par ce fichier de configuration, le paramétrage initial s'est progressivement transformé en un véritable langage de programmation. A la manière de StarLogo

[19] Pour des raisons d'efficacité, liées notamment à la génération d'animations dont il était important, dans un contexte artistique, qu'elles soient aussi fluides que possible, le langage choisi pour l'implémentation de la plate-forme est le C++ [Schildt 1998]. Pour conserver par ailleurs un bonne portabilité à travers différentes machines, la plate-forme a été développée sous Linux.

[Resnick 1991b], ce langage offre la possibilité d'expérimenter rapidement des mécanismes collectifs basés sur les interactions d'agents aux comportements très simples, et il permet également la définition de comportements plus compliqués (se reporter à l'annexe A pour une description de la syntaxe du langage).

Le processus permettant de passer du fichier de configuration, écrit avec le langage de script, au système multi-agent opère en deux grandes étapes (voir figure IV.11). La première d'entre elles consiste à interpréter[20] le fichier de manière à en extraire la définition d'un certain nombre de familles d'agents, définition concernant aussi bien les ressources des agents de chaque famille que leurs comportements. A l'issue de cette étape, chaque famille est représentée par un agent de définition qui constitue le modèle selon lequel seront construits tous les agents de la famille[21]. La deuxième étape consiste à instancier ces agents de définition en autant d'agents que nécessaire et à confier ces agents à l'ordonnanceur, chargé de gérer leur exécution ultérieure.

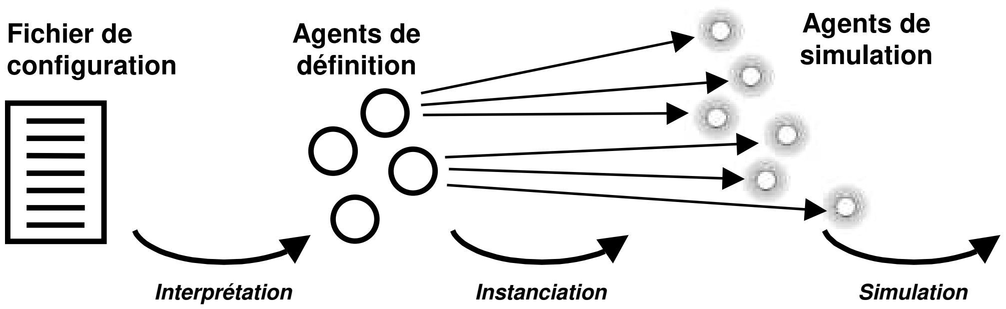


figure IV.11 – Processus d'interprétation et d'instanciation conduisant d'un fichier de configuration contenant la description d'un système multi-agent au système lui-même.

IV.3.3.2. L'ordonnanceur

Les agents n'étant pas, d'un point de vue informatique, des processus autonomes, ils dépendent, pour leur exécution et leur activation, d'un ordonnanceur dont le rôle est double : d'une part tenir à jour la liste des agents ; d'autre part organiser la bonne

[20] Afin de faciliter le processus d'interprétation, une première passe est effectuée par l'interprète du langage de script Tcl [Oustershout 1994]. Une deuxième passe est ensuite effectuée par un interprète spécifique à la plate-forme.

[21] Dans une démarche de conception objet, ces agents de définition correspondraient à des classes d'agents dérivées de la classe d'agent de base. En pratique, l'utilisation d'agents particuliers plutôt que de classes est liée aux limitations du langage C++ qui ne permet pas la définition dynamique de nouvelles classes, contrairement par exemple au langage Smalltalk [Goldberg et Robson 1989].

alternance et la synchronisation des activations des différents agents. La gestion de la liste des agents est nécessaire du fait de la possibilité dynamique d'ajouter ou de supprimer des agents. Chaque agent est en effet susceptible de se dupliquer et ainsi donner naissance à un nouvel agent de même type, ou au contraire d'interrompre son exécution. La deuxième fonction de l'ordonnanceur est de gérer l'activation des agents. Le principe de base consiste à parcourir la liste des agents et d'activer ceux qui doivent l'être, en fonction de leur période d'activation. Si l'on définit un *cycle* de simulation comme un parcours entier de la liste des agents, la *période d'activation* correspond au nombre de cycles entre deux activations successives.

IV.3.3.3. La structure de base d'un agent

Afin de permettre une gestion homogène des agents de la part de l'ordonnanceur, tous les agents héritent d'une classe commune `agent`. Celle-ci met en place les mécanismes de gestion des agents, par la définition d'attributs (numéro d'identification, période d'activation, âge) et de méthodes (initialisation, activation, terminaison, et également reproduction ou mort) très généraux. Un agent est par ailleurs défini par les *ressources* qu'il possède et les *comportements* qu'il peut exécuter.

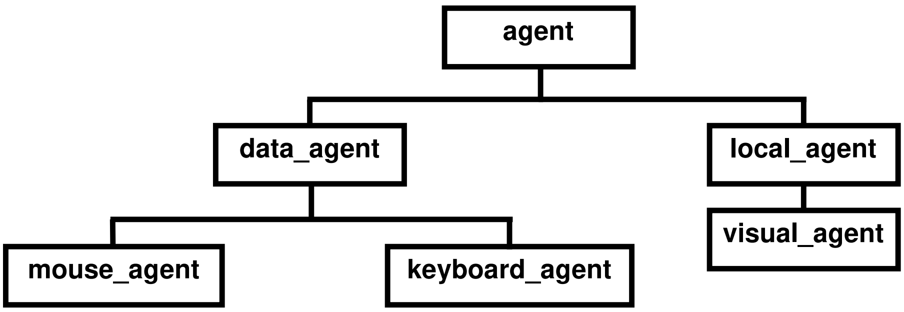


figure IV.12 – Hiérarchie des classes d'agents utilisées dans la plate-forme.

S'agissant des ressources, le terme doit être entendu dans une acception large, c'est-à-dire qu'il peut s'agir aussi bien de variables décrivant l'état interne de l'agent (la quantité d'eau, de matières minérales, d'énergie, etc. dans le cas de simulations écologiques), que de variables utilisées pour construire une certaine forme de représentation du monde pour les agents (des informations concernant l'environnement ou les autres agents par exemple). Au niveau de la plate-forme, la distinction n'est pas faite entre ces différents types de ressources, mais plutôt entre les différents types de variables (valeur numérique, textuelle, ou vecteur à deux dimensions), utilisables par l'agent, seules ou regroupées en tableaux.

Lorsqu'un agent est nouvellement créé, que l'ordonnanceur lui demande de s'activer, ou avant d'être supprimé, l'agent peut avoir un comportement autonome par lequel il peut exécuter des actions en réponse à ce qu'il perçoit de son environnement. Dans le même temps, il peut mettre à jour ses ressources et ses représentations afin de prendre en compte les modifications de cet environnement. Ces différents comportements sont programmés grâce au langage de script de la plate-forme, avant d'être traduits de manière interne au moment de l'interprétation du fichier de configuration. A titre d'exemple, la figure IV.13 reproduit la définition d'une famille d'agents telle qu'elle pourrait apparaître dans un fichier de configuration (se reporter à l'annexe A pour la description précise de la syntaxe du langage de script). Lorsqu'il est interprété, cet exemple génère un agent de définition pour la famille **`toto`**, instancié ensuite à deux exemplaires. Au cours de son exécution, chaque agent initialise à 0 une variable locale appelée `compteur`, compte jusqu'à 10 puis termine son exécution en affichant à l'écran un message et son numéro d'identification.

```
# déclaration de la famille « toto », de type agent, contenant 2 membres
family toto agent 2
end_family

# comportement à exécuter lors de la création de l'agent
init toto
  # initialisation d'une variable « compteur » à 0
  set compteur 0
end_init

# comportement courant, exécuté à intervalle régulier
activate toto
  # si la variable « compteur » est inférieure à 10, incrémenter la variable
  if {$compteur < 10}
    set compteur {$compteur + 1}
  # sinon l'agent « meurt »
  else
    die
  fi
end_activate

# comportement exécuté lors de la suppression de l'agent
end toto
  # affiche un message à l'écran indiquant le numéro d'identité de l'agent
  puts {'fin de l\'agent toto ' + $id}
end_end
```

figure IV.13 – Exemple de programmation d'un agent dans le langage de script de la plate-forme[22].

[22] le caractère # désigne le début d'une ligne de commentaires, les termes en gras sont des instructions ou des mots réservés du langage.

IV.3.3.4. La programmation des comportements

Le paragraphe précédent montrait un exemple de programmation élémentaire du comportement d'un agent dans le langage de script de la plate-forme. L'intérêt principal de ce langage est qu'il permet de programmer simplement et de manière homogène les comportements des différents agents de la plate-forme, depuis les agents d'information (infra IV.3.4) jusqu'aux agents de simulation et d'environnement (infra IV.3.5). De la sorte, il est très facile d'expérimenter rapidement différents modèles de comportement pour ces agents, et de visualiser les résultats obtenus en terme de dynamique organisationnelle.

Nous n'indiquerons ici que les caractéristiques essentielles de ce langage, l'annexe A en proposant la présentation détaillée. Le langage permet d'une part de paramétrer l'agent et de déclarer les variables qu'il peut manipuler, d'autre part de programmer ses comportements d'initialisation (**`init ... end_init)`**, d'activation (**`activate ... end_activate`**) et de terminaison (**`end ... end_end`**). L'écriture de ces comportements se base sur l'utilisation de variables et de primitives, combinées grâce à des structures de contrôle, selon des principes classiques de programmation impérative.

Les variables sont d'une part ce que nous avons désigné au paragraphe IV.3.3.3 comme les ressources de l'agent, d'autre part des variables désignant des signaux émis par d'autres agents, ou décrivant l'état de l'environnement (infra IV.3.5). En outre, chaque classe d'agent de la plate-forme possède des attributs incorporés au langage de script sous la forme de variables réservées (par exemple, le numéro d'identification d'un agent est accessible par l'intermédiaire de la variable **`id`**). Les agents peuvent consulter la valeur de ces différentes variables, ou les modifier par l'opération d'affectation (**`set`**). Outre qu'elle permet de décrire finement la gestion des ressources et des représentations des agents, l'utilisation de ces variables permet également à des agents localisés dans l'environnement de modifier leur position ou leur vitesse (infra IV.3.5 et annexe A), à des agents colorés de modifier leur couleur (infra IV.3.6.1 et annexe A), etc. De manière plus générale, on peut considérer l'aspect visuel d'un agent comme une ressource. Au même titre que n'importe quelle autre ressource, il sera donc possible, pour un agent, de la manipuler et de la modifier.

Par ailleurs, la manipulation de ces variables permet de mettre en place une communication élémentaire entre les agents, qui peut prendre au moins trois formes différentes :

- en utilisant l'environnement comme une sorte de tableau noir [Engelmore et Morgan 1988], les agents peuvent échanger de l'information, de manière locale ou globale ;
- les agents localisés dans l'environnement peuvent propager des signaux autour d'eux, que les autres agents peuvent percevoir (infra IV.3.5) ;
- un agent peut modifier à distance les variables d'un autre agent (**`dset`**), ce qui permet d'envisager une sorte d'envoi de messages entre agents.

Outre la manipulation des variables, un ensemble de primitives de base est disponible, permettant notamment à un agent de se reproduire ou de mourir (**`reproduce`** et **`die`**). L'ajout, à ces primitives, de structures de contrôle permet d'accéder à une véritable programmation des comportements des agents, notamment en organisant les instructions élémentaires en blocs d'instructions, et en soumettant leur exécution à certaines conditions. De ce point de vue, les structures de contrôle utilisées fonctionnent d'une manière très similaire à celles que l'on trouve dans la majorité des langages de programmation impératifs. On peut ainsi utiliser des structures du type **si** ... **alors** ... **sinon** (**`if ... else ... fi`**), ou **tant_que** ... **faire** (**`while ... end_while`**). Une instruction à branchement multiple (**`switch`**) est par ailleurs définie, qui s'apparente à une suite de **si ... alors ... sinon** imbriqués, et qui permet de programmer rapidement une architecture de décision pour un agent, proche de l'architecture de subsomption décrite par R. Brooks [Brooks 1999].

Nous allons maintenant nous intéresser à l'utilisation de cette plate-forme en tant que système d'information, système de simulation multi-agent, et enfin système d'interface. Nous illustrerons la description par un exemple, lié à la représentation d'un flux d'informations au format MIDI, codant une pièce musicale interprétée par un ensemble d'instruments. Cet exemple, simple dans sa mise en œuvre, fait en effet appel à chacune des trois fonctions de la plate-forme.

IV.3.4. UN SYSTEME D'INFORMATION

La première de ces fonctions est de récupérer des données provenant du fonctionnement d'un système complexe, grâce à des agents d'information, et à intégrer ces données au niveau de la plate-forme elle-même, de manière à ce qu'elles puissent être utilisées par les agents de simulation.

En premier lieu, il faut remarquer qu'un *agent d'information* est un agent d'interface, puisqu'il doit communiquer à la fois avec la plate-forme de simulation multi-agent et avec un système complexe particulier. Il est donc nécessaire d'assurer la possibilité à ces agents d'information de transmettre les données qu'ils collectent à destination des agents qui seront chargés de les traiter. Pour ce faire, l'idée est d'utiliser une structure de données partagée dans laquelle les premiers peuvent écrire des informations que les seconds peuvent venir lire (figure IV.14). De ce point de vue, cette structure de données reprend les principes de communication distribuée introduits par le langage de programmation parallèle Linda [Gelernter et Bernstein 1982], et peut s'apparenter à un tableau noir [Engelmore et Morgan 1988].

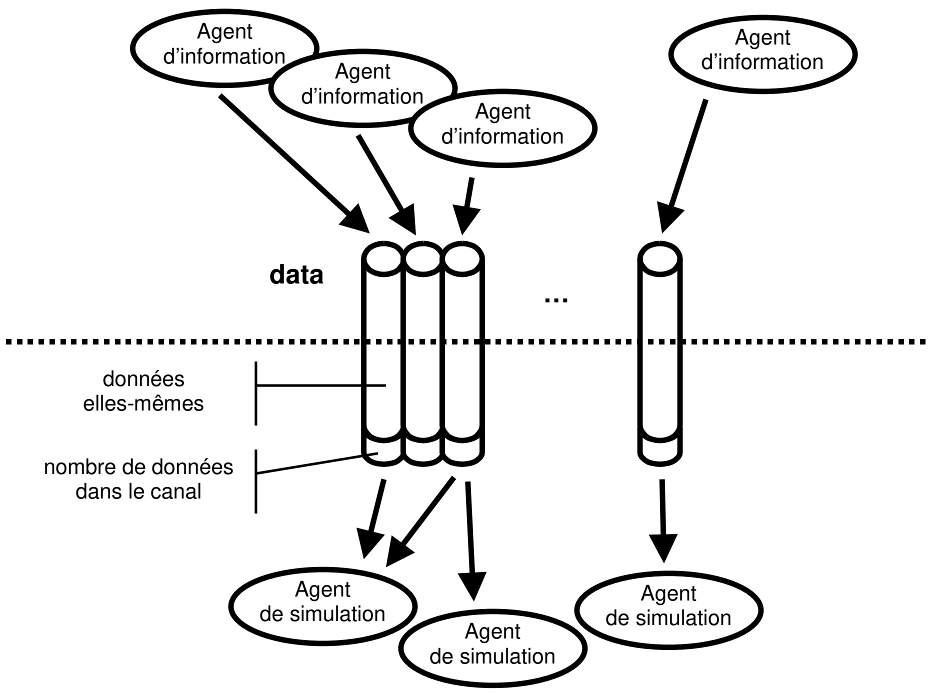


figure IV.14 – Agents d'information et agents de simulation communiquent par l'intermédiaire de canaux de communication.

Du fait de l'aspect dynamique des systèmes complexes, les agents d'information récupèrent en général un flux continu de données et non quelques valeurs de temps en temps. Ce flux de données sera lui-même transmis par un agent d'information, à destination des agents de simulation, sous la forme d'une suite de valeurs ou de messages, placés dans un canal de communication. Du point de vue des agents d'information, ce canal de communication s'apparente à un tube dans lequel ils envoient des messages de manière séquentielle. Plusieurs agents d'information pouvant fonctionner simultanément, il est nécessaire de pouvoir ouvrir plusieurs canaux de communication, ce qui se traduit par un tableau de canaux, dont la taille est variable et est ajustée en fonction des ouvertures ou fermetures de canaux par les agents d'information. De leur côté, les agents de simulation peuvent accéder aux différents canaux, pour y lire ou y placer de l'information (**`get`** et **`put`**), et peuvent au besoin supprimer du canal les informations qui ne sont plus pertinentes ou ne devant être traitées que par un seul agent à la fois.

Du fait de leur position intermédiaire entre un système complexe et la plate-forme multi-agent, les agents d'information ne rentrent pas entièrement dans le cadre général présenté au paragraphe IV.3.3.2. En particulier, leur comportement ne pourra pas être entièrement décrit dans le langage de programmation de la plate-forme. Tout l'aspect de communication avec le système complexe sera en effet plus spécifique au système complexe lui-même qu'à la plate-forme multi-agent. A chaque système complexe correspondront ainsi des protocoles d'échange de données particuliers qui nécessiteront l'implantation d'agents d'information spécifiques. Malgré leur particularité, les agents d'information sont des agents à part entière, et il est donc possible de leur associer, en plus de leur activité de récupération de données, des scripts d'initialisation, d'activation ou encore de terminaison. Le script d'initialisation sera généralement l'occasion de faire connaître, aux agents de simulation, le canal dans lequel l'agent d'information transmet ses données (variable réservée **`chn`**). Le script d'activation peut, quant à lui, permettre à un agent d'information de moduler son activité de récupération de données en fonction de l'activité du système de simulation.

IV.3.5. UN SYSTEME DE SIMULATION

Grâce aux agents d'information, la plate-forme est nourrie de manière continue en données la renseignant sur le fonctionnement d'un système extérieur. Il s'agit alors d'intégrer ces données de manière à construire un modèle du système. Pour ce faire, la plate-forme est utilisée en tant que système de simulation. Développé initialement dans le but de reproduire le fonctionnement d'un jardin virtuel, ce système de simulation est plus orienté vers la simulation écologique que vers la simulation sociologique ou économique, avec des agents au fonctionnement plus réactif• que cognitif•, capables d'évoluer et d'interagir dans un environnement simulé. Les différentes approches ne sont pas mutuellement exclusives, d'autant que la plate-forme peut facilement être étendue pour doter les agents de capacités de représentation ou de communication plus évoluées.

L'environnement simulé a un triple rôle (voir figure IV.15). Il sert, en premier lieu, à modéliser l'environnement des agents de simulation. Il constitue par ailleurs, pour ces derniers, un espace topologique aussi bien qu'un espace de communication : espace topologique, il fournit le support de leurs déplacements ; espace de communication, il leur permet d'interagir entre eux.

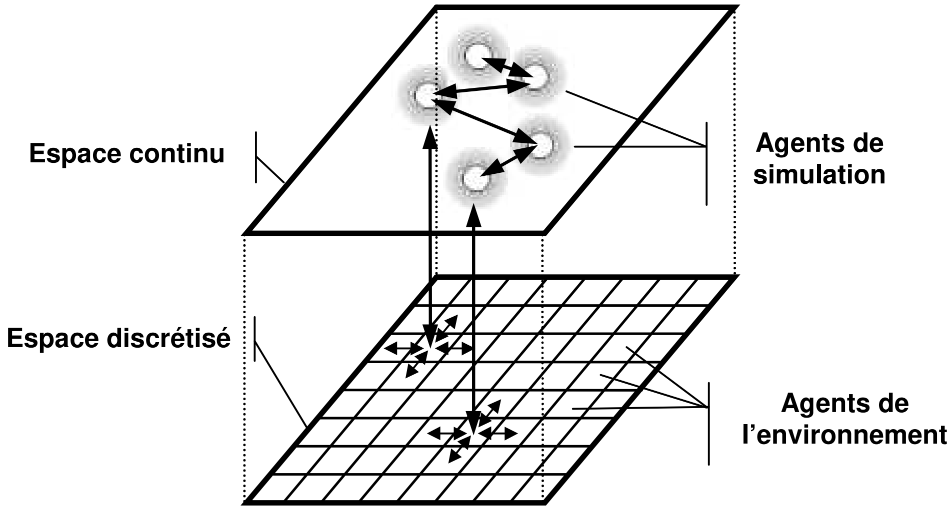


figure IV.15 – En tant qu'espace de modélisation, l'environnement est un quadrillage d'agents, chaque agent modélisant le fonctionnement d'une région de l'environnement. En tant qu'espace topologique et espace de communication, le concepteur a le choix d'utiliser un espace discrétisé ou un espace continu.

Dans le cadre de la simulation d'un écosystème naturel, la fonction de modélisation de l'environnement consiste à représenter le sol, dans ses aspects topographiques, mais également du point de vue des ressources qu'il contient et qui sont utilisées par les organismes qui s'y développent. Pour ce faire, l'environnement est conçu comme un quadrillage régulier de régions connectées les unes aux autres, chacune étant associée à un agent qui fonctionne comme les autres agents de simulation décrits au paragraphe suivant. De la sorte, chaque région de l'environnement est caractérisée par les variables et paramètres de l'agent qui lui est associé. De même que n'importe quel agent de simulation, le comportement de ces agents peut être décrit grâce au langage de la plate-forme, ce qui permet de confier à chaque région la gestion de ses propres ressources. Les agents de l'environnement sont en tout point identiques aux agents de simulation proprement dits, si l'on excepte le fait qu'ils n'ont pas la possibilité de se déplacer, ni de se reproduire ou de mourir, ce qui permet la description homogène, grâce au langage de script, des agents de simulation et de leur environnement. D'une certaine manière, tout est donc agent dans la plate-forme.

Du point de vue topologique, le concepteur a le choix d'utiliser l'espace quadrillé de l'environnement pour le déplacement des agents, qui s'effectue alors de région en région, par sauts, ou d'utiliser plutôt un espace et un déplacement continus. Dans chacun des cas, le concepteur peut opter pour un environnement borné, limité par ses bords, ou un environnement en forme de tore, replié de manière à ce que les bords gauche et droit coïncident, ainsi que les bords haut et bas. L'environnement ainsi constitué n'a donc plus de bords, même si son image à l'écran reste rectangulaire.

A la différence des agents d'information qui n'ont pas de position particulière, les agents de simulation sont situés dans l'environnement (ils correspondent à la classe **`local_agent`**, voir figure IV.12). De ce fait, il leur est possible d'interagir les uns avec les autres de manière locale, grâce à des signaux émis autour d'eux et propagés dans l'environnement. Le principe en est directement inspiré des signaux chimiques (servant à la communication, l'alarme, l'identification, etc.) utilisés par certains animaux sociaux [Chauvin 1982] ou certaines espèces végétales [Pelt 1984]. Ces signaux peuvent être propagés, au choix, de manière continue ou discrète. De manière continue, leur intensité en un endroit donné sera calculée sur la base de la distance au point d'émission et d'une formule indiquant l'évolution de la force du signal en fonction de la distance. De manière discrète, un signal peut être confié aux agents de l'environnement qui se chargeront de le propager de proche en proche à leurs voisins.

IV.3.6. UN SYSTEME D'INTERFACE

En tant que système d'interface avec un utilisateur humain, la plate-forme doit donner aux agents la possibilité de se manifester sous forme sensible, visuelle ou sonore, de manière à être perçus par cet utilisateur. Celui-ci, en retour, doit lui-même être perçu par les agents, afin qu'ils réagissent à ses sollicitations.

IV.3.6.1. Manifestation sensible

Nous avons développé à la section III.2.1 les qualités comparées des modalités graphique, textuelle et sonore, pour communiquer une information complexe, avant de finalement conclure à la complémentarité des trois. Les trois modalités ont été incorporées dans la plate-forme. Le graphique et le texte sont pris en compte par l'intermédiaire d'une forme visuelle, dérivée de la classe **shape** (voir figure IV.16). L'arborescence des classes de formes visuelles illustre bien notre démarche visant à offrir à un concepteur de systèmes d'interface, les moyens d'utiliser conjointement différents modes de communication L'aspect sonore, quant à lui, n'est pas considéré comme une propriété permanente d'un agent mais plutôt comme une action que celui-ci peut effectuer. L'utilisation du son ne correspond donc pas à une classe de forme particulière mais est proposée sous la forme d'une instruction permettant à un agent de déclencher l'émission d'un son (**play_sound**).

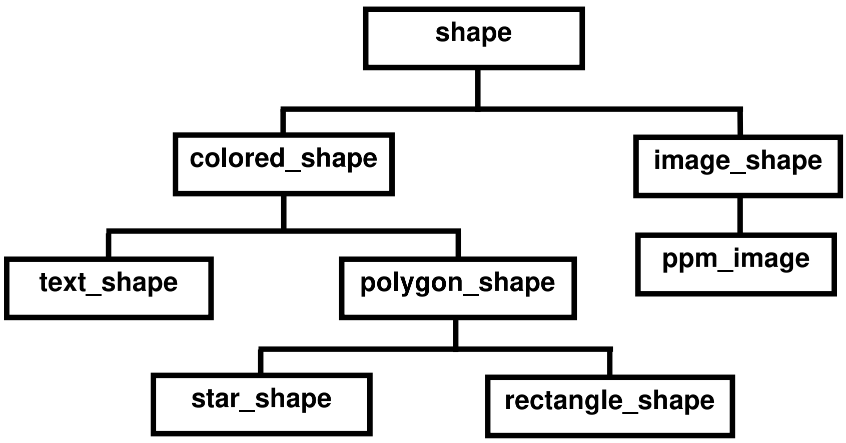


figure IV.16 – Architecture des classes de formes visuelles (graphiques et textuelle) qui dérivent toutes de la classe shape.

De même que les différents agents dérivent tous de la classe de base **agent**, les différentes formes dérivent toutes de la classe **shape** et se répartissent en images, texte, et polygones, ces derniers pouvant être de type rectangulaire ou étoilé[23]. Le principe général de ces classes de formes est de rendre accessible, à un agent de simulation ou un agent de l'environnement, les caractéristiques qui déterminent son aspect par l'intermédiaire de variables réservées. Comme nous l'avons déjà souligné, cela autorise une gestion homogène de l'aspect visuel de l'agent et de ses autres ressources. Tout agent peut ainsi modifier sa taille (**size**), certains peuvent modifier leur couleur (**red**, **green**, **blue**), d'autres l'image ou le texte qui les représentent.

[23] Voir l'annexe A pour une description de la construction des formes étoilées, qui peuvent prendre bien d'autre formes, cercle, polygone régulier, feuille, etc.

De manière plus générale, il est facile de voir comment les possibilités graphiques de la plate-forme pourront être étendues en enrichissant la hiérarchie de classes d'agents visuels. A terme, on peut imaginer avoir des agents dont la représentation correspond à différents formats d'image, à de la vidéo, à des polygones variés, etc. A un niveau plus élevé, on peut imaginer également la définition d'agents dont la forme serait composite, ce qui passera peut-être par l'introduction d'une conception récursive des formes, voire des agents. Enfin, nous allons voir au paragraphe suivant comment les agents peuvent réagir aux événements du clavier et de la souris, ce qui permet d'envisager d'associer un agent à différents composants d'interface classiques tels que boutons, menus déroulants, boîtes de dialogue, etc.

IV.3.6.2. Agent souris et agent clavier

Dès lors que les agents de simulation ont la capacité de se manifester visuellement, il est possible de les rendre réactifs aux actions de l'utilisateur, ce qui s'avère très important pour la conception d'une interface quelle qu'elle soit. Si l'on considère l'utilisateur comme un système complexe particulier, la gestion des actions de l'utilisateur pourra s'effectuer de la même manière que s'effectue la gestion des données en provenance de n'importe quel autre système complexe (supra figure IV.10). Pour ce faire, il faut et il suffit d'ajouter à la plate-forme des agents d'information chargés d'observer le comportement de l'utilisateur. Dans un premier temps, cela passe par la surveillance de l'utilisation qu'il fait de la souris et du clavier qui sont les deux moyens d'interaction les plus communs. Deux agents d'informations distincts ont été ajoutés pour assumer cette tâche, correspondant aux classes **`mouse_agent`** et **`keyboard_agent`** (figure IV.12). Grâce aux données récupérées par ces agents (la position de la souris, l'état de ses boutons ou du clavier), les agents de simulation ont accès aux actions de l'utilisateur, et il est donc simple, pour le concepteur d'une application, de définir la manière dont les différents agents doivent réagir en fonction de ces actions.

Il faut remarquer la très grande généralité des principes mis en œuvre ici et la grande modularité qu'ils autorisent. Les agents souris et clavier ont été directement intégrés à la plate-forme du fait de l'universalité de ces périphériques, mais il est facile d'imaginer d'autres modes d'interaction avec la plate-forme, utilisant par exemple un logiciel de reconnaissance de la parole pour transmettre des ordres oraux aux agents de simulation. Plus généralement encore, n'importe quelle mesure effectuée sur le système complexe que nous sommes, direction du regard, rythme cardiaque ou encore tension artérielle, serait susceptible d'être utilisée comme entrée du système de simulation, introduisant ainsi une rétroaction directe entre la représentation d'un système complexe et la réaction qu'elle entraîne chez la personne qui l'observe.

IV.4. REPRESENTATION D'UN FLUX DE DONNEES MIDI

La description de la plate-forme étant relativement générale, nous allons maintenant, à travers l'exemple de la représentation d'un flux de données MIDI, examiner comment mettre effectivement en œuvre chacune des fonctions d'information, de hiérarchisation et de représentation visuelle.

IV.4.1. UN AGENT MIDI

Le format MIDI est un format de fichier musical, dans lequel sont codées simultanément les informations correspondant à seize instruments différents. Les informations musicales consistent principalement en événements marquant le début ou la fin d'une note, celle-ci étant caractérisée par sa hauteur et son intensité, mais également par l'instrument qui l'émet. Bien qu'il s'agisse d'un « problème jouet », nous avons tenu à séparer la génération des données de leur récupération par un agent d'information, ceci afin de reproduire ce qui se passe lorsque la plate-forme est branchée sur un véritable système complexe existant indépendamment d'elle. Pour ce faire, nous avons modifié le programme Playmidi de N. Laredo [Laredo 1996], de manière à ce qu'il envoie les événements décodés vers la plate-forme en plus de les envoyer vers le synthétiseur MIDI de l'ordinateur.

Un agent d'information, spécialisé à partir de la classe `data_agent`, est chargé de récupérer ces informations et de les transmettre aux agents de simulation. Celui-ci dissocie les messages en fonction de l'instrument auquel ils correspondent. Ces messages sont placés, dans l'ordre dans lequel ils sont reçus, dans autant de canaux d'information qu'il y a d'instruments (voir figure IV.17).

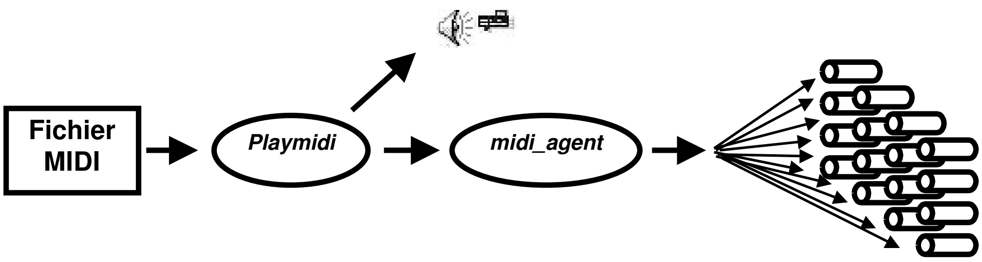


figure IV.17 – La récupération des informations MIDI s'effectue en deux temps : dans un premier temps, le programme Playmidi extrait du fichier MIDI les événements de début et fin de notes. Dans un deuxième temps, ces informations sont récupérées par l'agent d'information midi_agent qui les transmet aux agents de simulation par l'intermédiaire de canaux d'information.

L'exécution de cet agent MIDI doit être préparée en effectuant un certain nombre d'initialisations. Il s'agit en particulier de choisir le fichier MIDI à émettre et d'indiquer le canal de communication utilisé de manière à ce que les agents de simulation sachent où récupérer les données (la transcription dans le langage de script est donnée à l'annexe C).

IV.4.2. DES AGENTS NOTES

> *« Quant au piano, il ne permet des compositions complètes que par l'assemblage et la suite des points sonores. »*
>
> *W. Kandinsky [Kandinsky 1991]*

A mesure que les messages de début et de fin de notes sont placés dans les seize canaux d'information, ils doivent être récupérés et utilisés pour produire une représentation signifiante de l'activité des seize instruments de l'orchestre.

IV.4.2.1. Traitement de l'information

Chaque message consiste en deux nombres. Le premier désigne la hauteur de la note, le deuxième l'intensité avec laquelle elle est jouée. L'idée la plus simple consiste à associer un agent à chaque note jouée et à demander à cet agent de se positionner de manière à révéler l'instrument qui joue la note et la hauteur de celle-ci. Etant donnée une population initiale d'agents, le rôle de chaque agent sera d'écouter un canal de communication particulier dans l'attente de notes à représenter. Lorsqu'un agent détecte une note à représenter, il se « l'approprie » et se positionne en abscisse en fonction du canal de communication auquel il est affecté, donc de l'instrument qui joue cette note, et en ordonnée en fonction de la hauteur de la note. Dès lors, cet agent écoutera ce même canal de communication jusqu'à détecter le message de fin de note correspondant à la note qu'il représente. Lorsque cela se produit, il reprend sa position initiale et recommence à surveiller son canal de communication dans l'attente d'une nouvelle note. Tout ce travail, cependant, ne sert à rien tant que l'on ne peut pas visualiser ou entendre les agents. C'est la troisième fonction de la plate-forme, celle de système d'interface.

IV.4.2.2. Représentation de l'information

Le choix a priori le plus naturel pour représenter des notes est d'utiliser des formes rondes puisque la notation musicale utilise elle-même le rond pour figurer les notes. W.

Kandinsky, qui s'intéressait au rapprochement entre musique et peinture abstraite, a ainsi proposé des transpositions de partitions musicales en arrangements de points de différentes grosseurs (figure IV.18).

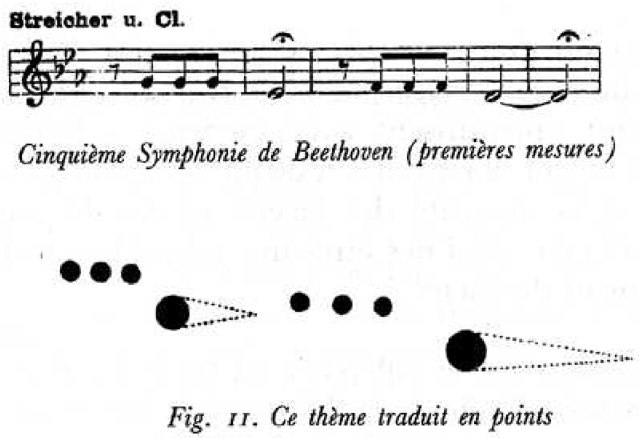


figure IV.18 – Transcription d'un thème musical sous forme d'arrangement de points (d'après [Kandinsky 1991]).

La position des agents-notes indique déjà l'instrument utilisé et la hauteur de la note. Il ne reste donc plus à figurer que l'intensité de la note, ce qui peut être associé simplement à la taille de l'agent. Par ailleurs, on peut imaginer de modifier progressivement la couleur de l'agent pour indiquer la durée de la note. En musique, une « noire » étant plus courte qu'une « blanche », la note passera du noir au blanc à mesure qu'elle se prolonge.

La traduction dans le langage de la plate-forme est reproduit à l'annexe C et un exemple du résultat visuel est reproduit à la figure IV.19. Il faut noter que cet exemple est élémentaire et ne fait pas appel aux capacités d'interaction des agents ni à d'éventuelles possibilités de mémorisation. Du fait de la correspondance directe entre notes et positions des agents, le résultat produit ressemble fortement aux bandes perforées d'un piano mécanique. L'animation de la représentation la rend pourtant déjà très évocatrice. Pour tirer pleinement parti des possibilités de la plate-forme, il serait intéressant d'essayer de repérer des correspondances dans le jeu d'instruments différents en demandant à un agent de repérer les notes dont l'occurrence coïncide avec la note qu'il prend en charge. Par ailleurs, il pourrait être intéressant de demander à un agent de mémoriser les notes qu'il a déjà prises en charge de manière à modifier son comportement lorsque la même note se présente à nouveau.

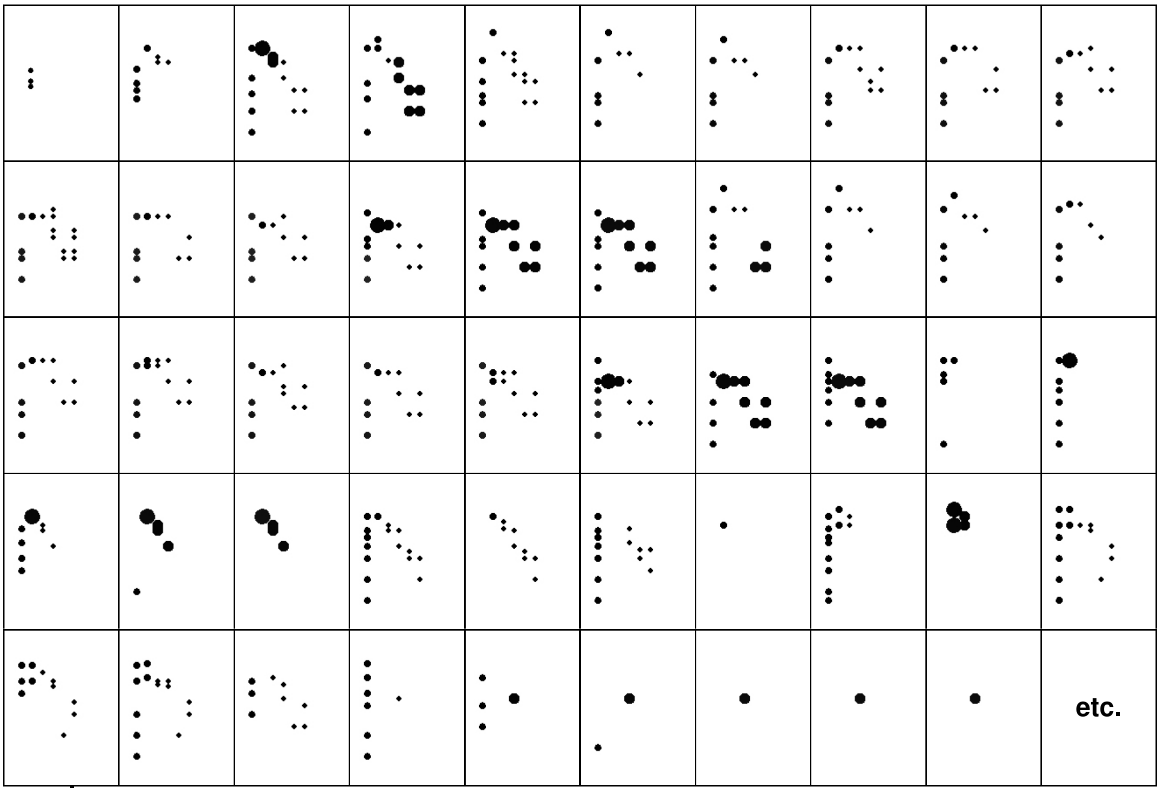


figure IV.19 – Séquence d'images de la plate-forme en cours de fonctionnement pour l'exemple de l'orchestre.

IV.5. DISCUSSION

Avant de clore ce chapitre, nous allons maintenant revenir sur la plate-forme telle que nous venons de la décrire afin d'en discuter les qualités, en rapport notamment avec les problèmes de représentation des systèmes complexes identifiés au chapitre précédent. Ces problèmes ont trait à plusieurs niveaux de complexité, depuis la complexité attachée aux éléments du système (complexité componentielle) jusqu'à celle liée à son organisation dynamique (complexité organisationnelle) en passant par la complexité due à la structuration des éléments en différents niveaux (complexité structurelle) et à leurs interactions (complexité interactionnelle). Vis-à-vis de ces différentes formes de complexité, la plate-forme possède un certain nombre de propriétés d'ordre général qui méritent d'être soulignées, concernant autant les techniques utilisées dans sa conception que l'esprit dans lequel ces techniques ont été intégrées à une démarche globale.

IV.5.1. PROPRIETES DE LA PLATE-FORME

Les techniques multi-agents possèdent des qualités de modularité, de dynamicité et d'adaptativité qui les rendent bien adaptées au problème posé. Modulaires, les systèmes multi-agents décomposent les problèmes étudiés en un ensemble d'agents, chacun prenant en compte un aspect du problème. De ce fait, le système peut être complexifié en ajoutant de nouveaux agents, sans avoir à remettre en cause tous les choix de conception effectués jusqu'alors. Dans le cadre plus spécifique de la représentation de systèmes complexes, cela implique la possibilité de complexifier de manière incrémentale la représentation du système en intégrant de nouvelles sources de données traduisant son fonctionnement. Au niveau de notre plate-forme, cette propriété de modularité s'exprime par la possibilité offerte au concepteur de disposer d'autant d'agents d'information que nécessaire, pour récupérer les données d'autant de sources distinctes.

Cela s'exprime également par la possibilité d'ajouter ou de supprimer dynamiquement des agents de simulation en fonction des besoins à chaque instant. Dans le cas de l'orchestre, par exemple, un agent qui prend en charge un événement de début de note crée un nouvel agent de manière à ce qu'il y en ait toujours un en attente d'un nouvel événement. A l'inverse, il disparaît à réception de l'événement de fin de note correspondant. De même, on peut envisager la création dynamique d'agents destinés à représenter un accord et non plus une note isolée, matérialisant ainsi la création d'un « groupe » d'agents.

A cette propriété de modularité s'ajoutent celles de dynamicité et d'adaptativité qui lui sont en partie liées. Du fait de leur activité propre et des interactions qu'ils ont les uns avec les autres, les agents peuvent démontrer des capacités d'adaptation dynamique à un environnement changeant. De par cette adaptation des agents qui le constituent, un système multi-agent peut lui-même exhiber de telles capacités d'adaptation autopoïétique [Maturana et Varela 1994], lui permettant de conserver sa structure alors même que son environnement évolue. Du point de vue de la représentation de systèmes complexes, cette propriété doit être mise à profit pour concevoir des systèmes multi-agents adaptant en permanence leur aspect visuel de manière à traduire en temps réel les évolutions du système complexe. Par la création ou la suppression dynamique d'agents de simulation, par la modification de leur représentation visuelle ou encore par les influences mutuelles qu'ils exercent, la plate-forme développée offre les outils permettant d'aller dans ce sens.

Dans la conception de la plate-forme, basée sur un modèle générique, nous ne faisons aucune hypothèse restrictive quant à la nature du système complexe à visualiser. Dans le même temps, l'utilisation d'un langage de script permet de spécialiser rapidement le modèle en fonction d'un système particulier. Il est ainsi possible d'expérimenter rapidement et facilement différents mécanismes d'interface et de représentation, en visualisant directement le résultat. Avant de servir à la représentation de systèmes complexes, les capacités de visualisation des agents de simulation peuvent ainsi servir à la mise au point de systèmes spécialisés. Elles nous ont d'ailleurs été particulièrement utiles dans la phase de développement de la plate-forme.

IV.5.2. PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT

Si les systèmes multi-agents autorisent une grande modularité, la plate-forme elle-même se caractérise par une conception modulaire qui doit permettre son extension facile. En particulier, du point de vue des capacités d'interface avec un utilisateur, nous avons évoqué les développements possibles, concernant aussi bien les capacités de représentation visuelle ou sonore (supra IV.3.6.1) que les capacités d'interaction par l'intermédiaire de périphériques existant ou à inventer (supra IV.3.6.2). Dans une perspective artistique, cela doit permettre la construction d'images toujours plus intéressantes en même temps que des modes d'interaction renouvelés, plus simples et intuitifs, voire « transparents » [Ishii et Ulmer 1997], utilisant par exemple le niveau sonore ambiant ou les déplacements de personnes dans un espace pour donner vie à la représentation plastique. Dans une perspective de génie logiciel, la plate-forme présentée dans ce chapitre pourra être développée dans une optique d'interfaces multimodales et multi-agents (voir figure IV.20) : multimodale, par l'utilisation simultanée de différents modes de représentation et d'interaction ; multi-agents, par l'utilisation d'agents pour gérer les différents éléments d'interface. Par rapport à des composants d'interface objets, des composants construits sur la base d'agent ajouteraient des propriétés de proactivité, c'est-à-dire qu'ils sont susceptibles d'avoir une activité spontanée et autonome, en plus de leur réaction aux actions de l'utilisateur. Ils ajouteraient par ailleurs des capacités d'interaction dynamique les uns avec les autres. Si les bénéfices précis qu'une telle approche pourrait apporter restent à explorer, il nous semble qu'elle devrait conduire à la conception d'interfaces souples et adaptatives, se réorganisant en permanence en fonction des actions de l'utilisateur ou d'informations externes [Ishizaki 1996].

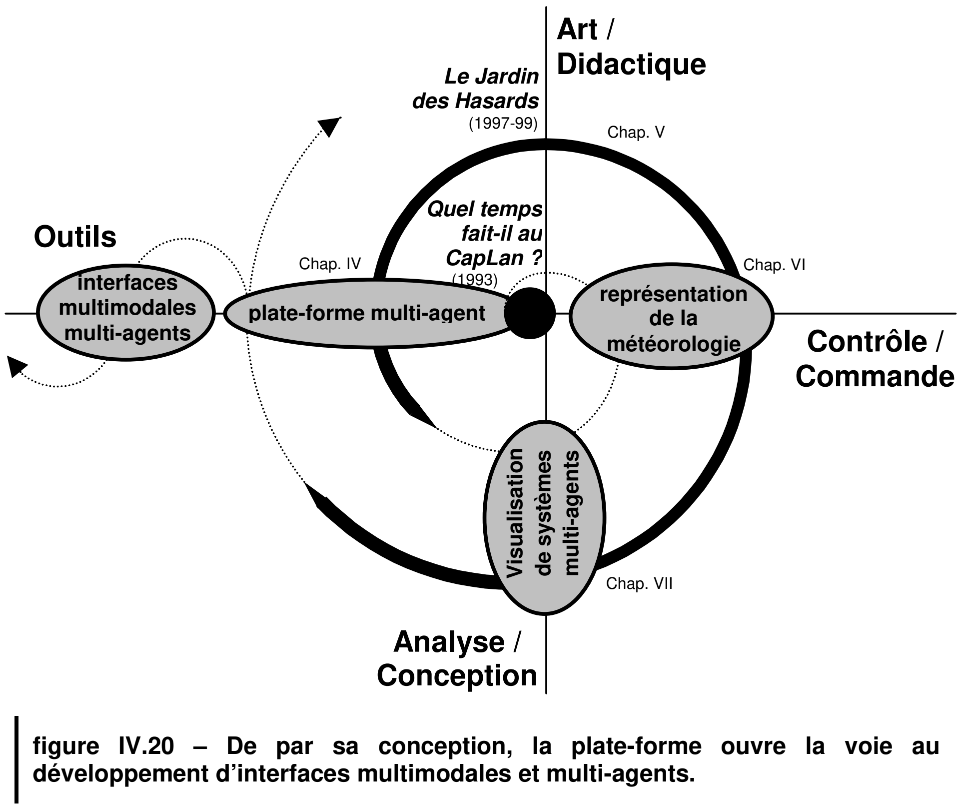


figure IV.20 – De par sa conception, la plate-forme ouvre la voie au développement d'interfaces multimodales et multi-agents.

Nous avons décrit dans ce chapitre un ensemble d'outils intégrés dans une plate-forme de conception de systèmes multi-agents d'interface. Mais concevoir des outils ne suffit pas, encore faut-il pouvoir les exploiter pour développer des applications. La plate-forme a servi à la réalisation du projet artistique *Le Jardin des Hasards* que nous allons maintenant décrire. Nous montrerons ainsi un exemple de l'utilisation de la plate-forme pour la conception d'une interface de représentation d'un système complexe. La dernière partie sera réservée, quant à elle, à la présentation de résultats dérivés de cette expérience artistique ainsi que des leçons que nous avons pu en tirer pour la conception de systèmes de représentation.

CHAPITRE V

LE JARDIN DES HASARDS : ART ET DIDACTIQUE

« Plus profondément nous pénétrons dans l'analyse de la structure du temps, mieux nous comprenons que durée signifie invention, création de formes, élaboration continue de ce qui est absolument neuf. »

H. Bergson

« Qu'est-ce qu'un bon tableau ?

Quand le tableau est plein de magie. Quand on sent un certain bonheur, quand il incite à rire ou à pleurer, quand il met quelque chose en mouvement. Il devrait être comme une fleur, comme un arbre. Il devrait être comme la nature. Il devrait être tel qu'il manque quand il n'est pas là. C'est une personne. J'ai toujours comparé les tableaux à des arbres. Un tableau n'est bon que quand il supporte la comparaison avec un arbre ou un être vivant. »

F. Hundertwasser

« Ce dont on ne peut parler, il faut le taire. »

L. Wittgenstein, Tractatus logico-philosophicus

« ... et le peindre! »

F. de Azúa, dans le quotidien El País

Le Jardin des Hasards a été imaginé par l'artiste multimédia B. Gortais comme une œuvre artistique sans fin, évoluant et se renouvelant continuellement sous la pression d'un flux de données météorologiques. C'est donc par ses aspects artistiques et didactiques que nous débuterons la description de ce travail, avant d'élargir la discussion dans les chapitres suivants aux aspects de représentation de systèmes complexes.

V.1. INTRODUCTION

D'abord artistique, le projet du *Jardin des Hasards* s'est développé dans une interaction permanente entre questionnements artistiques et problématiques scientifiques. C'est ce dialogue que nous commencerons par présenter avant de donner du projet une description plus précise.

V.1.1. LA DEMARCHE DE CREATION ARTISTIQUE

Pour parler de démarche artistique, le plus simple est de laisser la parole à celui dont elle constitue la pratique quotidienne, à savoir l'artiste lui-même, Bernard Gortais [Gortais 1999 comm. pers.] :

> *« Le projet du « Jardin des Hasards » est né d'un projet précédent, « Quel temps fait-il au Caplan ? ». Ce dernier est la conséquence d'un long séjour à Montréal durant lequel j'ai programmé en Logo [Resnick 1988] des pavages de l'espace à deux dimensions. Cette démarche, influencée par l'œuvre de P. Stevens [Stevens 1978] m'a permis de générer automatiquement des images numériques. Par-delà la fascination de la machine, la médiocrité du résultat esthétique, la redondance, l'absence de rythme m'ont incité à essayer d'aller plus loin dans les projets qui ont suivi.*
>
> *Je porte depuis longtemps une grande attention aux conditions matérielles et psychologiques qui peuvent favoriser mon activité créatrice et je cherche à repérer ce qui dans ma démarche relève du système et dans quelles limites. Cette attitude m'a évité d'opposer les activités liées au « Jardin des Hasards » et le reste de mon activité artistique pour les associer dans un système global à l'intérieur duquel chaque domaine (schématiquement, ce qui relève de l'atelier et ce qui relève de la création numérique et des systèmes multi-agents) vient stimuler l'autre. La perception du temps, le rapport au corps, à la matière, au concept, à l'image de soi comme créateur, le rapport à l'autre, le rapport au langage, tout y est différent. L'apport du* Jardin des Hasards *à ma démarche artistique se situe d'abord là : il a constitué et il constitue toujours un puissant pôle qui interroge ma peinture, la somme de répondre et de se défendre et, de la sorte, l'oblige à développer son originalité en tant que système de création. Ce dialogue tendu entre les deux démarches créatrices est devenu lui-même, une démarche créatrice. »*

V.1.2. LE CADRE

Concrètement, le projet artistique peut être décrit comme la conjonction de trois principes, qui autorisent une grande liberté d'expression en même temps qu'ils imposent un cadre et des contraintes.

Le premier de ces principes est de concevoir une œuvre picturale informatique qui évolue continûment de manière à restituer, à chaque instant, l'ambiance climatique d'un lieu distant. A chaque instant de la journée, et tout au long de l'année, les variations de couleurs, de formes ou encore de sons, constituent la représentation picturale et sonore de la météorologie de ce lieu. Un petit nombre de variables, mises à jour à intervalle régulier, décrit ces conditions météorologiques sous une forme quantifiable, assurant ainsi le lien entre météorologie réelle et représentation artistique. Le deuxième principe consiste à composer l'image comme un jardin virtuel de formes colorées dont l'évolution est soumise aux conditions météorologiques du lieu. Suivant le caractère plus ou moins favorable de ces conditions, le développement des organismes peuplant le jardin serait plus ou moins rapide, aboutissant même parfois à leur dépérissement lorsque les conditions sont trop mauvaises. Enfin, le dernier principe est de donner au spectateur la possibilité d'intervenir sur cette évolution, de même qu'un jardinier peut entretenir son jardin et agir dessus pour en modifier l'aspect. En supprimant une certaine forme, en modifiant l'aspect d'une autre ou en la déplaçant, en dupliquant d'autres formes encore, le spectateur a un rôle actif à jouer dans la construction des images.

De ces principes, on peut retenir d'une part qu'ils s'intéressent aux processus de génération des images plus qu'à leur forme finale, et d'autre part qu'ils sont d'une très grande généralité. Ces deux caractéristiques se sont révélées essentielles dans l'établissement d'un dialogue entre artiste et scientifique car elles permettent à chacun de trouver sa place et de développer ses propres problématiques de recherche au sein du même cadre, suffisamment général et souple pour intégrer les idées de chacun, suffisamment contraint pour éviter une trop grande dispersion des moyens et des idées.

V.1.3. DE *QUEL TEMPS FAIT-IL AU CAPLAN ?* AU *JARDIN DES HASARDS*

Des principes analogues avaient donné lieu à la réalisation d'une première œuvre, intitulée *Quel temps fait-il au CapLan?* (voir figure V.1) par référence au lieu d'ou provenaient les données météorologiques [Hutzler 1993], un petit café-livre situé sur la côte nord de la Bretagne. Dans ce premier travail, cinq variables (*température*, *nébulosité* qui désigne la couverture nuageuse, *précipitations*, *vitesse* et *direction du vent*) étaient utilisées pour animer les trois panneaux constituant l'image. Il s'agissait essentiellement d'une mise en scène consistant en des variations de couleurs pour exprimer les variations de température et de nébulosité, et pour marquer le passage des heures et des jours tout au long de l'année. En complément, des animations ponctuelles manifestaient la présence de vent ou de précipitations ainsi que l'état de la mer. Des signes spécifiques figuraient enfin les positions du soleil et de la lune et la hauteur de la marée.

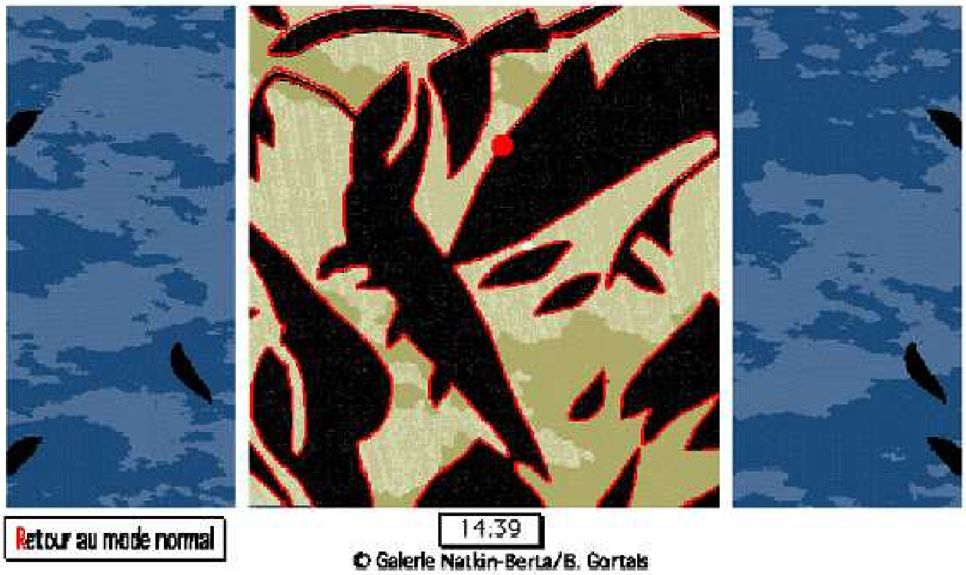


figure V.1 - Ecran de l'œuvre *Quel temps fait-il au Caplan?*

Du point de vue technique, cette première œuvre était basée sur une version primitive de la plate-forme multi-agent, construite à partir du logiciel Macromedia™ Director®. Un agent y était défini à partir de la notion « d'acteur » telle que ce logiciel la propose, c'est-à-dire une image à laquelle peuvent être associés des attributs, des méthodes, ainsi que des "comportements" en réaction à certains événements d'interface, acteurs activés à tour de rôle. Les possibilités de cette première plate-forme étaient cependant trop limitées pour permettre une construction véritablement dynamique de l'image, ce qui a conduit à la définition du projet *Le Jardin des Hasards*. Reprenant le principe de représentation visuelle et sonore d'une ambiance météorologique, l'image est cette fois explicitement imaginée comme la métaphore d'un jardin, composé d'un ensemble de formes colorées en interaction. Ces formes sont construites d'après la métaphore d'organismes végétaux se développant en relation avec la météorologie du lieu distant, mais également en compétition les unes avec les autres, se reproduisant et mourant de même que tout être vivant. De cette manière, le propos n'est pas, bien sûr, d'obtenir une reproduction exacte du monde réel, mais plutôt une représentation métaphorique d'un monde propre à l'artiste, fondée sur l'utilisation de données météorologiques et de processus empruntés au monde végétal et au monde animal. L'important est d'ouvrir sur la possibilité de création, par l'artiste, d'un grand nombre de mondes différents, s'inspirant en cela des démarches organicistes et construites des premiers peintres abstraits, W. Kandinsky et P. Klee en particulier [Kandinsky 1989, Kandinsky 1991, Klee 1985].

Le *Jardin des Hasards* peut ainsi être considéré comme un « écosystème artistique ». Nous avons présenté, au chapitre précédent, la plate-forme multi-agent comme un cadre permettant de programmer des agents qui, outre leurs capacités de représentation interne, de communication, d'action, de décision, peuvent également se manifester sous forme sensible. Dans le cadre du *Jardin des Hasards*, le regard est inversé et l'on s'intéressera autant à donner des comportements intéressants à des formes colorées qu'à donner une forme intéressante à des agents. C'est en ce sens que l'on parlera du *Jardin des Hasards* comme d'un écosystème artistique, un écosystème de formes colorées.

Dans une démarche créatrice, le *Jardin des Hasards* a été imaginé comme un écosystème de création artistique, permettant de proposer au spectateur une vision poétique des évolutions météorologiques. Dans une démarche pédagogique, il a été conçu comme un outil didactique, rendant explicite la dynamique évolutive d'un écosystème végétal et animal.

V.2. UNE ŒUVRE AU FIL DU TEMPS

La première caractéristique du *jardin des Hasards* est que l'œuvre évolue, de manière continue, tout au long de l'année et tout au long de la journée. C'est donc une œuvre sans fin, en perpétuel remaniement, qui en plus de marquer les évolutions de la météorologie, marque également celles du temps chronologique. Du point de vue artistique, cela rend l'œuvre attrayante en assurant le spectateur de ne jamais voir deux fois exactement la même œuvre. Dans une perspective de représentation de systèmes complexes, cela permet un suivi continu d'un système, en visualisant dynamiquement, au fur et à mesure, chacune de ses évolutions.

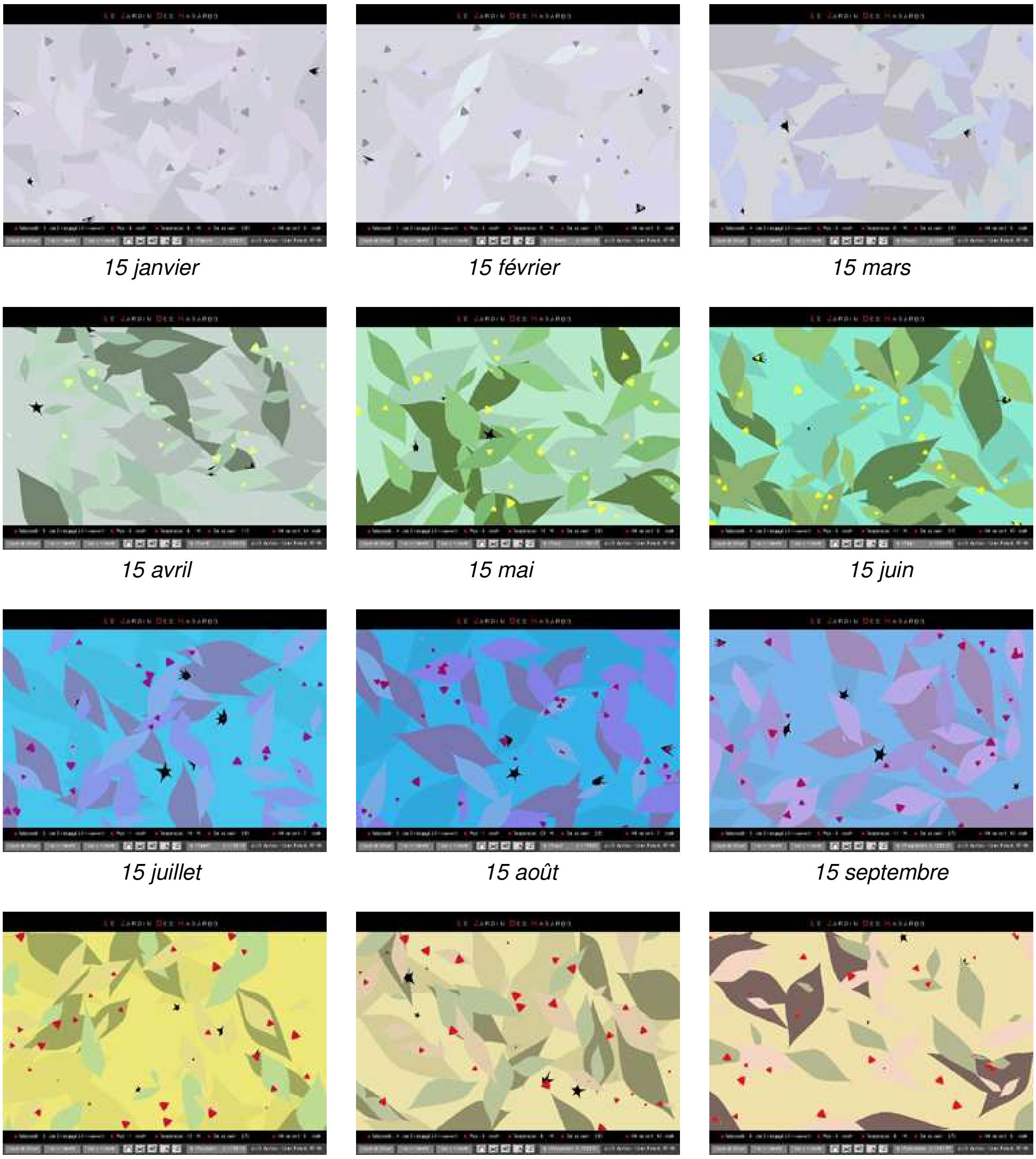
V.2.1. MODELE DES COULEURS

Avant d'aborder les agents spécifiques utilisés pour figurer la nébulosité ou les précipitations, il est nécessaire d'expliquer rapidement les principes utilisés pour la gestion des couleurs. Une partie importante de la représentation artistique tient en effet à des palettes de couleurs qui évoluent notamment en fonction de l'heure de la journée et du jour de l'année.

Sans trop rentrer dans les détails de la représentation des couleurs, il est nécessaire de dire quelques mots du modèle TSL et des notions de Teinte•, de Saturation• et de Luminance•. Ce modèle constitue un codage particulier des couleurs, basé sur le modèle de teinte, nuance et ton utilisé par les artistes. La notion de teinte peut être rapprochée de celle de longueur d'onde du signal lumineux, autrement dit de couleur. A des teintes différentes correspondent ainsi des couleurs différentes, rouge, jaune, vert, cyan, bleu, magenta, etc. Pour une teinte donnée, une saturation et une luminance maximale correspondent à la couleur pure, sans mélange avec d'autres couleurs. Diminuer la saturation revient à ajouter du blanc à la couleur. Diminuer la luminance permet de créer les nuances de couleur.

V.2.2. VARIATIONS SAISONNIERES ET DIURNES

Sur la base de ces quelques notions, la conception des couleurs a été faite en associant une couleur de base aux différents agents, couleur qui varie suivant la période de l'année, et en modulant cette couleur de base en fonction de l'heure de la journée. Des palettes de couleurs très différenciées sont associées à chacune des saisons comme le montre la figure V.2.



15 janvier — 15 février — 15 mars

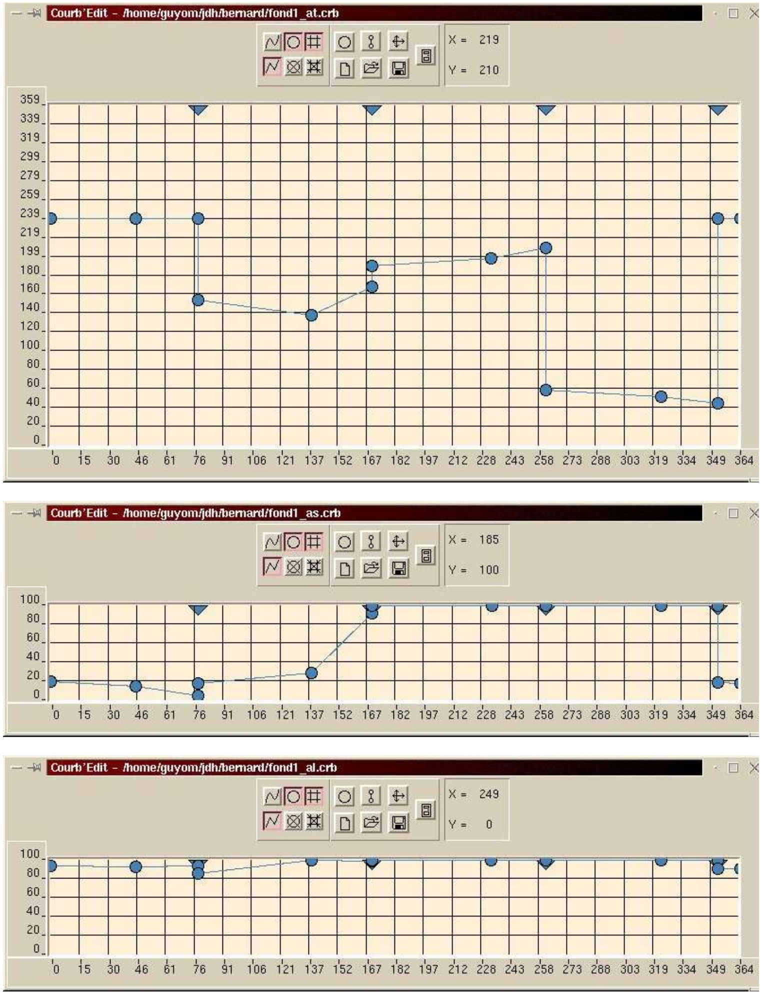
15 avril — 15 mai — 15 juin

15 juillet — 15 août — 15 septembre

15 octobre — 15 novembre — 15 décembre

figure V.2 – Aspects du *Jardin des Hasards* selon les saisons.

D'un point de vue technique, les couleurs sont définies, pour chaque type d'agent et pour chaque composante de couleur (Teinte, Saturation, Luminance), par un tableau qui contient la valeur de la composante pour chaque jour de l'année. Ces tableaux sont construits sous forme de courbes grâce à un éditeur spécialisé (décrit à l'annexe B, voir figure V.3) puis enregistrés dans des fichiers séparés. La figure V.3 montre, pour l'agent correspondant au fond de l'image, l'évolution des trois composantes de couleur en fonction du jour de l'année.



teinte

saturation

luminance

figure V.3 – Variations de teinte, de saturation et de luminance en fonction du jour de l'année pour le fond de l'écran.

Ces tableaux de valeurs peuvent être manipulés grâce au langage de script de la plate-forme. L'encadré suivant montre la gestion des couleurs pour un type d'agent, le principe étant identique pour tous les agents :

```
# déclaration de trois variables tableaux dont les valeurs sont initialisées
# à partir de trois fichiers
tableau fond1_at 365 -f [file join $rep fond1_at.crb]
tableau fond1_as 365 -f [file join $rep fond1_as.crb]
tableau fond1_al 365 -f [file join $rep fond1_al.crb]

# script d'activation de l'agent global (correspondant au fond de l'écran)
activate global
  # modifie teinte, saturation et luminance en fonction du jour courant
  tsl {$fond1_at[$day]} {$fond1_as[$day]} {$fond1_al[$day]}
end_activate
```

En plus de variations saisonnières, des variations de couleurs diurnes marquent le passage du temps, tout au long de la journée (voir figure V.4).

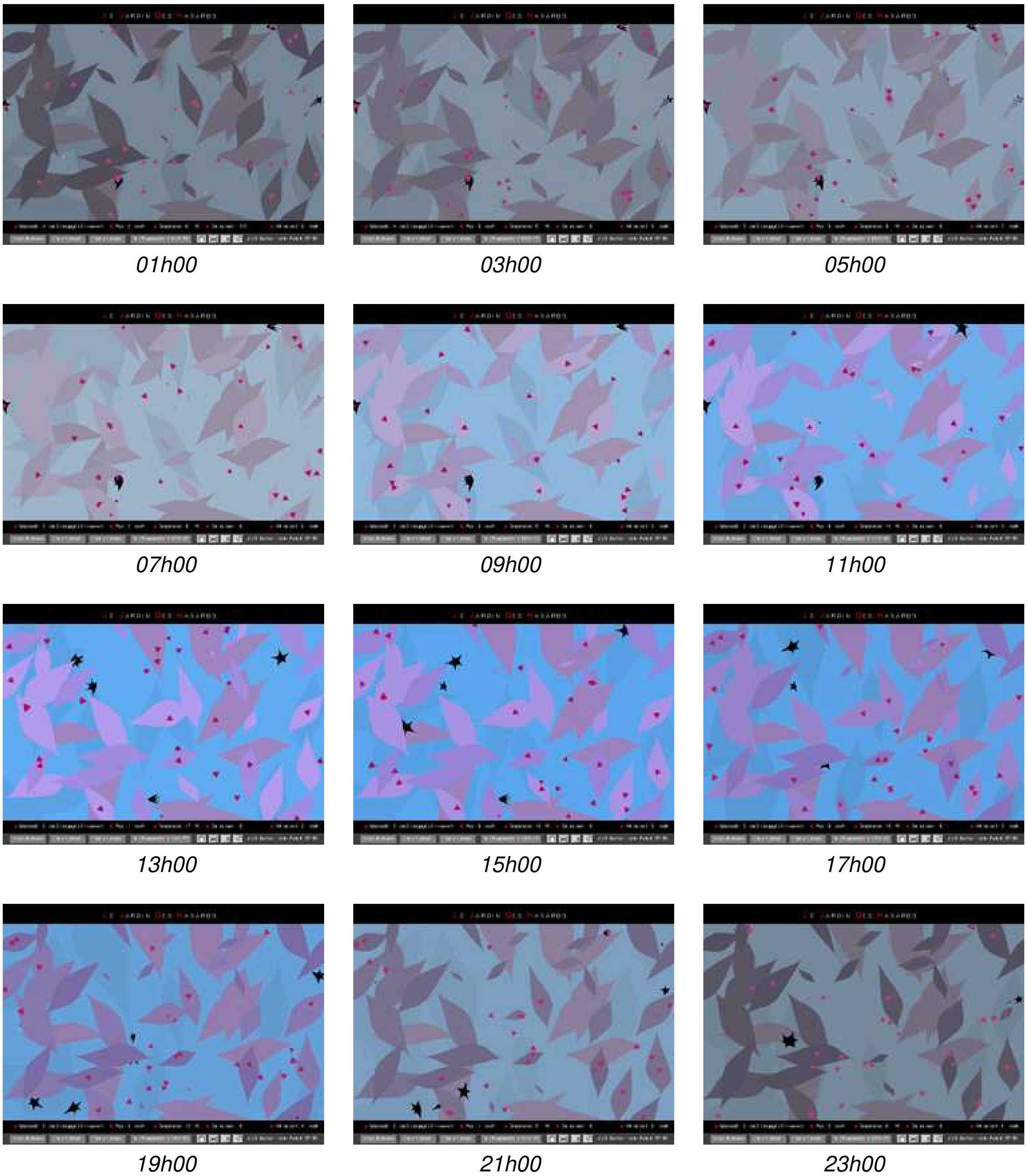
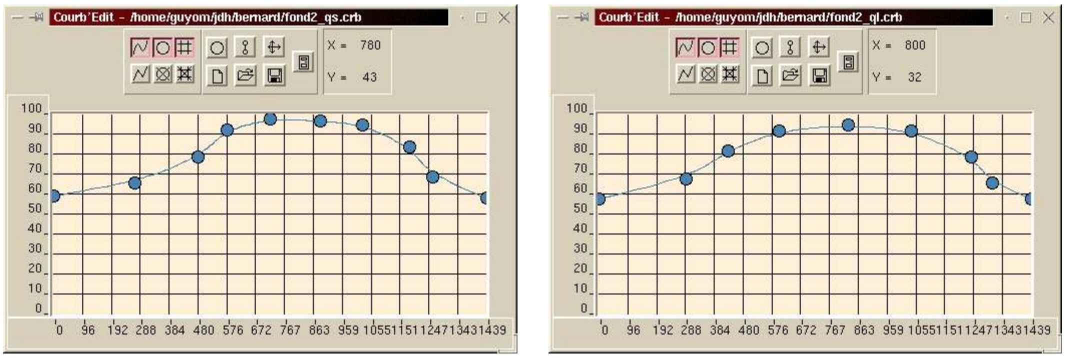


figure V.4 - Aspects du *Jardin des Hasards* selon l'heure de la journée.

Selon un principe analogue, les variations diurnes sont indiquées par des tableaux de valeurs qui spécifient, minute par minute, les modulations à apporter, en pourcentage, aux composantes de saturation et de luminance de la couleur de base (voir figure V.5). Le script de mise à jour des couleurs doit être modifié en conséquence (voir encadré page suivante).

```
tsl {$fond1_at[$day]} \
    {$fond1_as[$day] * $fond2_qs[$min] / 100} \
    {$fond1_al[$day] * $fond2_ql[$min] / 100}
```



saturation **luminance**

figure V.5 – Variations à apporter en pourcentage aux valeurs saisonnières de saturation et de luminance en fonction de l'heure de la journée, pour le fond de l'écran.

Le principe choisit apparaît clairement : en milieu de journée, la couleur associée au jour courant est utilisée telle quelle, alors que sa saturation et sa luminance sont progressivement abaissées d'environ 40% jusqu'au milieu de la nuit.

V.3. UNE REPRESENTATION DE LA METEOROLOGIE

Le *Jardin des Hasards* évolue en fonction du temps chronologique ; il évolue également en fonction du temps météorologique d'un lieu particulier. Il constitue donc à ce titre un système de représentation de la météorologie, visant à restituer, de manière graphique mais également sonore, l'ambiance climatique du lieu d'où proviennent les données. Le résultat global se veut le plus intuitif possible, de manière à permettre une perception sans effort d'une situation climatique globale. Du point de vue artistique, l'idée est de provoquer chez le spectateur un sentiment immédiat de familiarité avec l'image. Dans une perspective de représentation, il est important également qu'un opérateur soit à l'aise avec la représentation qu'il utilise, qu'elle lui soit familière, qu'il en retire intuitivement et rapidement une perception de la situation globale du système qu'il contrôle [Gershon 1998].

Cette représentation est construite sur la base de choix artistiques que des agents de simulation sont chargés de mettre en œuvre à mesure qu'ils reçoivent les données météorologiques. Nous verrons au chapitre suivant que certains choix particuliers, satisfaisants du point de vue esthétique, ne sont pas forcément les plus appropriés dans une perspective de représentation des conditions météorologiques. En revanche, la démarche générale consistant à produire dynamiquement un affichage ambiant d'une situation complexe, se justifie parfaitement dans un contexte de représentation, comme nous le verrons également.

V.3.1. LES DONNEES METEOROLOGIQUES

Nous avons choisi d'utiliser des données accessibles par l'intermédiaire d'Internet, qui correspondent à des relevés aéronautiques effectués toutes les heures sur la plupart des aéroports du monde. De la sorte, il est possible d'obtenir les données de n'importe quel endroit du globe, rendant le système très général. Il serait naturellement intéressant de disposer de données ayant une fréquence de mise à jour plus élevée, ce qui ne remettrait pas en cause la conception du reste du système, qui fonctionne de manière identique quelle que soit la fréquence de mise à jour des données. Les données sont accessibles sous forme de messages METAR[24], messages formatés de

[24] Message météorologique régulier pour l'aviation.

manière standardisée, émis avec une fréquence horaire sur la base d'observations locales. La figure V.6 montre un exemple de message METAR avec sa signification.

LFRB 181300Z 19009KT CAVOK 18/13 NOSIG

LFRB	:	code international de l'aéroport de Brest
181300Z	:	le 18ème jour du mois à 13h00 Temps Universel
19009KT	:	vent à 190 degrés, vitesse établie de 9 nœuds
CAVOK	:	visibilité de 10 km ou plus, pas de nuages en dessous de 1500 m, pas de phénomène météorologique particulier
18/13	:	température 18°C, point de rosée 13°C
NOSIG	:	pas de signature

figure V.6 - Exemple de message METAR pour l'aéroport de Brest.

Le travail de récupération et d'interprétation est effectué par un agent d'information qui interroge périodiquement une base de données sur Internet pour récupérer le dernier relevé à jour, extrait du message les variables intéressantes de température, nébulosité, pluie et vent, et les transmet de manière séquentielle, par l'intermédiaire d'un canal de communication, aux agents de simulation. L'agent peut également être amené, lorsque la date et l'heure sont modifiées par l'utilisateur, à rechercher les données correspondantes dans une base de données locale. Cet agent correspond à la classe **`meteo_agent`**, qui hérite de **`data_agent`**, et qui possède comme paramètre réservé **`code_aeroport`**, le code de l'aéroport duquel proviennent les données. L'utilisation de l'agent s'effectue de la manière suivante :

```
# demande la création d'un agent nommé meteo de type meteo_agent
family meteo meteo_agent 1
end_family

# définit une variable globale nommée 'meteo_chn' destinée à connaître le numéro
# du canal de communication utilisé par l'agent meteo.
globalParam meteo_chn 0 0 10

# script d'inititalisation de l'agent meteo
init meteo
  # affecte à la variable 'meteo_chn' la valeur de sa variable réservée channel
  set meteo_chn {$channel}
  # utilise les données de l'aéroport de Brest
  set code_aeroport {'LFRB'}
end_init
```

Précisément, les variables utilisées par la suite sont les suivantes :

- la **nébulosité** valeur comprise entre 0 et 8 désignant la plus ou moins grande couverture nuageuse (0 = temps dégagé ; 8 = temps couvert) ;

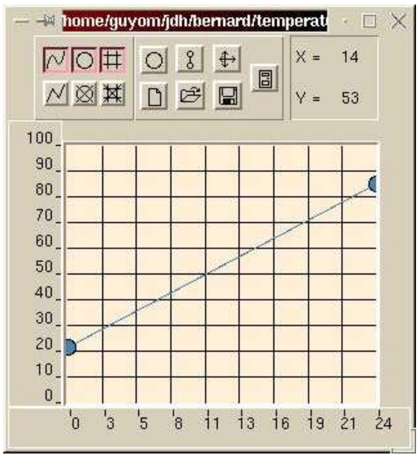
- la **pluviométrie** valeur comprise entre 0 et 60 indiquant le nombre de minutes de pluie au cours de l'heure écoulée ;
- la **température** valeur exprimée en degrés Celsius indiquant la température moyenne ;
- la **vitesse du vent** valeur exprimée en kilomètres par heure indiquant la vitesse moyenne du vent ;
- la **direction du vent** valeur exprimée en degrés indiquant la direction moyenne du vent (0° = vent du Nord, 90° = vent d'Est, etc.) ;

Un agent particulier est chargé de surveiller le canal de communication et de mettre à jour des variables globales lors de la réception de données nouvelles :

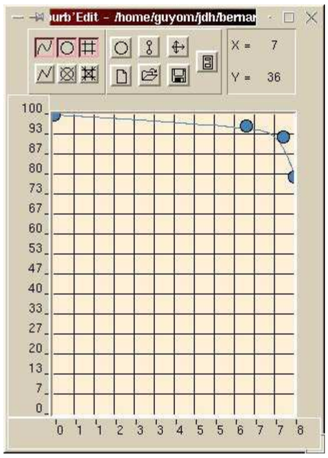
```
# demande la création d'un agent nommé global, de forme rectangulaire.
family global rectangle 1
end_family

# définit cinq variables globales pour désigner respectivement les valeurs de
# nébulosité, de pluie, de direction et de vitesse du vent, de température, en
# indiquant pour chacune la valeur initiale et les valeurs extrêmes autorisées
globalParam neb 0 0 8
globalParam pluie 0 0 60
globalParam dirVent 0 0 360
globalParam vitVent 0 0 150
globalParam temper 0 -10 40

# script d'activation de l'agent global
activate global
  # si le canal de communication météorologique contient des données
  if {$data[$meteo_chn][0] != -1}
    # l'agent lit dans le canal les valeurs de chacune des variables
    set neb {$data[$meteo_chn][0]}
    set pluie {$data[$meteo_chn][1]}
    set dirVent {$data[$meteo_chn][2]}
    set vitVent {$data[$meteo_chn][3]}
    # puis supprime les données du canal
    set temper {$data[$meteo_chn][4]}
    flush_data {$meteo_chn} 0 5
  fi
end_activate
```

V.3.2. TEMPERATURE ET NEBULOSITE

Nous avons déjà évoqué les modifications de couleur de l'ensemble des agents en fonction du jour de l'année et de l'heure de la journée. Selon un principe analogue, les variations de température et de nébulosité seront répercutées sur l'ensemble des agents, par des changements de couleur. Pour la température, la modulation intervient sur la saturation des couleurs, tandis que pour la nébulosité, elle intervient sur la luminance (figure V.7). A des températures élevées correspondent des couleurs saturées, pures, tandis que des températures froides sont associées à des couleurs insaturées, blanchâtres, comme un peu délavées (voir figure V.8). De même, la baisse de luminance sera d'autant plus importante que la nébulosité est forte (figure V.9).



température

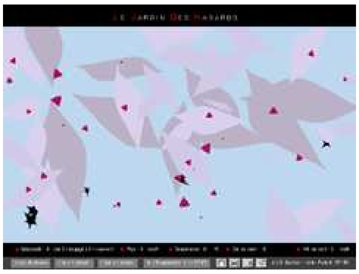


nébulosité

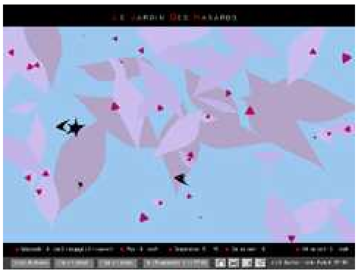
figure V.7 – Variations à apporter (en pourcentage) aux valeurs de saturation en fonction de la température et aux valeurs de luminance en fonction de la nébulosité pour le fond de l'écran.

A nouveau, le script de mise à jour des couleurs doit être modifié en conséquence pour tous les agents. Pour l'agent **`global`**, celui-ci s'écrit finalement de la manière suivante :

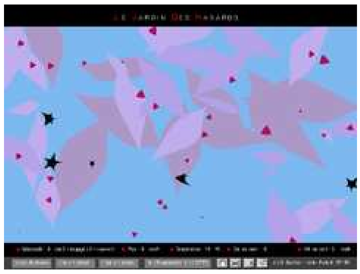
```
tsl {$fond1_at[$day]} \
    {$fond1_as[$day] * $fond2_qs[$min] * $temperature[$t] / 10000} \
    {$fond1_al[$day] * $fond2_ql[$min] * $cadre_nebul[$neb]/10000}
```



t = 0°C

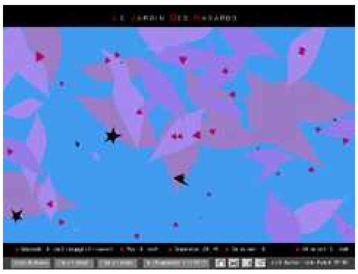


t = 5°C

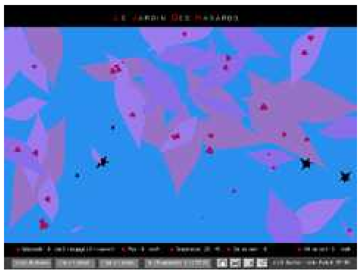


t = 10°C

t = 15°C



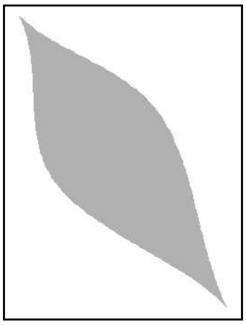
t = 20°C



t = 25°C

figure V.8 - Différents aspects du *Jardin des Hasards* en fonction de la température (t).

V.3.3. LES NUAGES



En plus des variations de luminance qu'elle entraîne dans l'ensemble de l'image, la valeur de nébulosité, qui désigne la plus ou moins grande proportion du ciel cachée par des nuages, est associée à une famille d'agents nuages. Leur nombre et leur taille sont constants mais ils deviennent progressivement invisibles à mesure que la nébulosité diminue, en adoptant une couleur de plus en plus proche de celle du fond de l'écran jusqu'à se fondre complètement avec lui (voir figure V.9). En outre, les agents figurant les nuages se déplacent à l'arrière-plan de l'image, comme emportés par le vent. Dans ce déplacement, la direction et la vitesse des agents sont alors directement reliées à la direction et à la vitesse du vent mesurées.

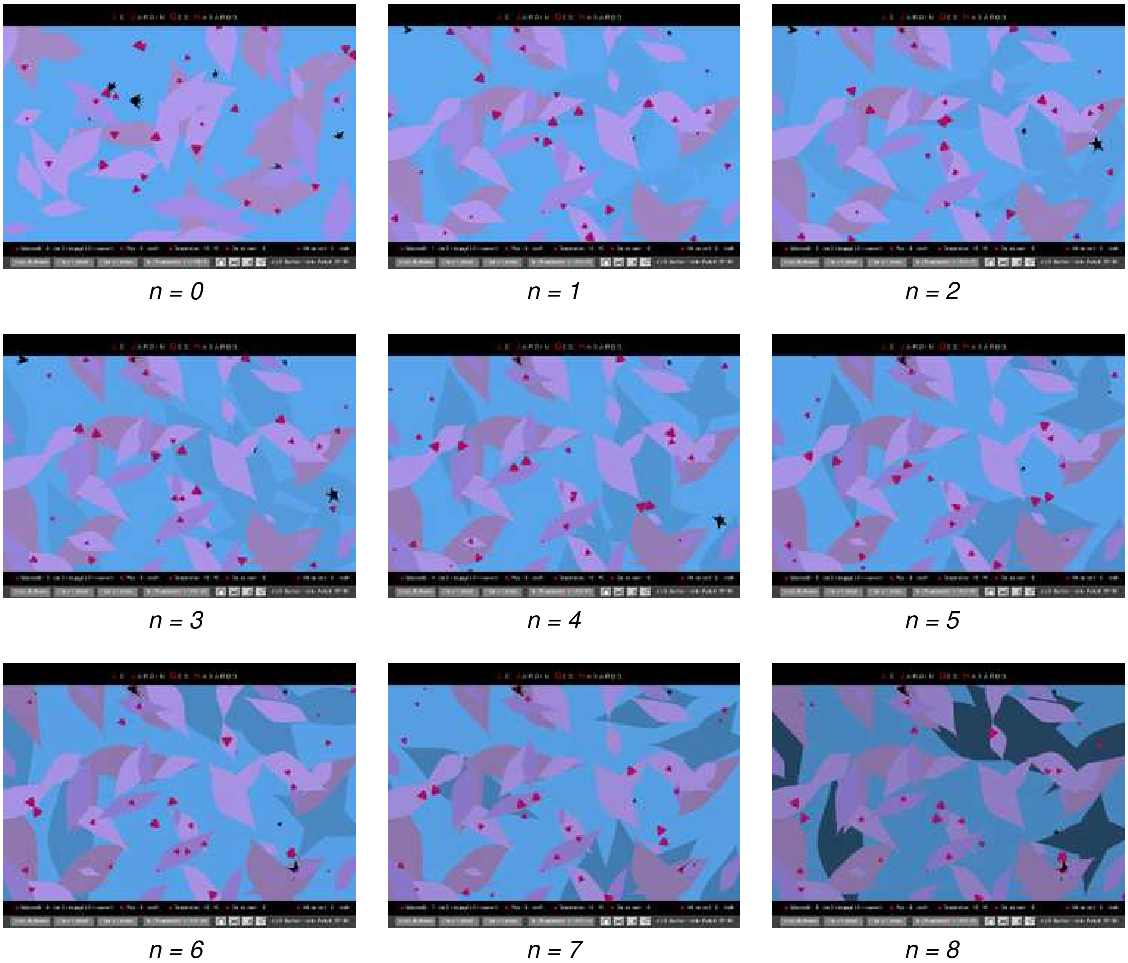
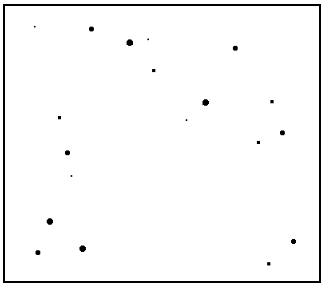


figure V.9 – Différents aspects du *Jardin des Hasards* en fonction de la nébulosité (n).

Ces différents comportements se traduisent de la manière suivante dans le langage de la plate-forme :

```
# script d'activation des agents de la famille nuage
activate nuage
  # met a jour la direction et la vitesse des agents en fonction de la
  # direction et de la vitesse du vent, avec une probabilité de 1%
  if {irand(100) == 0}
    set speed_x {$vitVent * cos($dirVent+90)}
    set speed_y {$vitVent * sin($dirVent+90)}
  fi
end_activate
```

V.3.4. LA PLUIE



Contrairement à la nébulosité qui peut être associée simplement à des variations de luminance, la pluie se laisse difficilement exprimer sous une forme purement colorée. Les agents-pluie, de forme ronde, sont donc programmés pour apparaître périodiquement sur le devant de l'image, d'autant plus fréquemment et avec une taille d'autant plus importante que les précipitations mesurées ont été abondantes au cours de l'heure écoulée. L'impression globale reproduit ainsi la chute de gouttes d'eau sur le sol (voir figure V.10).

Cela s'exprime, dans le fichier de configuration sous la forme suivante :

```
# script d'activation des agents de la famille point
activate point
  # l'agent s'affiche si le tirage aléatoire est inférieur à la valeur de pluie
  if {rand(60) < $pluie}
    # ajuste sa taille
    set size {2 + irand($pluie/15)}
    # choisit une position aléatoire dans l'écran
    set pos_x {rand(800)}
    set pos_y {50 + rand(490)}
    # devient visible
    set visible 1
  # sinon se rend invisible
  else
    set visible 0
  fi
end_activate
```

V.3.5. L'AMBIANCE SONORE

Outre les variations picturales, l'évolution météorologique est repérée par quelques symboles sonores élémentaires, en liaison avec la valeur de nébulosité. A intervalles irréguliers intervient ainsi un agent dont le rôle consiste à émettre des sons de triangle clairs et cristallins lorsque la nébulosité est faible, et d'autres sons de percussions plus mats, « cassés », à mesure que la nébulosité augmente.

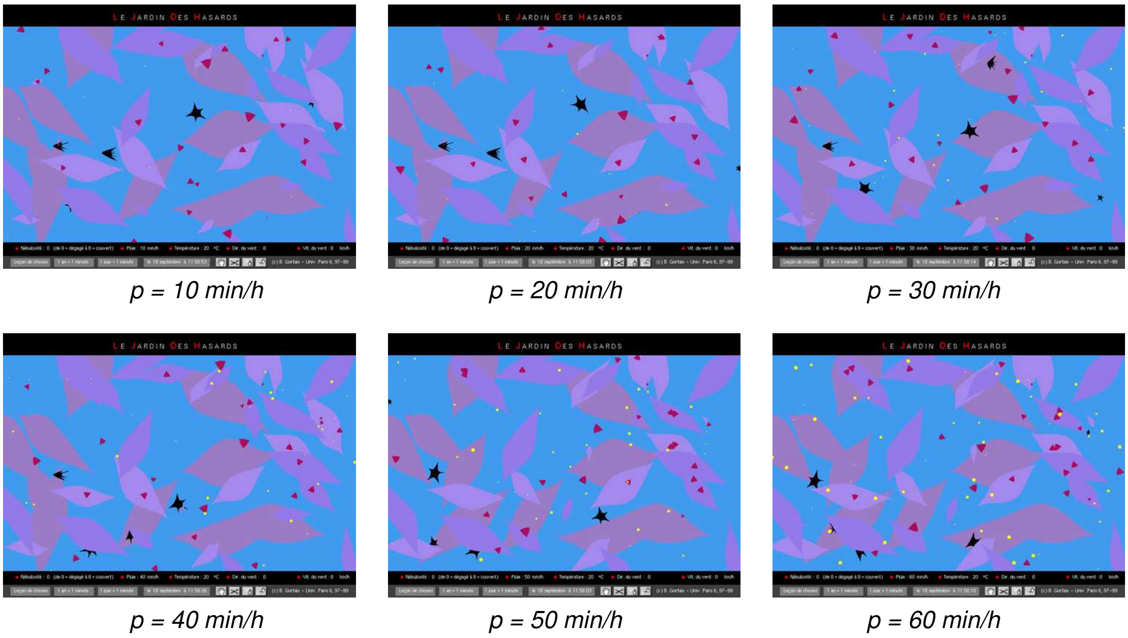


figure V.10 - Différents aspects du *Jardin des Hasards* pour différentes valeurs de précipitations (p en nombre de minutes par heure, min/h).

V.4. LA SIMULATION D'UN ECOSYSTEME

En plus de représenter la météorologie, l'image du *Jardin des Hasards* est le lieu d'une évolution « biologique », reproduisant le fonctionnement d'un écosystème naturel, à la fois végétal et animal. Dans le contexte artistique du *Jardin des Hasards*, le but n'est pas de construire une simulation la plus réaliste et la plus exacte possible d'un écosystème réel, mais plutôt de donner vie à l'image, de manière à rendre l'œuvre la plus intéressante possible, lieu d'un renouvellement permanent. Du point de vue de l'artiste, l'idée est de poser un cadre, imposant certaines contraintes quant à la forme de l'œuvre, et de laisser ensuite s'exprimer le « hasard créateur ». De la sorte, le concepteur de l'œuvre garde un contrôle plus ou moins grand sur l'évolution de celle-ci tout en acceptant de ne jamais pouvoir tout contrôler. Du point de vue du spectateur, il sera plus intéressant de savoir que l'image est le lieu d'une évolution biologique artificielle, avec ses règles et sa logique, plutôt que de penser qu'il n'y a derrière l'œuvre qu'un processus aléatoire et abstrait. Enfin, dans une perspective de représentation de la météorologie, nous allons voir que cet écosystème pourra lui-même renseigner sur les conditions météorologiques présentes, et même passées.

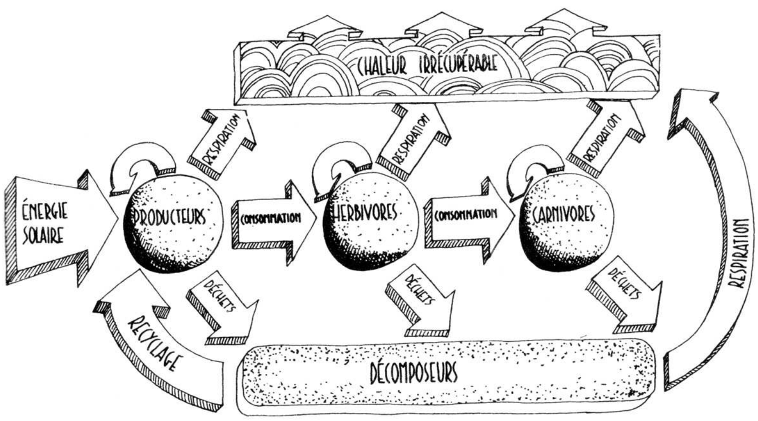
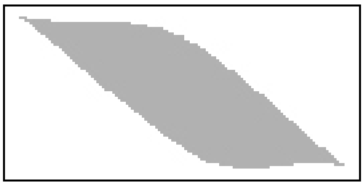


figure V.11 – Schéma énergétique global du fonctionnement d'un écosystème (dans [de Rosnay 1975], p. 29).

V.4.1. PRODUCTEURS ET CONSOMMATEURS

Cet écosystème présente trois niveaux différents constituant une chaîne alimentaire simplifiée. La figure V.11 montre une vision globale de cet écosystème. Au niveau le plus bas, des organismes végétaux (producteurs) se développent en tirant profit de l'énergie solaire. A un deuxième niveau, des organismes herbivores se développent en se nourrissant de cette végétation. Enfin, des organismes carnivores constituent un troisième niveau, se nourrissant des herbivores. Chaque fois qu'un organisme de l'un de ces trois niveau meurt, il est recyclé et peut servir d'engrais pour la croissance du niveau végétal.

V.4.2. LES AGENTS FEUILLES



Le premier niveau de la chaîne est constitué par les organismes producteurs, ceux qui produisent de la matière à partir de l'énergie du soleil et des matières minérales contenues dans le sol. Les agents feuilles sont caractérisés par un paramètre d'énergie qui indique leur plus ou moins bonne santé, et qui se traduit par une taille plus ou moins grande de la forme correspondante. Ce paramètre varie en fonction de l'ensoleillement, des précipitations et de la température, selon la loi :

```
# variation de l'énergie en fonction de la nébulosité, la température, la pluie
set energy {$energy - intensity($fe_presence) +
            ((9-$neb) + ($temper+16.25)/6.25 + ($pluie+7.5) /7.5) * 0.01)}
# ajustement du signal de présence et de la taille en foncion de l'énergie
set fe_presence {0.05 * $energy}
set fe_presence {-($energy * 0.5)}
set size {$energy}
```

On peut également remarquer dans cette formule que le paramètre d'énergie diminue lorsque la feuille « perçoit » d'autres agents feuilles autour d'elle (**intensity**($fe_presence)), introduisant ainsi un facteur lié à l'encombrement spatial et à la présence des agents dans un environnement partagé, dont les ressources sont nécessairement limitées. Par ailleurs, ce même paramètre d'énergie peut augmenter lorsque l'agent-feuille perçoit des agents morts autour de lui (émettant le signal nommé dead), reproduisant l'activité de décomposition des bactéries qui enrichit le sol en matières minérales :

```
# si l'agent perçoit le signal dead
if {intensity($dead)}
  # il récupère le numéro d'identification de l'agent mort dont le signal
  # est le plus fort
  set agent_mort {max_intensity_id($dead)}
  # il récupère la valeur du paramètre d'énergie de l'agent mort
  set energie_agent_mort {value($agent_mort)('energy')}
  # s'il est supérieur à 1
  if {$energie_agent_mort >= 0.2}
    # l'agent feuille augmente sa propre énergie et abaisse celle de l'agent mort
    set energy {$energy + 0.1}
    dset {$agent_mort} "energy" {$energie_agent_mort - 0.2}
  fi
fi
```

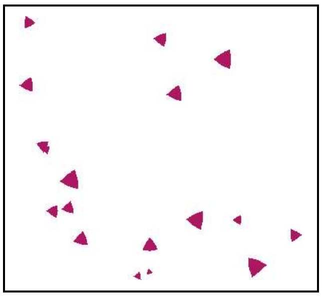
Dans cet exemple, un agent n'est « mort » que du point de vue de l'écosystème. Il n'est pas encore supprimé de la simulation puisqu'il continue à émettre un signal susceptible d'être perçu par d'autres agents. Il continue par ailleurs à exécuter son script d'activation, et il ne se supprimera de la simulation que lorsque son énergie deviendra presque nulle, selon le script suivant :

```
# tant que l'agent est « vivant » (sa variable local alive vaut 1)
if {$alive}
  # l'agent exécute son comportement normal
  # ...
else
  # sinon, si son énergie est inférieure à 1, l'agent se supprime de la simulation
  if {$energy < 1}
    die
  fi
fi
```

Dans certaines conditions, les agents feuilles sont susceptibles de se "reproduire", produisant alors un double d'eux-mêmes, alors que dans d'autres conditions, ils peuvent au contraire mourir. Dans le premier cas, il est nécessaire que l'agent feuille ait une énergie suffisamment élevée après un temps de gestation donné, ce qui lui permet de donner naissance à une "nouvelle pousse", un nouvel agent feuille qui prend dès lors son autonomie et se trouve soumis aux mêmes règles de développement que son parent. A l'inverse, si l'énergie d'un agent feuille devient insuffisante, ou si celui-ci atteint l'âge limite, il meurt et est recyclé, servant à la croissance des autres agents feuilles :

```
init feuille
  # initialise 2 compteurs : temps restant avant de se reproduire ou de mourir
  set cpt_nais {1000+irand(1000)}
  set cpt_mort {5000+irand(5000)}
  # l'agent est vivant
  set alive 1
end_init

activate feuille
  if {$alive}
    # ajustement de l'énergie (voir plus haut) ...
    # décrément des compteurs de reproduction (cpt_nais) et de mort (cpt_mort)
    set cpt_nais {$cpt_nais - 1}
    set cpt_mort {$cpt_mort - 1}
    # si l'énergie est > à 50 et que le compteur de reproduction a atteint 0
    if {(($energy>50) && ($cpt_nais<0))}
      # émet un son, se reproduit et réinitialise son compteur de reproduction
      play_sound [file join $jdh sounds nais_feuille.au] 0
      reproduce
      set cpt_nais {1000 + irand(1000)}
    fi
    # si le compteur de durée de vie atteint 0, émet un son
    if {$cpt_mort < 0}
      play_sound [file join $jdh sounds mort_feuille.au] 0
      set dead 10
      set dead -20
      set alive 0
    fi
  fi
end_activate
```

V.4.3. LES AGENTS HERBIVORES



Les agents feuilles ont encore autre chose à redouter, c'est la voracité des agents herbivores. Comme leur nom l'indique, ceux-ci se nourrissent en effet exclusivement des agents feuilles. L'opération consiste, pour un agent herbivore, à diminuer le paramètre d'énergie de la feuille qu'il mange, tout en augmentant son propre paramètre d'énergie. Dans le même temps les agents herbivores doivent faire attention à ne pas se laisser attraper par les agents carnivores. Les herbivores doivent donc décider à chaque instant de l'action la plus appropriée à entreprendre, fuir un prédateur, se rapprocher d'une feuille, manger une feuille ou encore se déplacer aléatoirement, en fonction de la perception qu'il a de la situation. Cette prise de décision s'effectue selon une architecture de subsomption [Brooks 1999], comme le montre la figure V.12.

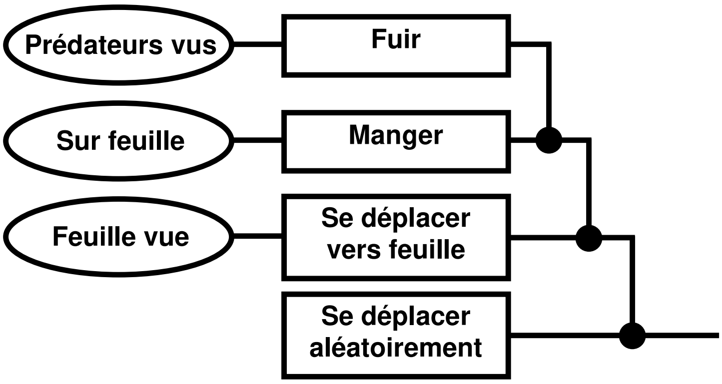


figure V.12 – Schéma décisionnel des agents herbivores.

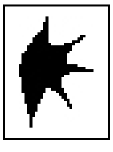
Les différentes actions envisageables sont organisées par priorités décroissantes du haut vers le bas, un action d'une certaine priorité inhibant toutes les actions de priorités inférieures. Le schéma décisionnel d'un herbivore se lit donc approximativement de la manière suivante :

```
si je perçois un prédateur alors je le fuis
sinon si je me trouve sur une feuille alors je la mange
sinon si je perçois une feuille alors je me dirige vers elle
sinon je me déplace aléatoirement
fin si
```

Toute cette activité n'est pas gratuite et, si elle permet à l'agent herbivore de gagner en énergie lorsqu'il trouve une feuille à manger, elle lui en coûte également, en particulier lorsqu'il tente d'échapper à un prédateur carnivore. De manière plus générale, le métabolisme des herbivores, c'est-à-dire l'ensemble des réactions servant à maintenir l'individu en vie, consomme régulièrement de l'énergie, consommation d'énergie que l'herbivore doit compenser en se nourrissant. L'encadré suivant en constitue la traduction dans le langage de script de la plate-forme.

```
activate herbivore
  # comportements analogues aux feuilles concernant la reproduction ou la mort

  # architecture de décision des agents herbivores
  switch
    # si l'agent perçoit un carnivore, il s'enfuie
    case {intensity($carni_presence) > 3}
      set speed_vec {gradient($carni_presence) * $energy * 0.01}

    # si l'agent est sur une feuille et que son énergie est inférieure à 50
    case {(intensity($fe_body) > 1) && ($energy < 50)}
      # l'agent s'écarte d'éventuels autres agents herbivores
      if {intensity($herbi_body) > 3}
        set accel_vec {gradient($herbi_body) * $energy * 0.01}
      fi
      # il récupère le n° d'identification et la valeur d'énergie de la feuille
      set feuille_id {max_intensity_id($fe_body)}
      set feuille {value($feuille_id)('energy')}
      # si cette valeur est supérieure à 1, l'agent peut manger
      if {$feuille > 1}
        set energy {$energy + 0.2}
        dset {$feuille_id} "energy" {$feuille - 0.55}
      fi

    # si l'agent perçoit une feuille et que son énergie est inférieure à 50
    case {(intensity($fe_presence) > 0) && ($energy < 50)}
      # il se déplace vers la feuille
      set accel_vec {gradient($fe_presence) * (-0.1)}

    # si aucune des autres conditions n'est vérifiée
    default
      # l'agent se déplace aléatoirement en donnant une impulsion
      if {irand(10) == 0}
        set accel_x {rand(10)-5}
        set accel_y {rand(10)-5}
      fi
  end_switch

  # ajuste l'énergie (décroissance continue + décroissance due aux déplacements)
  set energy {$energy-((sqrt($speed)*0.01)+0.01)}
  # ajuste le signal de présence et la taille de l'agent en fonction de l'énergie
  set herbi_presence {-(90-$energy/2)}
  set herbi_presence {(0.1*(90-$energy/2))}
  set size {$energy/5}
end_activate
```

V.4.4. LES AGENTS CARNIVORES



De même que les herbivores, les agents carnivores doivent compenser leur dépense régulière d'énergie en attrapant des agents herbivores qui constituent leur nourriture. La figure V.13 reproduit la stratégie utilisée à cet effet.

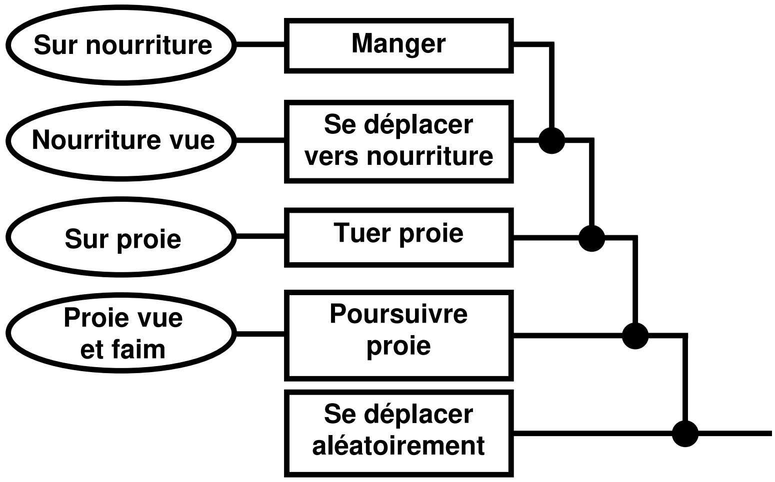


figure V.13 - Schéma décisionnel des agents carnivores

Ce qui se traduit, du point de vue du carnivore, de la manière suivante :

```
si je me trouve à côté de nourriture (une proie morte) alors je mange
sinon si je vois de la nourriture alors je me déplace vers elle
sinon si je poursuis une proie et que je la rattrape alors je la tue
sinon si je perçois une proie et que j'ai faim alors je la pourchasse
sinon je me déplace aléatoirement
fin si
```

Comme pour les herbivores, un équilibre doit être trouvé afin que les efforts consentis pour chasser une proie soient compensés par l'énergie apportée par la proie. Pour les herbivores comme pour les carnivores, cette équilibre est essentiel puisqu'il conditionne la capacité à se reproduire, et peut au contraire être sanctionné par la mort de l'organisme. Le comportement des agents carnivores étant très similaire dans son principe à celui des agents herbivores, nous ne présenterons pas sa traduction précise dans le langage de script de la plate-forme, le lecteur intéressé pouvant se reporter à l'annexe D.

V.4.5. DYNAMIQUE GLOBALE

L'équilibre de l'ensemble de l'écosystème est à la fois dynamique et global. Il est dynamique parce que le système est ouvert, recevant des apports d'énergie de la part du soleil qui permettent la naissance régulière de nouveaux organismes, énergie perdue au cours de sa transformation en matière organique et en travail. Il est global parce que l'activité des agents carnivores est en partie conditionnée par celle des herbivores, elle-même dépendante de la croissance des feuilles, elle-même liée à l'évolution de la météorologie. C'est ce que montrait la figure V.11. La figure V.14 donne un exemple d'évolution de la population des trois familles d'agents, feuilles, herbivores, carnivores, en fonction du temps, au cours d'une simulation pour laquelle les conditions météorologiques étaient intermédiaires, ni très favorables, ni très défavorables.

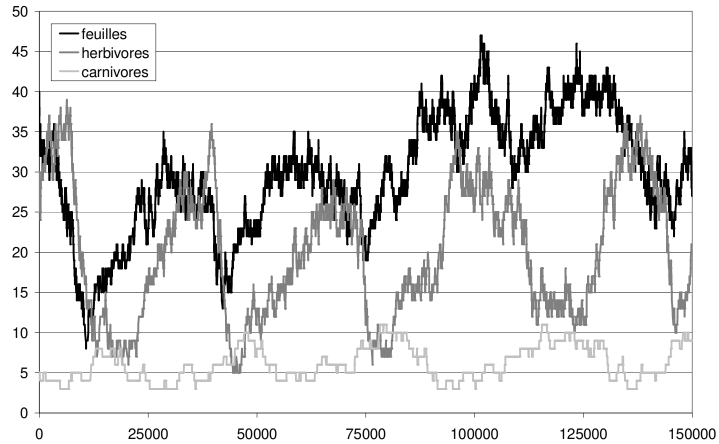


figure V.14 – Exemple d'évolution des populations en feuilles, herbivores et carnivores, pendant 150000 cycles de simulation ; conditions météorologiques : nébulosité = 4 ; température = 15°C; pluie = 30min/h.

Les courbes d'évolution des trois populations montrent très nettement l'interrelation existant entre les trois types d'organismes. L'augmentation du nombre de feuilles se traduit par l'augmentation du nombre d'herbivores, qui se traduit à la fois par la baisse du nombre de feuilles et par l'augmentation du nombre de carnivores, ce qui entraîne la diminution du nombre d'herbivores, etc. (voir figure V.15).

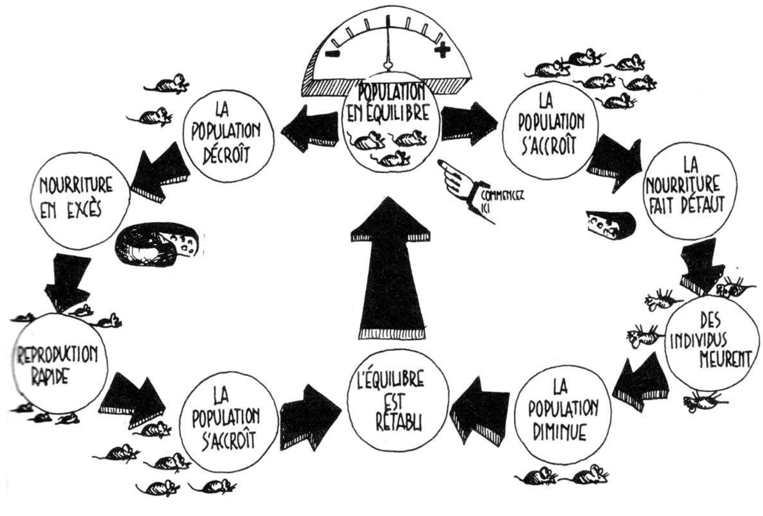


figure V.15 – Régulation des populations dans un écosystème (dans [de Rosnay 1975], p. 33).

V.5. UNE ŒUVRE INTERACTIVE

Le dernier principe ayant présidé à la réalisation du *Jardin des Hasards* était de rendre l'image accessible au spectateur en lui permettant d'interagir avec elle. En rendant l'image réactive à l'action du spectateur, celle-ci en devient encore plus familière et plus vivante. Elle est plus familière du fait de l'annulation de la distance existant traditionnellement entre l'œuvre et le spectateur, ce dernier pouvant s'approprier complètement l'image, et la modifier à son gré. Elle est plus vivante puisque, en plus d'évoluer spontanément de manière automatique, elle est capable de réagir aux actions du spectateur, qui peut ainsi tester cette « vie » en éprouvant ses limites.

V.5.1. LE SPECTATEUR METEOROLOGUE

Le *Jardin des Hasards* évolue spontanément au rythme de la réception des données météorologiques. Dans une démarche didactique, le sectateur a également la possibilité de choisir lui-même les conditions météorologiques du moment, et ainsi visualiser les variations correspondantes de l'aspect de l'image. Plus ou moins de nuages et de pluie, une température plus ou moins élevée, un vent plus ou moins fort, d'est ou d'ouest, du nord ou du sud, le spectateur peut, en ajustant lui-même chacune des variables, décomposer la construction de l'image et la représentation qui est faite de la météorologie. Il en retire ainsi une meilleure compréhension de la manière dont l'image est construite et évolue. Par ailleurs, puisque l'image est construite comme un écosystème de formes colorées qui dépend dans son évolution des conditions météorologiques plus ou moins favorables, le spectateur peut, en agissant sur la météorologie, expérimenter les effets des changements climatiques sur le développement et l'équilibre de l'écosystème. Dans une perspective d'analyse du fonctionnement d'un système complexe, cette notion d'expérimentation directe par l'utilisateur est fondamentale, en offrant la possibilité d'effectuer certaines hypothèses quant aux mécanismes qui régissent le fonctionnement du système et en testant ces hypothèses en interagissant avec le système lui-même.

V.5.2. LE SPECTATEUR JARDINIER

Manipuler les données météorologiques peut être intéressant, mais l'interaction avec l'œuvre reste indirecte. Pour rendre cette interaction plus directe, un ensemble d'outils a été développé, qui permettent au spectateur d'agir sur l'image du *Jardin des Hasards* comme le ferait un jardinier qui entretient son jardin.

V.5.2.1. Mécanismes d'interaction

Avant de décrire plus précisément les différents outils à la disposition du spectateur, il est intéressant d'examiner la manière dont cette interaction est mise en œuvre dans le cadre de notre plate-forme, et comment l'action du spectateur est prise en compte par les agents. Nous avons expliqué au paragraphe IV.3.6.2 comment les informations concernant les actions de l'utilisateur avec la souris et le clavier étaient transmises aux agents de simulation par l'intermédiaire d'agents d'information dédiés à la gestion de ces périphériques. Il nous faut maintenant présenter la manière dont ces informations peuvent être exploitées par les agents de simulation, et comment ils peuvent y réagir en modifiant leur comportement.

Nous avions mentionné, pour les agents de simulation, la possibilité de connaître les coordonnées de la souris ainsi que l'état de ses différents boutons. Pouvant également tester la présence de la souris au-dessus de lui (i.e. à l'intérieur de la forme correspondant à l'agent), l'agent peut alors se comporter comme un composant d'interface, attendant que l'utilisateur clique sur lui pour réaliser telle ou telle action. De ce fait, n'importe quel agent de simulation peut, indépendamment de ses autres comportements, réagir aux actions de l'utilisateur le concernant. Autrement dit, pour peu que la possibilité ait été prévue dans le script d'activation, et à la condition que l'agent soit visible, l'utilisateur peut interagir directement avec n'importe lequel des agents de simulation :

```
# script d'activation d'un agent bouton
activate agent_bouton
  # si un bouton de la souris a été pressé et que la souris se trouve au-
  # dessus de l'agent-bouton
  if {$button_pressed && $mouse_over}
    # affichage d'un message à l'écran
    puts {'bonjour, je suis l agent n° ' + $id}
  fi
end_activate
```

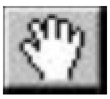
Il est également possible de penser à une deuxième forme d'interaction, où l'utilisateur se glisse en quelque sorte dans la peau d'un agent de simulation. Pour ce faire, on peut imaginer de programmer un agent particulier, appelons-le un **`chat`**, de manière à ce qu'il ajuste en permanence sa position pour suivre tous les mouvements de la souris (encadré page suivante).

```
# script d'activation du chat
activate chat
  # ajuste sa position sur celle du curseur
  set pos_x {$curseur_x}
  set pos_y {$curseur_y}
end_activate
```

Etant un agent comme les autres, le **chat** peut utiliser les mêmes modes d'interaction que n'importe quel agent de simulation. En utilisant des signaux propagés dans l'environnement, il peut percevoir les autres agents et être perçu d'eux, mais il peut également échanger directement de l'information avec eux, soit en utilisant des variables globales, soit en modifiant à distance les paramètres d'un autre agent. Par l'intermédiaire du **chat**, l'utilisateur peut donc interagir avec les agents de simulation comme s'il était lui-même un agent, ce qui enrichit énormément l'éventail des interactions possibles.

Les mécanismes que nous venons de décrire ont en effet servi à implanter des agents-outils grâce auxquels l'utilisateur peut réorganiser l'image du *Jardin des Hasards*, en même temps qu'ils lui permettent d'étudier la dynamique de l'écosystème simulé. Ces outils ne font pas partie de la plate-forme elle-même, leur utilisation étant décrite par l'intermédiaire du langage de script de la plate-forme, au même titre que les comportements des différents agents que nous venons de décrire. Ils sont donc très facilement reconfigurables en fonction du type d'interaction voulu.

V.5.2.2. Main



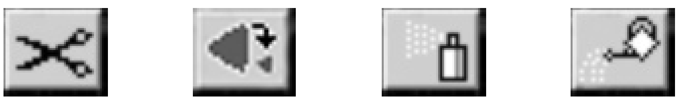
Le premier de ces outils est une **main** qui permet de saisir les agents et de les déplacer à travers l'écran. Cet outil est disponible par l'intermédiaire d'un agent-bouton. Lorsque l'utilisateur clique sur cet agent, dont l'image est reproduite ci-dessus, l'agent-bouton indique à l'agent **chat** qu'il doit donc se comporter comme une main.

```
# script du bouton de sélection de l'outil
activate bouton_main
  if {$button_pressed && $mouse_over}
    # indique au chat d'utiliser l'outil 0 (la main)
    dset {$chat_id} "tool" 0
  fi
end_activate
```

Suivant précisément tous les mouvements de la souris, ce **chat-main** est chargé, lorsque l'utilisateur appuie à nouveau sur le bouton gauche de la souris, de repérer l'agent de simulation le plus proche de lui, en récupérant son numéro d'identification (variable réservée **id**). Par la suite, tant que l'utilisateur ne relâche pas le bouton, le **chat-main** oblige l'agent sélectionné à suivre la souris en modifiant à distance sa position pour la faire correspondre avec celle de la souris.

```
# script d'activation du chat
activate chat
  set pos_x {$curseur_x}
  set pos_y {$curseur_y}

  # si le bouton gauche de la souris est enfoncé
  if {$button_pressed && ($button == 1)}
    # récupère le n° d'identification de l'agent le plus proche
    set agt {max_intensity_id($presence)}
  fi

  # si le bouton gauche reste enfoncé
  if {$button_down && ($button == 1)}
    switch
      case {$tool == 0}
        # change à distance les coordonnées de l'agent sélectionné pour les faire
        # correspondre aux coordonnées du chat (donc du curseur)
        dset {$agt} "pos_x" {$pos_x}
        dset {$agt} "pos_y" {$pos_y}
    end_switch
  fi
end_activate
```

De la sorte, l'utilisateur peut déplacer les différents agents et ainsi recomposer l'image à son gré. Mais l'aspect le plus intéressant est que, par cette technique, l'agent déplacé continue à se comporter comme si rien ne s'était passé, ce qui permet d'étudier ce comportement de manière un peu plus fine. En attrapant par exemple un agent herbivore et en le rapprochant d'un agent carnivore, on peut observer la réaction de ce dernier, ce qui permet de savoir, suivant qu'il attaque ou non l'herbivore, s'il a faim ou non. Le cas échéant, on peut alors lui donner à manger en le laissant approcher de la main ou au contraire le « narguer » en le maintenant à distance. De manière plus générale, il est ainsi possible de réaliser facilement des expériences très simples facilitant la compréhension des comportements des différents agents de simulation.



Tuer Cloner Affaiblir Renforcer

figure V.16 – Outils d'entretien du *Jardin des Hasards*.

V.5.2.3. Sécateur et clonage

Outre la **`main`**, outil à la fois très simple et aux possibilités très générales, un certain nombre d'outils plus spécifiques ont été définis pour manipuler les agents. Deux outils permettent de supprimer certains agents (**`sécateur`**) ou d'en dupliquer d'autres (outil de **`clonage`**). Ceux-là fonctionnent selon un principe analogue à celui de la main, sélectionnant un agent cible, puis agissant sur cet agent pour le tuer ou le faire se reproduire.

```
# script d'activation du chat
activate chat
  # si le bouton gauche de la souris est enfoncé
  if {$button_pressed && ($button == 1)}
    # récupère le n° d'identification de l'agent le plus proche
    set agt {max_intensity_id($presence)}
    switch
      # indique à l'agent sélectionné qu'il doit mourir
      case {$tool == 1}
        dset {$agt} "alive" 0
      # indique à l'agent sélectionné qu'il doit se reproduire
      case {$tool == 2}
        dset {$agt} "cloned" 1
    end_switch
  fi
end_activate

# script d'initialisation d'un agent cible (agent_cible doit ici être remplacé par
# feuille, herbivore ou carnivore)
init agent_cible
  set cloned 0
  set alive 1
end_init

# script d'activation d'un agent cible (agent_cible doit ici être remplacé par
# feuille, herbivore ou carnivore)
activate agent_cible
  # si la variable cloned vaut 1, alors l'agent se reproduit une fois
  if {$cloned}
    reproduce
    set cloned 0
  fi
end_activate
```

V.5.2.4. Arrosoir et bombe

Deux autres outils, enfin, peuvent être utilisés pour renforcer ou au contraire affaiblir les agents de l'écosystème en augmentant ou diminuant leur énergie (**`arrosoir`** et **`bombe`**). Ceux-là fonctionnent de manière légèrement différente puisqu'ils peuvent avoir une action simultanée sur plusieurs agents. Pour cela, ils propagent autour d'eux, lorsque l'utilisateur enfonce le bouton gauche de la souris, un signal qui influence les agents le percevant. Un agent qui perçoit le signal de l'arrosoir verra ainsi son énergie augmenter tandis qu'un agent qui preçoit le signal de la bombe verra son énergie diminuer, proportionnellement à l'intensité du signal perçu (encadré page suivante).

```
# déclaration de deux signaux que le chat peut propager
family chat
  externalParam bombe linear 5 0 50 5 0 50
  externalParam arrosoir linear 5 0 50 5 0 50
end_family

activate chat
  # lorsque le bouton gauche de la souris est enfoncé, les signaux sont stoppés
  if {$button_pressed && ($button == 1)}
    set arrosoir 0
    set bombe 0
  fi

  # si le bouton gauche de la souris reste enfoncé
  if {$button_down && ($button == 1)}
    switch
      # la bombe est sélectionnée
      case {$tool == 3}
        set arrosoir 0
        set bombe 5
        set bombe {-30}
      # l'arrosoir est sélectionné
      case {$tool == 4}
        set bombe 0
        set arrosoir 5
        set arrosoir {-30}
    end_switch
  fi
end_activate

# script d'activation d'un agent cible (agent_cible doit ici être remplacé par
# feuille, herbivore ou carnivore)
activate agent_cible
  # si le bouton gauche de la souris reste enfoncé
  if {$button_down}
    set energy {$energy + intensity($arrosoir) - intensity($bombe)}
  fi
end_activate
```

V.5.2.5. Discussion

Avec les outils du jardinier, nous avons vu comment les idées présentées en conclusion du chapitre précédent, concernant la construction d'interfaces multi-agents, pouvaient être mises en œuvre de manière pratique. La démarche artistique se confond ici avec une démarche didactique, également très importante dans le cadre du *Jardin des Hasards*. Cette démarche didactique transparaît à travers l'affichage qui est proposé du jardin virtuel, où la taille d'un organisme est notamment en relation avec son énergie, rendant ainsi perceptible la lutte perpétuelle de chacun des organismes pour sa survie. Nous venons de voir également comment, en attrapant ces organismes, en les déplaçant, en les mettant en contact les uns avec les autres, le spectateur peut modifier le comportement de quelques uns d'entre eux, et ainsi en retirer une meilleure compréhension. Dans le même temps, ces interactions locales peuvent influer sur l'équilibre écologique global du *Jardin des Hasards*, mettant ainsi en évidence la relation entre interactions locales et équilibres globaux.

Les démarches artistique et didactique se confondent également avec une démarche de représentation de système complexe, notamment dans une perspective d'analyse du fonctionnement du système. De par l'interaction directe qu'il peut avoir avec le système, l'utilisateur a la possibilité de mener de véritables expériences, similaires à celles qu'il pourrait mener sur un véritable système. Pour analyser le fonctionnement du système, l'utilisateur est amené à formuler certaines hypothèses qu'il peut ensuite mettre à l'épreuve par la simulation. Dans la plupart des cas, ces simulations peuvent se dérouler de manière automatique, fournissant des informations essentiellement quantitatives. Dans d'autres, l'interaction directe avec le système en fonctionnement peut permettre une compréhension plus qualitative, intuitive, des mécanismes en jeu.

Enfin, dans une perspective de contrôle d'un système complexe, visant à s'assurer en temps réel du fonctionnement correct du système, il est indispensable qu'en cas de détection d'un problème particulier, l'opérateur puisse d'une part analyser l'origine du dysfonctionnement, et d'autre part agir pour en limiter les conséquences. Il est important également que l'interface soit la plus intuitive possible, au point de faire oublier sa présence et de donner à l'opérateur l'impression d'être en prise directe avec le système [Vicente et Rasmussen 1992]. Par les modes d'interaction développés avec le *Jardin des Hasards*, grâce auxquels l'utilisateur peut manipuler directement les agents du système, ce lien direct entre système et opérateur est assuré d'une manière très naturelle, en rendant l'interaction aussi proche que possible de celle que l'on pourrait avoir avec le système réel.

V.6. CONCLUSION

Nous avons, jusqu'à présent, évoqué le spectateur d'une manière abstraite et générale, comme le destinataire de l'œuvre artistique. Avant de conclure sur le *Jardin des Hasards* comme moyen de représentation de systèmes complexes dans une perspective artistique et didactique, il est nécessaire d'évoquer les spectateurs réels que nous avons eu l'occasion de rencontrer au cours des expositions dans lesquelles l'œuvre a été montrée, ainsi que ceux vers lesquels nous nous tournons à présent.

V.6.1. L'ACCUEIL DU PUBLIC

Alors qu'il n'était encore qu'au stade de projet, le *Jardin des Hasards* a obtenu le deuxième prix de l'exposition internationale *ARSLAB2 - In Corso Ars Technica / Ecosystèmes techno-artistiques*[25]. Indépendamment de la réalisation technique à laquelle le projet a ensuite donné lieu, ce prix démontre l'intérêt, d'un point de vue artistique, des idées qu'il contient. Cet intérêt est d'ailleurs multiple puisque le projet a pu être montré aussi bien en tant qu'écosystème artistique à l'exposition *Like Life*[26], qu'en tant que système de représentation de la météorologie à l'exposition *Cartographier le monde*[27]. Dans un cas comme dans l'autre, l'accueil du public s'est montré très favorable.

L'exposition *Like Life*, qui s'adressait en particulier, mais pas seulement, à une population de chercheurs en vie artificielle, a permis de confirmer que l'aspect vivant de l'œuvre fonctionnait bien. Auprès d'une population avertie, habituée des simulations d'écosystèmes artificiels au point d'en être parfois lassée, l'image du *Jardin des Hasards* restait très attrayante. L'aspect graphique des agents du système, abstrait mais expressif, fournit en effet un sentiment immédiat et fort d'une vie derrière l'image, encore renforcé par le lien entre cet écosystème virtuel et la météorologie réelle d'un lieu distant.

---

[25] Cette manifestation s'est déroulée à Turin (Italie) en octobre 1995.

[26] Organisée conjointement par le Brighton Media Centre et l'Université du Sussex, l'exposition *Like Life* s'est déroulée à Brighton (Angleterre) du 26 juillet au 6 août 1997. Elle s'est intéressée à l'utilisation des principes et techniques de la vie artificielle pour la création d'œuvres artistiques.

[27] Organisée conjointement par la Saline Royale d'Arc et Senans et la Cité des Sciences et de l'Industrie, l'exposition *Cartographier le monde, de l'aquarelle au pixel* s'est déroulée à la Saline Royale d'Arc et Senans (Jura, France) du 27 avril au 31 octobre 1999, et elle se poursuivra à la Cité des Sciences et de l'Industrie à partir du 21 décembre 1999 et jusqu'à la fin avril 2000. Comme son nom l'indique, cette exposition s'est intéressée à toutes les techniques liées à la cartographie.

L'exposition *Cartographier le monde* s'adresse quant à elle à un public très large, mais est en particulier fréquentée par de nombreux groupes scolaires, les visites étant encadrées par des animateurs qui peuvent expliquer les principes du *Jardin des Hasards*. Nous avons pu constater, à cette occasion, la véritable fascination que cette œuvre presque vivante pouvait exercer sur des enfants. Dans l'image du *Jardin des Hasards*, ceux-ci trouvent en effet matière à s'identifier, à imaginer, à rêver, à raconter des histoires. L'image est suffisamment évocatrice pour éveiller leur intérêt, tout en restant suffisamment abstraite pour laisser la place à leur imagination, chaque enfant pouvant incorporer l'image dans son propre monde, voire reconstruire son monde à l'intérieur de l'image. De manière plus générale, l'utilisation d'un écosystème artificiel dans la représentation de la météorologie, loin de constituer une distraction pour la perception des conditions météorologiques, rend la représentation d'emblée attractive, naturelle, familière, et facilite finalement la perception de l'ambiance météorologique transmise par l'image.

L'attrait de l'œuvre, pour les uns et les autres, s'est trouvé confirmé lors de l'organisation d'ateliers et de conférences à l'occasion de la *Semaine de la Science*, à la Cité des Sciences et de l'Industrie. A cette occasion, c'est l'aspect didactique du *Jardin des Hasards,* plus que son aspect artistique, qui a été exploité. Par des manipulations simples, le *Jardin des Hasards* permet en effet d'expliquer, à un public très large, les principes généraux à l'œuvre au sein d'écosystèmes, en montrant les interactions élémentaires entre organismes en compétition, mais également la dynamique globale du système résultant de ces interactions locales. Il permet également de mettre en évidence la fragilité des équilibres naturels. En supprimant par exemple tous les agents carnivores du système, le nombre d'agents herbivores augmente rapidement jusqu'à représenter un poids trop lourd pour la végétation qui se trouve alors elle-même mise en danger. Dans certains cas, le déclin de la végétation est si brutal qu'il entraîne à son tour l'extinction des agents herbivores.

Ces qualités tant artistiques que didactiques ont conduit à un accord conclu avec la Cité des Sciences et de l'Industrie pour l'utilisation du *Jardin des Hasards* dans l'aménagement d'un musée consacré aux jardins[28]. Dans ce cadre, le *Jardin des Hasards* sera utilisé aussi bien en tant qu'œuvre artistique, que pour la conception de bornes interactives explicatives et didactiques.

[28] Ce musée sera installé au château de Trévarez (Morbihan, France).

V.6.2. RETOUR SUR LA DEMARCHE DE CREATION ARTISTIQUE

Nous avons débuté ce chapitre en donnant la parole à B. Gortais, à l'origine du projet du *Jardin des Hasards*. Avant de refermer la volet artistique de ce travail, il est logique de le laisser conclure [Gortais 1999 comm. pers.] :

> *« Le Jardin des Hasards, à cause de la durée de la recherche et à cause de son caractère pluridisciplinaire a demandé une véritable conduite de projet. Le cahier des charges initial a été finalement dépassé. L'œuvre numérique s'est modifiée devenant un écosystème générique, un « jardin généralisé ». L'œuvre plastique, composition du temps par les formes, les mouvements et les couleurs a naturellement conduit à la question de la composition du temps par le son. Avec elle émergent des questions nouvelles de rythme et de mise en scène en tant qu'installation. Le texte poétique apparaît petit à petit à coté de l'image animée. Après l'aboutissement du « Jardin des Hasards », ces questions peuvent désormais être posées avec un nouveau projet baptisé « Mutations ». En collaboration avec le Grame[29] de Lyon, il pose la question d'une tresse possible entre composition plastique et composition musicale. Ce projet réutilisera l'outil de création conçu pour le « Jardin des Hasards ».*
>
> *A l'atelier, le travail très spécifique lié à la perception de l'instant s'est développé dans un grand nombre d'aquarelles dont le travail est devenu quotidien. Il forme, aujourd'hui, le fondement des autres créations. De nouvelles matières, tissus collés, plâtres gravés, ont fait leur apparition et, depuis deux ans, les cadres des œuvres disparaissent et les formes à l'intérieur d'une œuvre donnée ne s'appuient plus sur le bord du cadre. La peinture à l'huile a presque disparu, probablement parce qu'elle exige des séances longues et régulières. Je n'ai pu éviter que l'atelier et le laboratoire se concurrencent sur le temps. La conception du « Jardin des Hasards », par couches successives de formes colorées a inspiré un travail qui débute avec un nouveau matériau, le perspex[30]. Le support transparent, utilisé par couches superposées, introduit une ouverture et un renouvellement très profonds de la recherche picturale.*
>
> *Le dialogue continue comme une aventure féconde et passionnante. Je ne suis pas pressé de lui trouver une conclusion même provisoire. »*

V.6.3. NOUVEAUX QUESTIONNEMENTS

Nous évoquions en introduction un processus de développement en spirale. Il apparaît très nettement dans la démarche de création de B. Gortais, et il a conduit à la définition d'un nouveau projet artistique baptisé *Mutations* (voir figure V.17). Celui-ci constitue une tentative de réponse aux questionnements introduits par le *Jardin des Hasards*, anticipant, dans le même temps, les perspectives ouvertes par les développements de la plate-forme de conception multi-agent.

---

[29] Centre National de Création Musicale, Laboratoire de Recherche en Informatique Musicale.

[30] Sorte de Plexiglas.

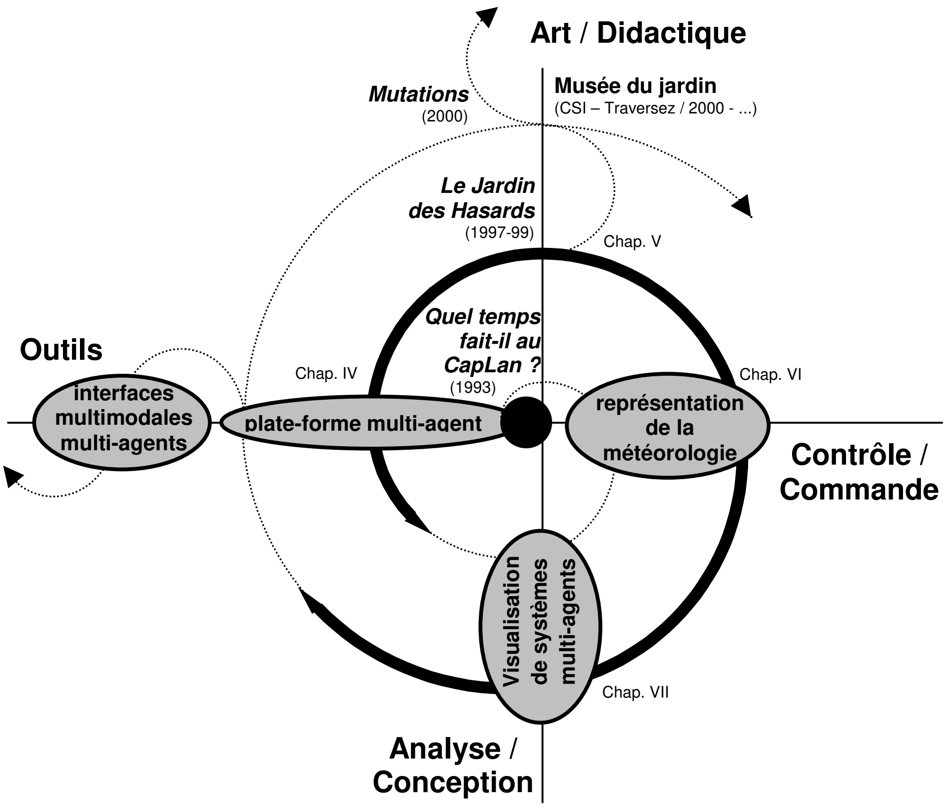


figure V.17 – Les développements de la plate-forme évoqués à la fin du chapitre précédent, et l'expérience du *Jardin des Hasards*, ont conduit à la définition du projet artistique *Mutations*, ainsi qu'à un accord conclu avec la Cité des Sciences et de l'Industrie pour la conception de bornes interactives pédagogiques.

Plus précisément, il s'agit de s'intéresser aux processus de génération des formes, qu'elles soient plastiques ou musicales, utilisant l'œuvre comme lieu d'une évolution génétique et proposant au spectateur d'intervenir pour orienter cette évolution. Le principe imaginé consiste à doter les agents de génotypes artificiels décrivant leur forme plastique et musicale et leurs comportements, par l'utilisation de langages de description spécifiques et de règles de réécriture du λ-calcul [Orlarey et al. 1994]. En proposant simultanément quatre écrans correspondant à quatre processus distincts d'évolution, le spectateur est amené à constituer un facteur de sélection, de par sa présence préférentielle devant un écran plutôt qu'un autre. Dans le même temps, des fertilisations croisées pourraient intervenir entre écrans différents, de manière à introduire un renouvellement permanent de chacun de ces écosystèmes. Le projet *Mutations* sera au programme du festival de musique contemporaine *Musiques en Scène*, organisé à Lyon en mars 2000.

Si le *Jardin des Hasards* a été conçu et réalisé comme une œuvre artistique, son intérêt potentiel pour la représentation de systèmes complexes est manifeste, ainsi que nous l'avons suggéré en filigrane tout au long de ce chapitre. De par la représentation « ambiante » qu'il propose en temps réel des conditions météorologiques, de par le filtrage des données qu'effectue l'écosystème artificiel, de par la volonté enfin de faire participer le spectateur à la construction de la représentation, le *Jardin des Hasards* préfigure, sous une forme artistique, un type nouveau d'interfaces de contrôle et d'analyse de systèmes complexes. Ces interfaces se basent, du point de vue technique, sur le modèle de la plate-forme présentée au chapitre IV, et d'un point de vue cognitif, sur le type de représentation proposé par le *Jardin des Hasards*. Nous avons donc à présent tous les éléments nécessaires pour aborder la question de l'utilisation concrète des ces principes dans une perspective, non plus artistique mais de contrôle ou d'analyse d'un système complexe, ce qui constitue le sujet des deux derniers chapitres.

TROISIEME PARTIE

RESULTATS ET LEÇONS

Après deux parties consacrées au positionnement de la problématique, à la présentation d'outils développés pour permettre son étude, et à la description du projet artistique dont ces outils ont permis la réalisation, nous abordons, avec cette dernière partie, les résultats et les leçons. Projet artistique, le *Jardin des hasards* constitue une représentation ambiante de la météorologie. Si l'on souhaite dépasser le point de vue strictement artistique et envisager des applications plus concrètes et industrielles de notre approche, il est nécessaire d'évaluer la qualité de cette représentation en termes de précision et de rapidité de perception, mais également en termes d'expressivité, de confort d'utilisation, etc. C'est l'objet du chapitre VI. Plus généralement, cette expérience artistique nous a amenés à réfléchir aux moyens permettant d'exprimer graphiquement la structuration dynamique de systèmes complexes. Le chapitre VII présente, de manière incrémentale, la construction de différentes représentations visuelles d'un même exemple, un système multi-agent de proies et de prédateurs.

CHAPITRE VI

REPRESENTER LA METEOROLOGIE

Nous venons de présenter le *Jardin des Hasards*, tel qu'il a été imaginé dans une perspective artistique, en soulignant son intérêt potentiel dans une perspective de représentation de systèmes complexes. Une des facettes de l'œuvre étant de constituer une représentation ambiante, en temps réel, de la météorologie, nous avons décidé, pour valider notre intuition, d'étudier les caractéristiques de l'œuvre artistique en tant que mode de représentation du système complexe météorologique. Plus précisément, la démarche adoptée dans le *Jardin des Hasards* correspond à une problématique de contrôle (supra II.3.4) visant à traduire en temps réel, l'état du système météorologique, et non à une problématique d'analyse (supra II.3.3) pour décomposer et rendre compréhensible le fonctionnement du système météorologique. Nous verrons au chapitre suivant que la représentation de l'écosystème artificiel du *Jardin des Hasards* correspond davantage à cette dernière problématique.

Nous nous plaçons donc, dans le chapitre présent, dans une problématique de contrôle et de commande, appliquée au système météorologique. Il s'agit d'une part d'évaluer dans quelle mesure l'image du *Jardin des Hasards* traduit effectivement l'état courant de la météorologie, d'autre part de déterminer si cette représentation permet en retour de prendre des décisions appropriées en rapport avec les conditions météorologiques.

VI.1. PROBLEMES DE PERCEPTION

Les notions de perception présentées au paragraphe III.2 étaient relativement générales. Dans un contexte de contrôle de système complexe, des problématiques spécifiques relatives à la perception doivent être prises en compte.

VI.1.1. PERCEPTION FOCALISEE ET PERCEPTION AMBIANTE

Dans la vie de tous les jours, l'information nous parvient simultanément par l'intermédiaire de deux voies complémentaires, la perception focalisée et la perception périphérique. En focalisant notre attention sur une partie de notre environnement, un objet ou une personne par exemple, nous extrayons de manière consciente une grande masse d'informations concernant cet objet (sa taille, sa couleur, sa fonction, etc.) ou cette personne (son âge, son sexe, la couleur de ses yeux, etc.). Dans le même temps, nous enregistrons, de manière passive et automatique, une quantité également très importante d'informations concernant la présence et l'activité d'autres personnes, le style de la décoration de l'endroit ou encore la météorologie. Ainsi, la lumière, la température, les sons ou les mouvements d'air sont des indices que l'on peut qualifier « d'ambiants », qui nous renseignent, sans que l'on y prête la moindre attention, sur le temps qu'il fait.

Du point de vue neurophysiologique, ces deux types de perceptions peuvent s'expliquer par la géométrie de l'œil [Bonnet et al. 1989]. La réception de la stimulation visuelle s'effectue au niveau de la rétine, que l'on peut assimiler de manière très grossière à une grille de récepteurs[31]. La répartition de ces récepteurs n'est pas uniforme, loin de là, ceux-ci étant plus concentrés[32] dans la région centrale de la rétine, et leur nombre diminuant rapidement à mesure que l'on s'éloigne de cette zone. Ceci se traduit par une perception différente dans la partie centrale (vision focalisée) et dans les parties extérieures du champ de vision (vision périphérique). Tandis que la vision focalisée permet d'obtenir des informations très précises mais d'une manière consciente et intentionnelle, donc sérielle et lente, la perception périphérique permet d'extraire le contexte de l'environnement de manière préconsciente, grâce à un

[31] Cônes pour la vision colorée, et bâtonnets pour une vision noir et blanc, plus fine dans la perception des formes.

[32] Pour être vraiment précis, il faudrait faire la distinction entre la répartition des cônes et celle des bâtonnets, légèrement différentes.

traitement parallèle très rapide. Ces deux modes de perception sont naturellement complémentaires.

Si la perception focalisée est systématiquement exploitée pour la construction de dispositifs de visualisation ou d'interface, il n'est que très rarement fait appel à la perception ambiante (voir cependant [Ishii et Ulmer 1997] ou encore [Gebhardt 1994]). Cette dernière pourrait pourtant être mise à profit pour communiquer des informations à un utilisateur pendant qu'il est occupé à une autre tâche, donc sans nécessairement mobiliser toute son attention. Pour ce faire, on peut envisager de projeter des informations ambiantes sur un mur, tandis que des écrans d'ordinateurs seraient utilisés pour afficher les informations critiques. On peut imaginer plus simplement d'utiliser des zones différentes d'un même écran, le centre de l'écran correspondant à une perception focalisée et le pourtour à une perception périphérique. En fonction des informations ambiantes, l'utilisateur pourrait ponctuellement décider d'interrompre sa tâche principale pour obtenir des précisions.

VI.1.2. DIFFERENTS NIVEAUX DE PERCEPTION

La distinction entre perception focalisée et perception ambiante rejoint en partie, mais en partie seulement, la distinction que l'on peut établir entre les différents niveaux de perception (primitives visuelles, formes, objets identifiés), distinction qui elle-même trouve sa correspondance avec les trois niveaux de comportements repérés par J. Rasmussen chez les opérateurs de systèmes industriels complexes [Rasmussen 1983] dans la taxonomie SRK[33]. Suivant que l'information visuelle est interprétée comme un signal (une primitive, perçue au niveau neuro-sensoriel), un signe (une forme, perçue au niveau perceptif) ou un symbole (une forme associée à un sens, perçue au niveau cognitif), ce sont différents types de comportements qui seront activés, basés respectivement sur des compétences automatisées (Skills), des règles de type indice-action (Rules) ou les connaissances de l'utilisateur (Knowledge). Alors que les deux premiers types de comportements fonctionnent sur un mode perception-action, le dernier concerne une résolution de problème analytique basée sur une représentation symbolique.

Les études menées auprès d'opérateurs dans le cadre de contrôle de processus industriels ont mis en évidence plusieurs points importants concernant d'une part

[33] Skills, Rules, Knowledge dont la traduction pourrait être Compétences, Règles, Connaissance.

l'efficacité de ces opérateurs en fonction du niveau de comportement activé, et concernant d'autre part la sélection du niveau de comportement en fonction de la situation [Vicente et Rasmussen 1992]. Des études ont ainsi comparé la précision de jugements effectués en utilisant pour certains la perception, pour d'autres un raisonnement arithmétique [Hammond et al. 1987]. Les résultats ont montré que les jugements basés sur la perception, bien que rarement parfaits, étaient toujours proches de la bonne réponse, alors que les jugements basés sur le raisonnement pouvaient être parfaits mais pouvaient également conduire à des erreurs extrêmes! D'autres études ont montré par ailleurs que lorsque des opérateurs ont le choix entre plusieurs niveaux de comportements, ils font preuve d'une préférence marquée, bien qu'inconsciente, pour les comportements de plus bas niveau [Hamm 1988].

VI.1.3. *LE JARDIN DES HASARDS*

Les caractéristiques d'un système de représentation déterminent les conditions de son utilisation. La vision artistique que propose le *Jardin des Hasards* de la météorologie a été construite pour transmettre une impression globale et intuitive de la situation météorologique courante, en reconstruisant une ambiance sonore et colorée qui puisse être facilement mise en correspondance avec l'ambiance réelle du lieu d'où proviennent les données. En termes perceptifs, cela signifie que le *Jardin des Hasards* s'adresse aux modes de perception de bas niveau du spectateur, et non à ses capacités de raisonnement. Transposées dans un contexte de contrôle, les propriétés du *Jardin des Hasards* suggèrent une utilisation possible comme affichage ambiant de l'état courant d'un système, l'opérateur restant libre d'effectuer certaines tâches de contrôle de manière consciente et focalisée, tout en percevant le contexte global en arrière plan, en « tâche de fond ».

Le *Jardin des Hasards* apparaît par ailleurs intéressant du fait de la vision globale qu'il propose du système météorologique. Un simple coup d'œil suffit en effet pour percevoir, dans l'image du *Jardin des Hasards*, une situation météorologique donnée, sans avoir besoin de consulter un thermomètre pour connaître la valeur de la température, un baromètre pour les conditions nuageuses, un anémomètre pour les conditions de vent et un pluviomètre pour la pluie. Appliqués dans un contexte industriel de contrôle, les principes de visualisation mis en œuvre dans le *Jardin des Hasards* pourraient ainsi se révéler complémentaires de méthodes d'affichage plus classiques, plus précises mais plus fragmentaires, ne permettant pas de saisir la complexité d'une situation donnée d'un seul coup d'œil.

Nous aborderons ces problématiques en fin de chapitre, en introduisant le projet des *Jardins de Données*, qui constitue déjà le prolongement de ce travail, dans une démarche appliquée. Auparavant, nous allons préciser ces premières constatations quant à l'utilisation du *Jardin des Hasards* comme mode de représentation de la météorologie. Pour ce faire, nous commencerons par évaluer ses performances intrinsèques en termes de précision et de vitesse de transmission des données, ce qui nous permettra de disposer sur ce point d'une première référence. Comme nous le verrons, ces premières études permettront également de préciser les qualités et les défauts de l'image artistique dans la représentation de la météorologie. Dans un deuxième temps, nous comparerons le *Jardin des Hasards* avec d'autres modes de représentation, dans un contexte de commande, ce qui nous amènera à revenir sur la notion de niveau de perception.

VI.2. PRECISION ET VITESSE

Dans un contexte de contrôle de système, on cherchera à obtenir une représentation de l'état d'un système, état mesuré, dans le cas le plus général, sous la forme d'un ensemble de variables. Ces variables entretiennent des relations les unes avec les autres, qui peuvent être décrites par un ensemble de contraintes. Dans le cas d'un système industriel, par exemple, il est essentiel de s'assurer que les différentes contraintes soient toutes satisfaites, signe d'un fonctionnement normal. Des méthodes automatiques existent naturellement pour analyser ces contraintes (voir par exemple [Codognet 1995]), mais qui ne se substituent jamais totalement à un contrôle visuel de la part d'un opérateur. Les interfaces qui constituent le support de ce contrôle doivent permettre de percevoir précisément et rapidement les valeurs des variables les plus importantes, ou l'état des contraintes entre ces variables.

Dans le cadre du *Jardin des Hasards*, nous nous sommes donc posés la question de la précision et de la rapidité avec lesquelles les données météorologiques pouvaient être perçues. Autrement dit, en voyant le *Jardin des Hasards*, est-on capable de déterminer à quelles conditions météorologiques la représentation se rapporte, et si oui, avec quelle précision est-on capable de déterminer la valeur des différentes variables météorologiques ? En pratique, nous avons étudié la deuxième partie de la question, de manière à pouvoir répondre à la première partie. Dans ce cadre, c'est le projet artistique qui a été évalué tel quel, sans aucune modification pour tenter de rendre telle ou telle variable plus facile à percevoir.

VI.2.1. LES VARIABLES METEOROLOGIQUES

Nous nous sommes donc intéressés à la précision avec laquelle il est possible de déterminer les valeurs de nébulosité, de température, de précipitation, de direction et de vitesse du vent, lorsque l'on est confronté à une image du *Jardin des Hasards*. Ces variables ont déjà été présentées au paragraphe V.3.1. Certaines d'entre elles ont un ensemble de définition borné (la nébulosité comprise entre 0 et 8, la pluviométrie comprise entre 0 et 60 minutes de pluie, la direction du vent comprise entre 0 et 359 degrés d'angle). Les autres (la température et la vitesse du vent) ne sont pas bornées mais varient la plupart du temps dans un certain intervalle. Pour la vitesse du vent, nous avons retenu un intervalle compris entre 0 et 150 km/h, ce qui couvre la très grande majorité des situations envisageables. Concernant la température, la représentation artistique du *Jardin des Hasards* a été conçue en utilisant une échelle de couleur sensible aux variations comprises entre 0 et 24°Celsius, échelle que nous avons donc été obligés de retenir pour ces expérimentations.

VI.2.2. LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le principe du protocole élaboré consiste à montrer l'aspect du *Jardin des Hasards* pour une situation météorologique donnée en demandant de deviner les valeurs des variables qui correspondent. Plus précisément, pour chaque sujet, le protocole se déroule de la manière suivante :

❶ présentation au sujet du *Jardin des Hasards*, en expliquant les principes généraux du projet artistique, puis la symbolique utilisée pour la représentation de la météorologie. Le sujet est libre de poser toutes les questions qu'il souhaite ;

❷ explication au sujet de l'objet de l'expérience, puis présentation du déroulement de l'expérience en montrant devant lui les différentes étapes ;

❸ le sujet débute l'expérience qui se déroule de la manière suivante :

  ① le sujet a trois minutes pour ajuster les valeurs des variables météorologiques et visualiser les différents aspects du *Jardin des Hasards* en fonction de ces valeurs. Pour ce faire, il dispose de l'interface reproduite à la figure VI.1.

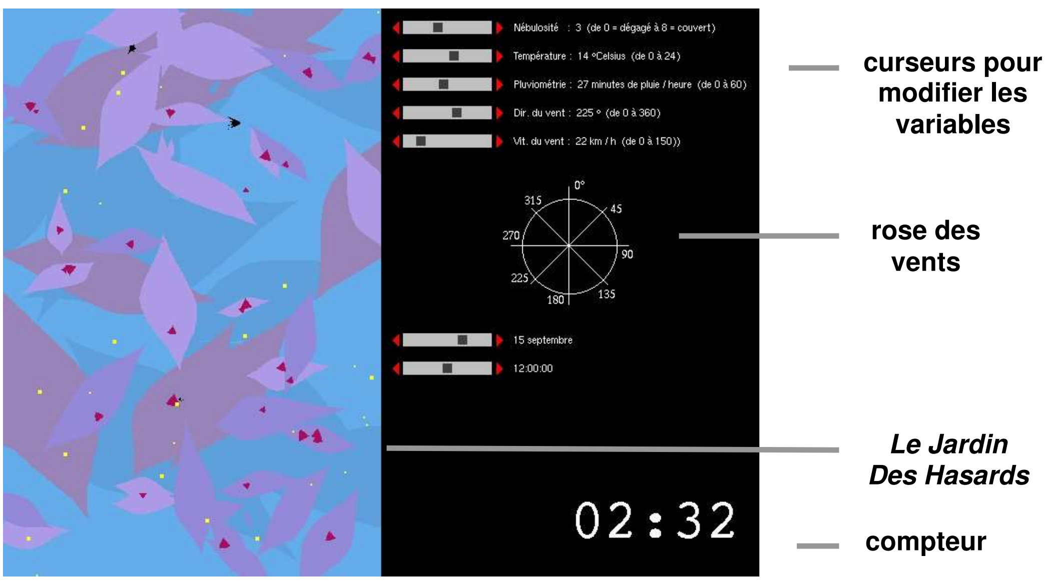


figure VI.1 – Phase de prise en main de l'expérience de précision.

La moitié gauche de l’écran contient le *Jardin des Hasards* tandis que la moitié droite propose un ensemble de curseurs grâce auxquels le sujet peut choisir la valeur de chacune des variables, chaque changement de valeur étant immédiatement répercuté sur la représentation de la partie gauche. Le sujet peut ainsi se familiariser rapidement avec la représentation adoptée dans le *Jardin des Hasards*, un compteur lui indiquant le temps restant ;

② le sujet est soumis ensuite a deux tests blancs qui lui permettent de se rendre compte de la tâche qui lui sera demandée. Ces tests se déroulent de la manière suivante :

(i) l’ordinateur choisit aléatoirement les valeurs des différentes variables à l’intérieur de leur intervalle de définition, et affiche la représentation correspondante dans la partie gauche de l’écran (voir figure VI.2). Ces valeurs constituent les valeurs de référence, celles que le sujet doit deviner ;

(ii) le sujet doit ajuster les curseurs pour désigner les valeurs des variables qu’il croit percevoir dans l’image de gauche. Lorsqu’il est satisfait de son choix, il le valide à l’aide du bouton « valider ». Le temps mis pour répondre n’est pas limité. Il est mesuré mais le sujet n’a pas à s’en préoccuper ;

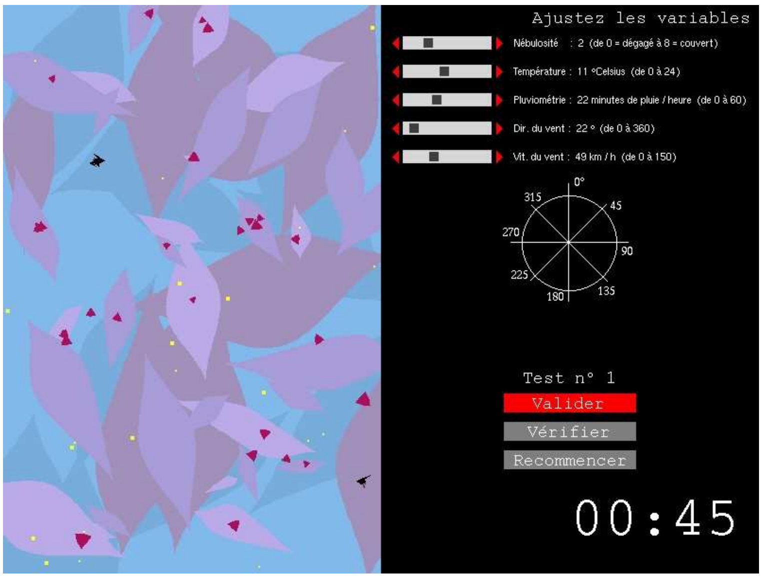


figure VI.2 – Phase de test de l’expérience de précision.

(iii) le système affiche, par des tirets rouges superposés aux curseurs, les valeurs de référence (voir figure VI.3) et le sujet peut alors, grâce au bouton « vérifier », alterner entre la représentation correspondant aux donnés de référence et celle correspondant aux valeurs qu'il a indiquées. Cela lui permet ainsi de visualiser ses erreurs éventuelles ;

(iv) le bouton « recommencer » permet de passer au test suivant et l'on revient alors en (i) ;

③ après les deux tests blancs, le sujet dispose à nouveau de trois minutes pour visualiser les variations de la représentation en fonction des variables ;

④ enfin, le sujet est soumis à dix tests analogues aux deux tests blancs décrits en ②. Ce sont ces tests que nous prendrons en compte dans notre analyse.

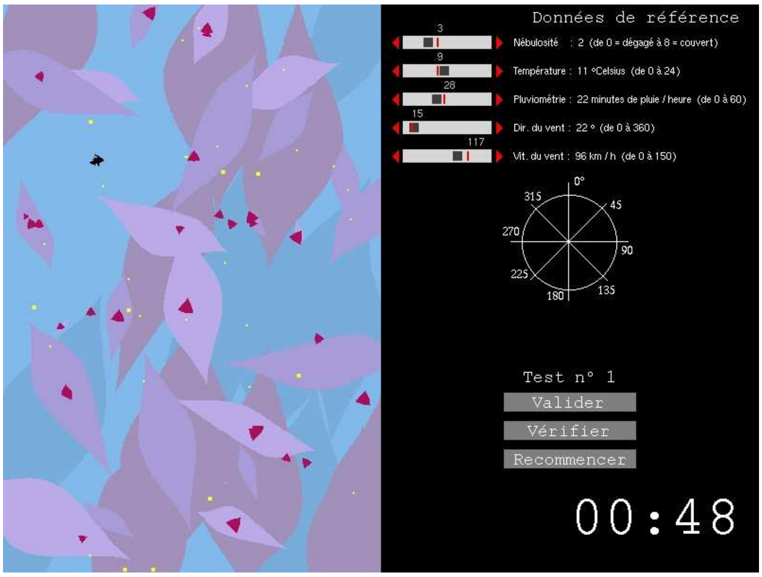


figure VI.3 – Phase de vérification de l'expérience de précision.

VI.2.3. PRECISION

L'expérience a été proposée à une population relativement homogène de dix sujets, tous chercheurs dans un laboratoire d'informatique, l'un d'entre eux n'ayant pas une formation initiale en informatique, et dont l'âge est compris approximativement entre 25 et 50 ans. Certains connaissaient relativement bien le *Jardin des Hasards*, d'autres en avaient seulement entendu parler, d'autres encore ne le connaissaient pas du tout. Par ailleurs, B. Gortais, qui a conçu la représentation artistique, a également effectué l'expérience et nous nous sommes nous-mêmes soumis à dix séries de dix tests.

VI.2.3.1. Première analyse

Le tableau VI.1 montre les résultats bruts obtenus par nous-mêmes, B. Gortais ainsi que par chacun des dix sujets. Pour chaque variable et chaque sujet, la valeur correspond à la moyenne des erreurs (en valeur absolue) commises à chacun des dix tests (dix séries de dix pour nous-mêmes). Par ailleurs, le bas du tableau montre, pour chaque variable, la moyenne des erreurs commises pour l'ensemble des sujets, à l'exclusion de nous-mêmes et de B. Gortais, les valeurs minimales et maximales ainsi que l'écart moyen et l'écart-type [Rouanet et al. 1987]. Sauf précisé explicitement, toutes les mesures statistiques présentées par la suite ne concernent que le groupe de dix sujets.

Une première analyse montre qu'il est effectivement possible de comprendre la représentation proposée de la météorologie, ce qui ne fait que confirmer notre expérience personnelle du *Jardin des Hasards*. Après une courte période de familiarisation d'à peine un quart d'heure dont six minutes pour manipuler soi-même, il est ainsi possible, en moyenne, d'estimer la nébulosité à une unité près, la pluviométrie à 6 minutes près, la température à 3 °C près, la direction du vent à 10 degrés d'angle près et la vitesse du vent à 23 km/h près. Certains sujets obtiennent par ailleurs des résultats d'emblée bien meilleur, et nos propres résultats montrent qu'après apprentissage, il est possible d'atteindre une précision au moins égale à 0,3 unités pour la nébulosité, 3.4 minutes de pluie, 2 °Celsius pour la température, 5 degrés d'angle sur la direction du vent et 15 km/h sur sa vitesse. Ce premier constat est plutôt encourageant, et ce d'autant plus que la représentation a été construite selon des choix métaphoriques. Il ne fait aucun doute que ces performances sont susceptibles d'être améliorées, à condition d'identifier les raisons pour lesquelles certains résultats sont moins bons que d'autres. C'est ce que nous allons examiner à présent en nous basant sur les résultats de cette première série d'expériences.

	Nébulosité	Pluviométrie	Température	Dir. du vent	Vit. du vent
G. Hutzler	0,28	3,42	2	5,04	14,88
B. Gortais	1	2,7	2,7	11,6	18,4
Sujet 1	0,7	5,6	2,3	8,2	32,1
Sujet 2	1,7	8,7	2,9	6,6	16,4
Sujet 3	0,7	3,8	2,7	14	13,5
Sujet 4	1,6	6,5	3,3	7,1	27,3
Sujet 5	1	12,2	3,8	11,2	19,4
Sujet 6	1,2	6	2,8	10,1	30,1
Sujet 7	0,3	3,3	2,2	11	25,1
Sujet 8	1,1	6	4	7,2	18,1
Sujet 9	0,9	3,8	2,9	15,5	22,2
Sujet 10	1	6,2	3,5	9,5	29,7
Moyenne	**1,02**	**6,21**	**3,04**	**10,04**	**23,39**
Minimum	0,3	3,3	2,2	6,6	13,5
Maximum	1,7	12,2	4	15,5	32,1
Ecart moyen	0,304	1,754	0,488	2,32	5,47
Ecart type	0,397	2,504	0,570	2,828	6,090

tableau VI.1 – Résultats bruts de l’expérience de précision. Pour chaque variable et chaque sujet, la valeur correspond à la moyenne des erreurs (en valeur absolue) commises à chacun des dix tests. Les calculs statistiques ne concernent que les sujets numérotés de 1 à 10.

VI.2.3.2. Erreurs relatives

Afin de comparer les performances obtenues relativement aux différentes variables, nous avons normalisé les résultats du tableau VI.1 en divisant l’erreur commise par la taille de l’intervalle de définition de la variable concernée. La valeur résultante indique donc le pourcentage d’erreur par rapport à la taille de l’intervalle. La figure VI.4 permet de comparer les valeurs moyennes des erreurs en pourcentage correspondant à chacune des variables, encadrées par les valeurs extrêmes des erreurs commises.

A titre indicatif, il faut remarquer qu’en choisissant systématiquement le milieu de l’intervalle de définition de la variable, l’erreur commise sera comprise entre 0 et 50%, ce qui correspond statistiquement à un erreur moyenne de 25%. En poussant un peu plus loin le raisonnement, si l’on est systématiquement capable de deviner si la valeur de référence est plus ou moins élevée que la moyenne et que l’on choisit le milieu du demi-intervalle correspondant, l’erreur commise sera cette fois-ci comprise entre 0 et 25%, ce qui conduit à une erreur statistique moyenne de 12,5%. On peut voir que c’est à peu près l’erreur moyenne commise pour toutes les variables à l’exception de la

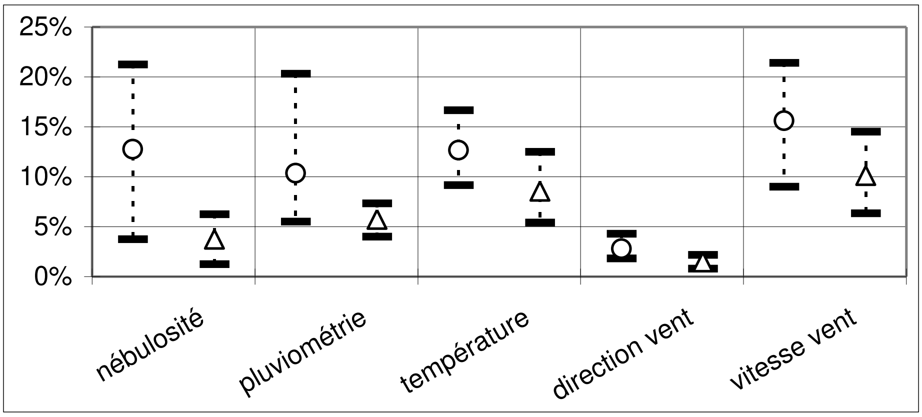


figure VI.4 - Erreur en pourcentage pour les différentes variables avec indication de la moyenne pour les 10 sujets (ronds) et pour les dix tests que nous avons effectués (triangles). Les tirets correspondent aux valeurs extrêmes.

direction du vent. Et en effet, à défaut de mieux, un certain nombre de sujets essayaient de se repérer par rapport au milieu de l'intervalle : « c'est plus de la moitié », « c'est moins de la moitié ».

En ce qui concerne la direction du vent, le résultat est très nettement meilleur. On peut comprendre la différence entre le paramètre de direction du vent et les autres paramètres si l'on observe que c'est le seul paramètre représenté avec une échelle « absolue ». La nébulosité correspond à des variations de luminance, la température à des variations de saturation, la pluie à des variations de grosseur de points, la vitesse du vent à des variations de vitesses de déplacement. Or couleur, taille ou encore vitesse sont des primitives visuelles que l'on évalue de manière relative tandis que pour la direction, il est possible de se baser sur un repère fixe. Les réactions des sujets lors des tests le montre bien, le jugement effectué pour un test étant très souvent orienté par le test précédent : « là, il fait plus froid », « il y a moins de nuages », « il y a plus de vent », « la pluie est plus faible ».

On peut noter également que chez les dix sujets, la dispersion est très importante pour la nébulosité et la pluviométrie. Concernant la nébulosité, il semblerait qu'il y ait eu, chez certains, une difficulté à repérer les formes désignant les nuages, du fait de leur ressemblance visuelle avec les formes feuilles. Concernant la pluviométrie, il semblerait qu'il s'agisse plutôt d'une difficulté propre à certaines personnes pour reconnaître les différences de taille et la fréquence d'apparition des formes désignant les gouttes de pluie. Cette grande dispersion ne se retrouve pas dans nos propres résultats, ce qui laisse supposer qu'elle est due à des différences individuelles plus qu'à une difficulté inhérente au symbolisme choisi. S'agissant par contre de la température et de la vitesse du vent, les dispersions pour les dix sujets et pour nos dix séries de tests sont très proches, ce qui signifie que pour un même individu, la dispersion concernant ces variables reste importante, et ce même après apprentissage, ce qui laisse cette fois-ci supposer une difficulté particulière liée aux choix de représentation. Cela semble bien être le cas en ce qui concerne la vitesse du vent. En effet, pour représenter la vitesse du vent, les formes nuages choisissent, à intervalles aléatoires, de se laisser emporter par le vent. Elles donnent alors une impulsion dans la direction du vent et avec une vitesse correspondant à celle du vent, puis continuent sur leur lancée, dans la même direction mais en ralentissant progressivement. Ainsi, les formes nuages ne se déplacent pas toutes à la même vitesse. Quelque soit la vitesse du vent, il y a des formes nuages qui, ayant beaucoup ralenti, se déplacent lentement ce qui peut induire en erreur. Il peut même arriver parfois qu'aucune forme ne se déplace alors que le vent est fort. Concernant par ailleurs la température, nous allons voir que la perception de cette variable apparaît relativement dépendante des valeurs des autres variables, qu'il s'agisse de la nébulosité, de la pluviométrie ou de la vitesse du vent.

VI.2.3.3. Corrélations entre variables

Afin d'étudier ces problèmes d'interférence entre variables, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre l'erreur commise pour une variable donnée (erreur = valeur devinée – valeur de référence) et les valeurs de référence à deviner pour les différentes variables (voir tableau VI.2 et tableau VI.3). Nous avons également calculé ces coefficients en utilisant cette fois-ci la valeur absolue de l'erreur (voir tableau VI.4 et tableau VI.5). Il s'agit dans le premier cas de déterminer si certaines valeurs de référence d'une variable sont fréquemment sur- ou sous-estimées, ou si elles entraînent la sur- ou sous-estimation des valeurs d'autres variables. Il s'agit dans le deuxième cas de savoir si certaines valeurs de référence entraînent des erreurs de perception plus importantes, que ce soit dans un sens ou dans l'autre. A chaque fois, nous avons considéré d'une part les cent tests effectués par les dix sujets (tableau VI.2 et tableau VI.4), et les cent tests effectués par nous-mêmes (tableau VI.3 et tableau VI.5). Dans chaque cas, nous n'avons pas considéré les corrélations avec la direction du vent de référence, puisque cette variable ne correspond pas à une échelle de valeurs plus ou moins fortes, mais à une échelle circulaire de valeurs qui se correspondent modulo 360. Pour la même raison, nous n'avons calculé les corrélations de l'erreur sur la direction du vent qu'en valeur absolue. Parler de surévaluation ou de sous-évaluation de la direction du vent n'aurait eu aucun sens.

erreur \ référence	Nébulosité	Pluviométrie	Température	Vitesse vent
Nébulosité	-0,5	-0,08	0,03	-0,03
Pluviométrie	-0,08	-0,13	0,26	-0,03
Température	0,23	0,29	-0,35	-0,07
Vitesse vent	0,13	0,08	-0,08	-0,65

tableau VI.2 - Coefficients de corrélation entre erreurs (en lignes) et valeurs de référence (en colonnes) pour les 100 tests des 10 sujets.

En regardant le tableau VI.2, il apparaît tout de suite de fortes corrélations négatives dans la diagonale. Autrement dit, pour une variable donnée, la valeur estimée est d'autant plus sous-évaluée que la valeur de référence est forte et d'autant plus surévaluée que la valeur de référence est faible. Si l'on reprend le raisonnement du paragraphe précédent, il est facile de voir qu'en choisissant systématiquement le milieu de l'intervalle de définition d'une variable, l'erreur commise en fonction de la valeur de référence est une droite de pente -1, d'où également une corrélation égale à -1. Ainsi, on peut penser que la corrélation entre valeur devinée et valeur de référence sera d'autant plus proche de -1 que la variable est difficile à percevoir. En cas de doute, les sujets auront en effet tendance à choisir une valeur médiane de manière à limiter l'importance des erreurs commises. Le fait que ces valeurs soient sensiblement moins fortes (en valeur absolue) pour nos propres tests (tableau VI.3) renforce cette hypothèse.

erreur \ référence	Nébulosité	Pluviométrie	Température	Vitesse vent
Nébulosité	0,007	-0,07	-0,002	0,08
Pluviométrie	0,08	0,1	0,19	0,09
Température	0,004	-0,003	-0,17	0,24
Vitesse vent	0,14	-0,17	-0,2	-0,3

tableau VI.3 - Coefficients de corrélation entre erreurs (en lignes) et valeurs de référence (en colonnes) pour les 100 tests que nous avons effectués.

La corrélation négative la plus forte correspond à la vitesse du vent, aussi bien pour les dix sujets que pour nous-mêmes, variable qui semble donc bien être la plus difficile à percevoir avec précision dans le *Jardin des Hasards*. Concernant les réponses données par les dix sujets pour cette variable, la figure VI.5 trace d'une part les erreurs commises en fonction de la valeur de référence, et montre d'autre part la distribution comparée des valeurs de référence et des valeurs estimées. Cette dernière mesure montre qu'en effet les valeurs estimées sont très souvent proche de la valeur médiane.

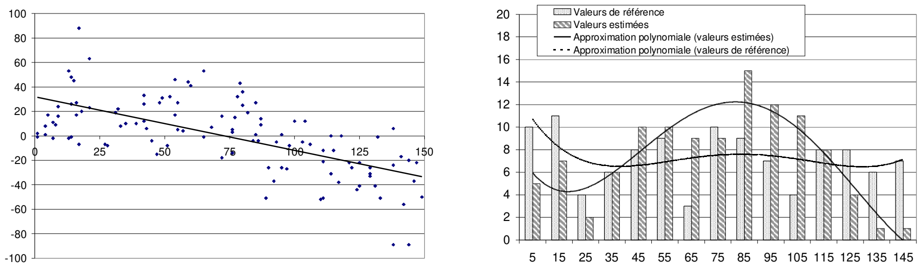


figure VI.5 – Valeurs de référence et valeurs estimées par les dix sujets pour la vitesse du vent : ① erreur sur la vitesse du vent en fonction de la valeur de référence de vitesse, et droite de régression linéaire ; ② distribution comparée des valeurs de référence (distribution à peu près plane) et des valeurs estimées (courbe en cloche)

Les corrélations importantes en dehors de la diagonale peuvent par ailleurs nous renseigner sur les interférences entre les variables. Pour les dix sujets, ces corrélations sont les plus fortes entre la température et la pluviométrie. La température est surévaluée lorsque la pluie est forte et sous-évaluée lorsque la pluie est faible. De même, la pluie est surévaluée lorsque la température est élevée, sous-évaluée lorsque la température est basse. Pour la saison à laquelle ont été faits les tests (l'été), la palette de couleur principale est bleue et les gouttes de pluie jaunes. Une pluie importante est donc peut-être susceptible de renforcer l'impression de chaleur, du fait de la présence de nombreuses formes jaunes. Par ailleurs, la saturation plus ou moins grande des couleurs du fond en fonction des températures entraîne un contraste plus ou moins fort entre ce fond et les gouttes de pluie. Le contraste étant faible pour des températures basses, la pluie a tendance à être sous-évaluée, alors qu'elle sera au contraire surévaluée pour des températures élevées, avec un contraste fort. On retrouve également ce dernier phénomène dans nos propres résultats.

Pour les dix sujets, on retrouve enfin une influence de la nébulosité de référence sur la perception de la température (0,23) et de la vitesse du vent (0,13). Nébulosité et température étant toutes les deux figurées par des jeux de couleurs, il n'est pas très étonnant qu'elles s'influencent mutuellement, même si l'une opère sur la luminance tandis que l'autre opère sur la saturation. Ces deux facteurs n'étant pas exactement orthogonaux, les interférences sont inévitables. En ce qui concerne la vitesse du vent, il faut se rappeler qu'elle est figurée notamment par le mouvement des formes nuages, elles-mêmes plus ou moins contrastées suivant la valeur de nébulosité. Lorsque cette dernière est faible, les nuages sont peu contrastés ce qui conduit à sous-estimer la vitesse du vent, phénomène que l'on retrouve également chez nous.

erreur \ référence	Nébulosité	Pluviométrie	Température	Vitesse vent
Nébulosité	-0,06	-0,08	-0,1	0,12
Pluviométrie	0,19	0,33	-0,09	0,005
Température	0,1	-0,04	-0,07	-0,2
Direction Vent	-0,006	-0,08	0,12	0,03
Vitesse vent	0,02	0,07	0,15	0,23

tableau VI.4 - Coefficients de corrélation entre erreurs absolues (en lignes) et valeurs de référence (en colonnes) pour les 100 tests des 10 sujets.

Si l'on s'intéresse aux erreurs en valeur absolue, donc indépendamment du sens de variation, ces calculs de corrélations fournissent encore un grand nombre d'informations. Pour les dix sujet aussi bien que pour nous, on peut voir que les valeurs de pluie et de vitesse du vent sont plus difficiles à évaluer pour des valeurs fortes de ces deux variables, ce qui indique que les variations sont moins sensibles pour les plages de valeurs élevées. Les autres corrélations sont contradictoires entre les dix sujets et nous-mêmes, ce qui rend l'analyse plus délicate. En ce qui nous concerne, on voit que vitesse du vent et pluviométrie semblent interférer mutuellement. La figuration des deux étant basée sur des mouvements de formes plus ou moins importants suivant la valeur de la variable, il est possible que les mouvements dus à la valeur élevée d'une des variables gêne la perception de l'autre variable. Toujours nous concernant, il apparaît que l'estimation de la direction du vent est plus mauvaise lorsque la vitesse du vent est faible, ce qui semble cohérent, la direction de mouvements faibles étant plus difficile à percevoir que celle de mouvements plus importants.

erreur \ référence	Nébulosité	Pluviométrie	Température	Vitesse vent
Nébulosité	0,06	0,08	-0,06	-0,03
Pluviométrie	-0,04	0,11	-0,07	0,14
Température	-0,05	-0,09	0,05	0,07
Direction Vent	-0,02	-0,09	-0,04	-0,15
Vitesse vent	-0,09	0,13	0,04	0,36

tableau VI.5 - Coefficients de corrélation entre erreurs absolues (en lignes) et valeurs de référence (en colonnes) pour les 100 tests que nous avons effectués.

Il convient naturellement d'être prudent dans la comparaison des résultats obtenus par le groupe des dix sujets et ceux que nous avons nous-mêmes obtenus. Il s'agit, dans un cas, de dix personnes n'ayant que peu ou pas de connaissance préalable du mode de représentation, dans l'autre d'un seul sujet ayant appris. Il est donc difficile de faire la part entre les écarts dus aux différences interindividuelles, aux différences dans la passation (heure de la journée, écran[34], etc.) ou encore aux effets de l'apprentissage.

VI.2.3.4. Rôle de l'apprentissage

Pour aborder la question de l'apprentissage, il aurait été intéressant de suivre l'évolution des résultats d'un sujet initialement ignorant du *Jardin des Hasards*, ce que nous n'avons malheureusement pas pu mettre en œuvre. Nous utiliserons donc nos propres résultats, au cours des dix séries de dix tests que nous avons effectuées (voir figure VI.6).

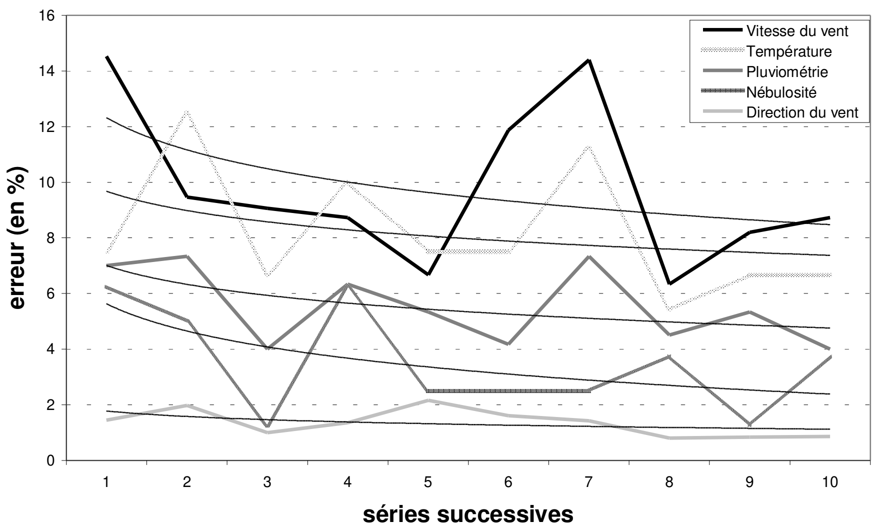


figure VI.6 – Evolution des performances à l'expérience de précision pour dix séries consécutives de dix tests, avec courbes de tendance logarithmiques pour chacune des variables.

L'écart entre les performances du groupe des dix sujets et nos propres performances (figure VI.4) indiquait nettement l'importance de l'apprentissage dans la perception précise des différentes variables. Pour chacune des variables, nos performances moyennes correspondent en effet à la meilleure des performances pour les dix sujets. D'une certaine manière, la figure VI.6 montre la fin du processus d'apprentissage, où l'on voit, grâce aux courbes de tendance, que nos propres

[34] Les tests effectués par les dix sujets l'ont été sur un écran de 17 pouces de bonne qualité. Ceux que nous avons effectués l'ont été sur un écran de portable de qualité moyenne.

performances moyennes ont été améliorées au fur et à mesure de la passation des tests successifs. Ces mêmes courbes laissent finalement espérer des performances après apprentissage d'environ 1% sur la direction du vent, soit 3,6° d'angle, 2% sur la nébulosité, soit 0,18 unités, 4% sur la pluviométrie, soit 2,44 minutes, 7% sur la température, soit 1,75°Celsius et 8% sur la vitesse du vent, soit 12 km/h.

Ce ne sont là bien sûr que des moyennes et les courbes d'évolution de la figure VI.6 montrent assez nettement, par ailleurs, des variations d'une série de tests à l'autre, plus ou moins importantes suivant les variables. Ces variations sont les plus importantes pour la vitesse du vent (écart-type de 2,74), c'est-à-dire que la qualité de l'évaluation de la vitesse du vent varie beaucoup d'une série de tests à une autre ; les variations sont minimales pour la direction du vent (écart-type de 0,45), c'est-à-dire que la qualité de l'évaluation de cette variable est quasiment constante d'une série de tests à une autre. Cela s'accorde bien avec ce que l'on a déjà pu dire des deux variables direction et vitesse du vent.

Outre la difficulté inhérente à la perception de telle ou telle variable, il faut noter encore le rôle probablement joué par l'état émotionnel et physique au moment de la passation de l'expérience. Les corrélations entre les différentes courbes de la figure VI.6, que présente le tableau VI.6, sont en effet très élevées, ce qui ne peut s'expliquer seulement par l'apprentissage conjoint des différentes variables, puisqu'il y a correspondance entre les baisses de performance autant qu'entre les hausses. Il est également peu probable que des tirages plus ou moins favorables des valeurs de référence soient à l'origine de ces variations puisqu'il n'y a pas de raison pour que ces tirages soient simultanément favorables ou défavorables pour toutes les variables. Bien que cette dernière affirmation doive être vérifiée, il semble raisonnable de penser que les variations de performances puissent s'expliquer en grande partie par un état général d'attention et de forme plus ou moins bon.

	Nébulosité	Pluviométrie	Température	Direction vent	Vitesse vent
Nébulosité	1	0,52	0,36	0,22	0,21
Pluviométrie		1	0,8	0,48	0,51
Température			1	0,57	0,39
Direction vent				1	0,16
Vitesse vent					1

tableau VI.6 – Corrélations entre les courbes de la figure VI.6.

VI.2.4. VITESSE

Si la précision est un élément important d'une bonne représentation, la vitesse avec laquelle les données représentées peuvent être perçues doit également être prise en considération. Pour évaluer ce facteur, le protocole présenté au paragraphe VI.2.2 a été adapté en montrant la représentation correspondant aux valeurs de référence pendant un temps limité avant de la cacher. En utilisant ce principe, nous avons d'abord étudié la perception de chaque variable individuellement, puis la perception de la représentation dans son ensemble.

VI.2.4.1. Variables isolées

Pour évaluer individuellement la vitesse avec laquelle une variable peut être perçue, nous avons réduit progressivement le temps de présentation, en ne nous intéressant, à chaque fois, qu'à la perception d'une seule variable. Nous avons nous-mêmes effectué le test une dizaine de fois pour chaque variable et chaque temps de présentation. La figure VI.7 reproduit les résultats pour des temps de présentation allant de une à trois secondes.

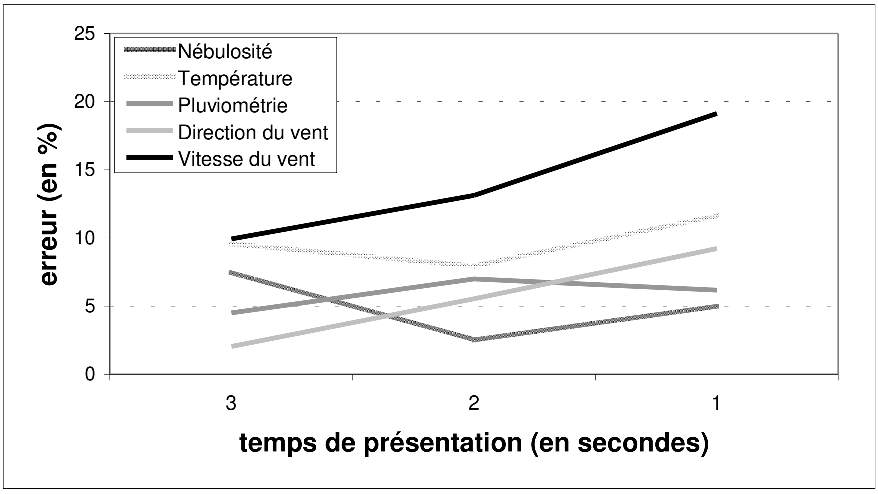


figure VI.7 – Erreur moyenne commise (en %) en fonction du temps de présentation (en secondes). Chaque variable est estimée isolément.

Il apparaît nettement une distinction entre vitesse et direction du vent d'une part, et les trois autres variables d'autre part. Tandis que l'erreur sur les premières augmente régulièrement à mesure que le temps de présentation diminue, l'erreur sur les dernières reste stable, ou présente une légère variation, dans un sens ou dans l'autre.

Ceci n'est pas très étonnant dans la mesure où la perception du vent se fonde sur les mouvements de certaines formes. Ces mouvements impliquent donc une dimension temporelle sanctionnée par un temps de perception plus long que pour les autres variables. Pour ces dernières, les résultats restent proches de ceux obtenus sans limitation de durée (figure VI.4), ce qui indique que la perception de ces variables n'est pas trop altérée dans ce cas.

VI.2.4.2. Représentation globale

Puisque le *Jardin des Hasards* a été imaginé et réalisé pour restituer une impression globale, nous nous sommes également intéressés à la perception simultanée de l'ensemble des variables, en utilisant le même protocole qu'au paragraphe précédent. Après chaque présentation, il s'agissait cependant d'indiquer les valeurs de toutes les variables et non plus d'une seule. Nous avons cette fois-ci fait varier le temps de présentation de une à 10 secondes, et effectué de même une dizaine de tests pour chaque temps de présentation. Les résultats sont tracés sur la figure VI.8.

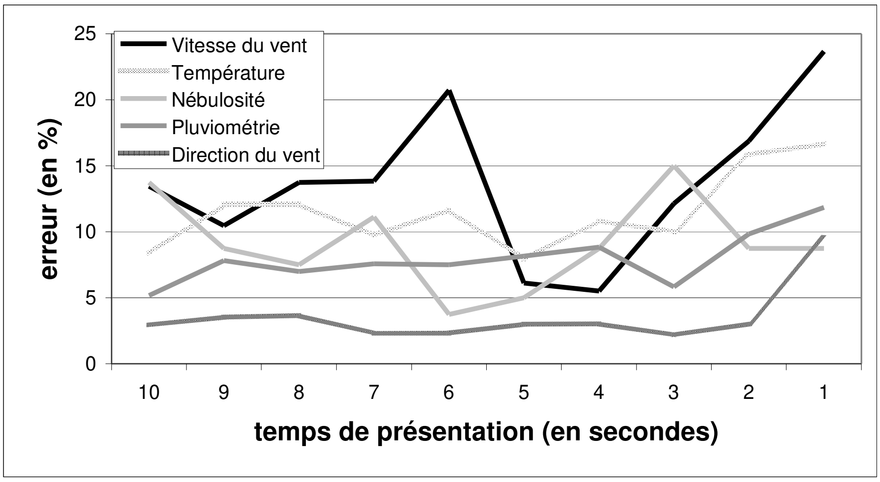


figure VI.8 - Erreur moyenne commise (en %) en fonction du temps de présentation (en secondes). Toutes les variables sont estimées simultanément.

Outre les problèmes de perception, cette version de l'expérience fait naturellement intervenir des problèmes de mémorisation qui rendent la tâche plus difficile. Malgré cela, on peut voir que les performances restent encore une fois très voisines de ce qu'elles sont lorsque la représentation reste apparente, en tout cas pour des temps de présentation de 3 secondes ou plus. Pour des temps de présentation inférieurs, les performances se dégradent mais peut-être pas autant que ce que l'on aurait pu craindre, l'estimation de la nébulosité s'améliorant même pour des temps de présentation courts ! Il ne faut pas, bien sûr, en conclure qu'il est plus facile de percevoir la nébulosité lorsque le temps de présentation est court, et il faut sans doute plutôt penser que nous avions davantage fait attention à cette variable.

Quoi qu'il en soit, il semble bien que le *Jardin des Hasards*, de par la représentation globale, naturelle et intuitive qu'il propose, favorise une perception simultanée des différentes variables. Cela rejoint les commentaires effectués spontanément par la plupart des sujets soumis à l'expérience de précision : « il fait beau ! », « il ne fait pas beau ! », « c'est un temps tropical ! », etc. Par ailleurs, nous allons maintenant voir que cela est confirmé par d'autres expériences par lesquelles nous avons demandé à des sujets d'effectuer des choix en fonction des conditions météorologiques qu'ils perçoivent.

VI.3. PERCEVOIR POUR AGIR

Les résultats que nous venons de présenter quant à la précision avec laquelle il est possible de percevoir telle ou telle variable nous semblent plutôt encourageants, d'autant plus qu'il s'agissait d'évaluer une représentation artistique. Il n'est pas possible, cependant, d'affirmer que ces résultats sont bons, ou mauvais, dans l'absolu. Dans un contexte artistique, ils sont suffisamment bons parce que les spectateurs voyant le *Jardin des Hasards* au cours d'une exposition peuvent avoir rapidement une sensation de la météorologie qui a conduit aux images qu'ils voient. Dans un contexte de contrôle et de commande, ces résultats ne pourront être jugés satisfaisants que s'il permettent à un opérateur de prendre les décisions qu'il faut en fonction des conditions météorologiques courantes.

VI.3.1. PARAPLUIE, CIRÉ, CRÈME, GANTS, ÉVENTAIL

Pour évaluer ce point, nous avons tenté de préciser les conditions dans lesquelles un affichage du type de celui du *Jardin des Hasards* pourrait être utile à un opérateur, c'est-à-dire plus simple à utiliser, ou plus fiable, ou plus agréable que d'autres modes de représentation plus classiques (supra IV.1.3).

VI.3.1.1. Principe de l'expérience

Nous avons vu que si le *Jardin des Hasards* ne permet pas une perception parfaite des valeurs de référence, il fournit en revanche une perception presque instantanée de la situation météorologique globale. Nous avons donc essayé de concevoir une expérience dans laquelle les choix à faire dépendent de la perception simultanée de plusieurs variables.

Le principe général de cette expérience consiste à décider le plus rapidement possible, en fonction des conditions météorologiques courantes, s'il est nécessaire de sortir un parapluie, un ciré, de la crème solaire, des gants ou un éventail. Chacun de ces accessoires correspond à un certain nombre de conditions que les variables météorologiques doivent vérifier. La figure VI.9 présente ces différents accessoires et les conditions associées.

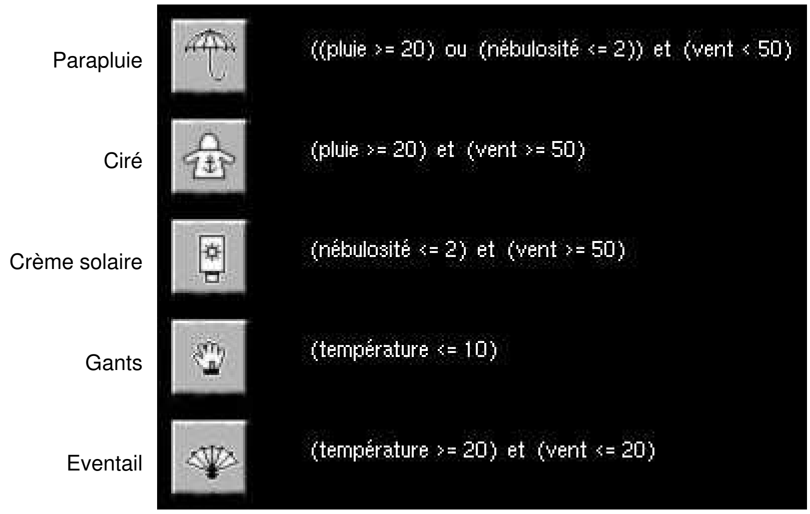


figure VI.9 – Icônes correspondant à chacun des accessoires et conditions météorologiques associées.

Pour définir les conditions de choix de tel ou tel accessoire, nous avons essayé de faire en sorte que la correspondance entre météorologie et accessoires soit la plus intuitive possible, de manière à réduire le temps d'apprentissage nécessaire pour intégrer ces conditions. Il s'agit néanmoins d'un choix forcément arbitraire puisque chacun a ses propres critères pour sortir ses gants ou son parapluie. La logique de choix est la suivante :

- **parapluie** et **ciré** sont complémentaires : tous deux servent à se protéger de la pluie (valeur de pluviométrie supérieure ou égale à 20) ; Le choix de l'un ou de l'autre dépend de la force du vent : lorsque le vent est fort (vitesse supérieure ou égale à 50 km/h), il est préférable de prendre un ciré plutôt qu'un parapluie ;
- de même, **parapluie** et **crème solaire** sont complémentaires : tous deux peuvent servir à se protéger du soleil (nébulosité inférieure ou égale à 2), le parapluie faisant alors office d'ombrelle ; encore une fois, la vitesse du vent constitue le critère de choix, l'ombrelle étant déconseillée par vent fort ;
- les **gants** servent à se protéger du froid (température inférieure ou égale à 10 °Celsius)
- l'**éventail** sert à se rafraîchir, donc lorsqu'il y a conjonction entre température élevée (supérieure ou égale à 20 °C) et vent faible (vitesse du vent inférieure ou égale à 20 km/h).

VI.3.1.2. Autres modes de représentation

Pour disposer d'éléments de comparaison, nous avons comparé les résultats obtenus avec le *Jardin des Hasards* à ceux que l'on peut obtenir avec d'autres modes de représentation. A cet égard, on pourrait penser que l'image directe de la météorologie, utilisant une caméra, devrait constituer la représentation de référence avec laquelle comparer celle du *Jardin des Hasards*. Une caméra, cependant, est impropre à transmettre la température extérieure et peut difficilement saisir la direction du vent. Par ailleurs, l'utilisation d'une caméra nécessite un débit d'information incomparablement plus grand que la simple transmission de cinq valeurs numériques. L'enjeu auquel nous nous intéressons est donc, à partir de ces variables, de trouver la forme de représentation qui restitue la situation initiale avec le maximum d'efficacité et d'expressivité.

Les deux types de représentations auxquels nous comparerons le *Jardin des Hasards* sont donc une représentation textuelle et une représentation par pictogramme. La première consiste à afficher les valeurs numériques des différentes variables (voir figure VI.10).

```
Nébulosité   : 7
Pluviométrie: 13 min/h
Température : 5 °C
Dir. du vent: 261 °
Vit. du vent: 87 km/h
```

figure VI.10 – Représentation textuelle utilisée pour l'expérience.

La deuxième reprend des pictogrammes tels que ceux utilisés classiquement pour la présentation de la météorologie (voir figure VI.11). La correspondance entre pictogrammes et valeurs numériques a été ajustée de manière à reprendre les intervalles utilisés dans les critères de choix des accessoires. Dans cette représentation, une série de pictogrammes associant soleil et nuages sont utilisés pour figurer la nébulosité, en complément de deux symboles de pluie de taille différente suivant que les pluies sont abondantes ou non. Une flèche indique la provenance du vent, une manche à air indiquant sa force. Enfin, un thermomètre indique la valeur de température.

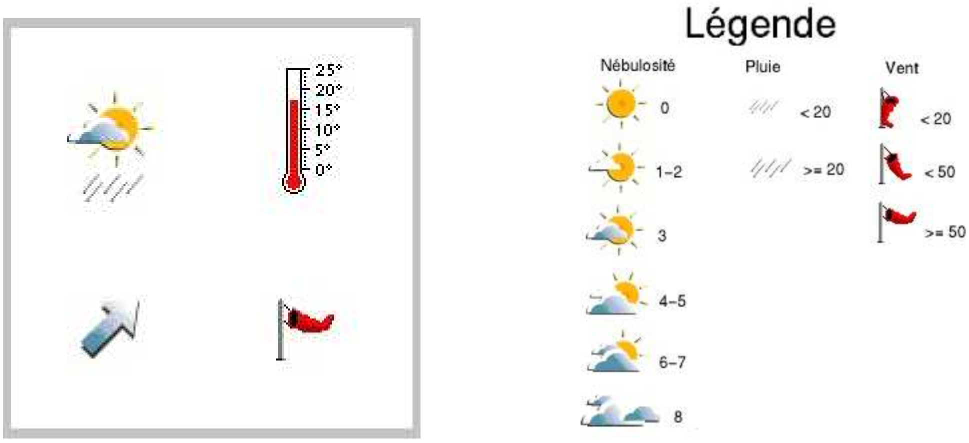


figure VI.11 – Représentation à base de pictogrammes utilisée pour l'expérience (pictogramme repris d'après [Météo France]).

VI.3.1.3. Protocole expérimental

Cette expérience a été proposée aux dix sujets ayant effectué l'expérience de précision, donc après un court apprentissage de la représentation du *Jardin des Hasards*. Il leur était cette fois-ci demandé de sélectionner les accessoires adéquats pour une situation météorologique donnée, en essayant de répondre le plus rapidement possible. Plus précisément, pour chaque sujet, le protocole se déroule de la manière suivante :

❶ explication au sujet de l'objet de l'expérience, puis présentation du déroulement de l'expérience en montrant devant lui les différentes étapes ;

❷ le sujet débute l'expérience qui, pour chaque mode de représentation (*Jardin des Hasards*, texte, pictogrammes), se déroule ainsi :

① le sujet est soumis a deux tests blancs qui lui permettent de se rendre compte de la tâche qui lui sera demandée. Ces tests se déroulent de la manière suivante :

(i) le sujet démarre l'expérience en cliquant sur le bouton « recommencer » (ou en appuyant sur la touche « entrée ») ;

(ii) l'ordinateur choisit aléatoirement les valeurs des différentes variables à l'intérieur de leur intervalle de définition, affiche la représentation correspondante dans la partie gauche de l'écran (voir figure VI.12), et démarre un chronomètre ;

figure VI.12 – Phase de présentation de la situation météorologique et de choix des accessoires.

(iii) le sujet doit choisir les accessoires correspondant à la situation météorologique affichée en cliquant sur leurs icônes respectifs. Lorsqu'il est satisfait de son choix, il le valide à l'aide du bouton « valider » (ou avec la touche « entrée ») ;

(iv) le système arrête le chronomètre, affiche les valeurs numériques de référence et indique, par des carrés rouges, les accessoires qu'il fallait sélectionner (voir figure VI.13). Retour en (i) ;

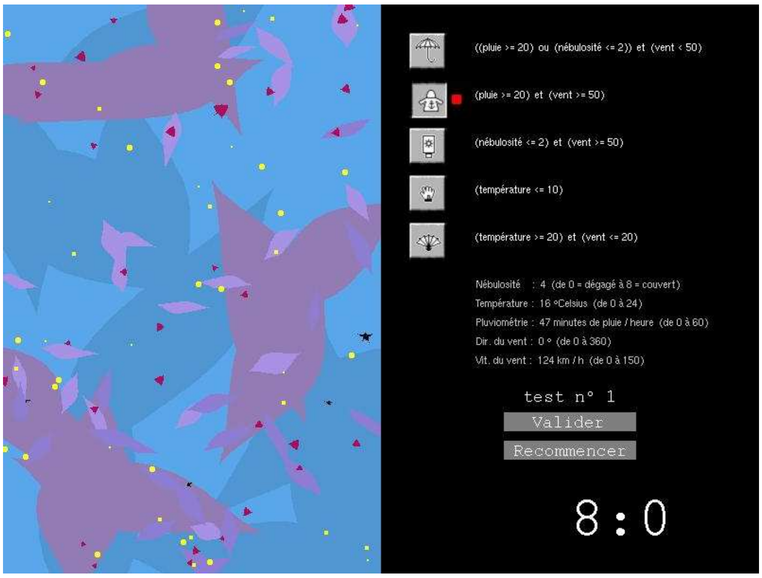


figure VI.13 – Phase de vérification.

③ le sujet est finalement soumis à cinq tests analogues aux deux tests blancs décrits en ②. Ce sont ces tests que nous prendrons en compte dans notre analyse.

VI.3.1.4. Résultats

Les dix sujets ont été soumis à l'expérience décrite, en proposant successivement, et dans cet ordre, la représentation du *Jardin des Hasards*, la représentation textuelle, et finalement la représentation par pictogrammes. Nous nous sommes nous-mêmes soumis à l'expérience complète une dizaine de fois. Pour chaque test, les deux critères d'évaluation des résultats sont d'une part le temps de réponse, et d'autre part le nombre d'erreurs commises, c'est-à-dire des accessoires sélectionnés à tort, ou d'autres non sélectionnés alors que cela aurait été nécessaire. Le fait de sélectionner le parapluie au lieu du ciré et réciproquement a été comptabilisé comme une seule erreur, de même que le fait de sélectionner le parapluie au lieu de la crème solaire et réciproquement.

	Temps Jardin des Hasards	Erreurs Jardin des Hasards	Temps texte	Erreurs texte	Temps picto-grammes	Erreurs picto-grammes
G. Hutzler	3,134	2	4,9	0,5	2,881	0,6
Sujet 1	10,94	4	11,06	0	10,98	1
Sujet 2	14,88	1	16,36	4	9,68	2
Sujet 3	18,96	1	17,12	1	26,16	1
Sujet 4	26,08	3	30,6	0	23,7	2
Sujet 5	13,36	2	13,84	1	7,52	3
Sujet 6	11,12	3	18,96	3	18,56	2
Sujet 7	6,06	5	6,26	3	6,76	1
Sujet 8	23,58	3	14,48	0	19,28	0
Sujet 9	21,68	4	22,96	2	29,02	0
Sujet 10	19,58	6	16,64	0	16,22	1
Moyenne	**16,624**	**3,2**	**16,828**	**1,4**	**16,788**	**1,3**
Minimum	6,06	1	6,26	0	6,76	0
Maximum	26,08	6	30,6	4	29,02	3
Ecart type	6,045	1,536	6,257	1,428	7,521	0,9

tableau VI.7 - Résultats bruts ; pour chaque variable et chaque sujet, les valeurs correspondent à la moyenne des temps de réponse et des erreurs (en valeur absolue) commises pour les cinq tests. Les calculs statistiques ne concernent que les dix sujets.

Le tableau VI.7 récapitule les résultats obtenus par les dix sujets ainsi que par nous-mêmes. D'un point de vue général, ces résultats ne montrent pas de différence

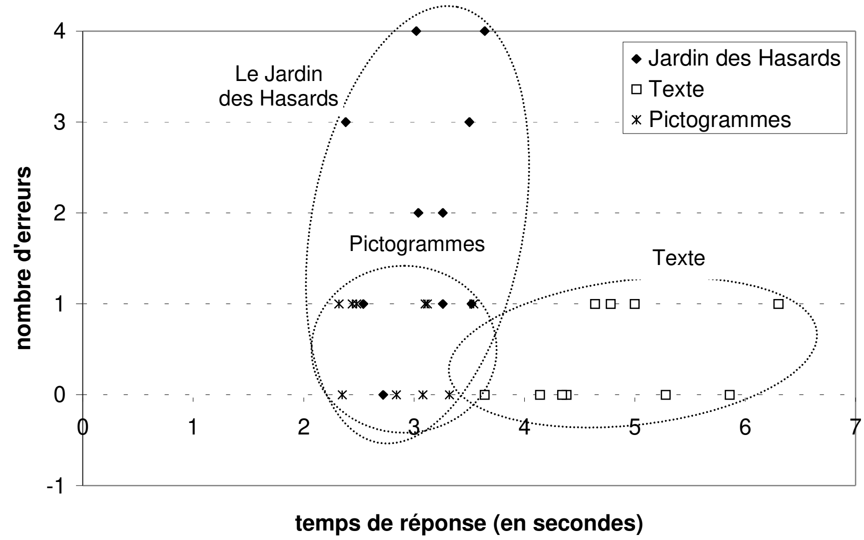


figure VI.14 – Nombre d'erreurs en fonction du temps de réponse pour les dix séries de tests que nous avons effectuées et pour les trois modes de représentation.

significative concernant le temps de réponse puisqu'il est pratiquement identique pour les trois modes de représentation. Seul le nombre d'erreurs apparaît sensiblement plus élevé avec le *Jardin des Hasards*, ce qui n'est finalement pas très surprenant étant donnée la relative imprécision de ce mode de représentation. Ces résultats sont d'autant plus difficiles à interpréter que l'ordre de passation des trois représentations influe certainement sur les performances, puisqu'il est nécessaire d'assimiler les conditions de choix des accessoires. Par ailleurs, les représentations textuelles et par pictogrammes ne nécessitent aucun apprentissage, contrairement au *Jardin des Hasards*. Nos propres résultats sont plus significatifs ainsi que le montre la figure VI.14.

La répartition du nombre d'erreurs en fonction du temps de réponse apparaît en effet très différente suivant le mode de représentation. La représentation textuelle est ainsi caractérisée par des temps de réponse assez variables mais relativement longs et un nombre d'erreurs relativement faible, bien que non nul. La représentation par pictogrammes est caractérisée par un nombre d'erreurs comparable à celui de la représentation textuelle mais pour des temps de réponse beaucoup plus courts. Le *Jardin des Hasards* se caractérise enfin par des temps de réponse comparables à la représentation par pictogrammes, mais avec un nombre d'erreurs variable, souvent plus élevé qu'avec les deux autres modes de représentation.

Ces résultats confirment les premiers résultats présentés concernant la précision et la vitesse de la perception que le *Jardin des Hasards* autorise. Ils montrent qu'effectivement, le *Jardin des Hasards* permet d'avoir très rapidement une impression globale des conditions météorologiques, permettant donc de réagir rapidement lorsque la situation nécessite d'effectuer tel ou tel choix. Les conditions de choix des différents accessoires étant par ailleurs strictes, il suffit d'une erreur d'appréciation d'une unité pour que le choix soit erroné, ce qui handicape fortement la représentation du *Jardin des Hasards* par rapport aux deux autres modes de représentation, lorsque la valeur d'une variable est proche de la valeur discriminante. A titre d'exemple, les erreurs que nous avons commises par rapport au choix des gants l'ont été pour des valeurs de température comprises entre 6 et 14°C, alors que la valeur discriminante est de 10°C.

Ce handicap pourrait être atténué en concevant des affichages bien différenciés suivant que l'on se situe d'un côté ou de l'autre de la valeur discriminante, plutôt que des variations continues de formes ou de couleurs comme c'est le cas du *Jardin des Hasards*. Par ailleurs, certaines personnes sortent leurs gants lorsque la température est inférieure à 10°C tandis que d'autres ne le font que lorsqu'elle est inférieure à 5°C. Le handicap du *Jardin des Hasards* serait donc également moindre si le choix de prendre ou non un accessoire bénéficiait d'une marge de tolérance. C'est ce que nous avons tenté d'évaluer avec l'expérience qui suit.

VI.3.2. CONTROLE ET COMMANDE

Outre la tolérance aux erreurs faibles, nous avons essayé, dans cette dernière expérience, de nous rapprocher le plus possible de conditions de contrôle et de commande d'un système complexe.

VI.3.2.1. Principe de l'expérience

Se rapprocher de conditions de contrôle et de commande, cela signifie se placer dans un contexte dynamique où les conditions météorologiques évoluent de manière continue, et où les choix doivent donc être révisés en permanence. L'expérience précédente a été modifiée en ce sens. Partant de conditions météorologiques initiales aléatoires, le système modifie, à intervalles irréguliers, les différentes variables, augmentant ou baissant leur valeur. A tout instant, les accessoires appropriés doivent être sélectionnés. A mesure de l'évolution des variables, le sujet doit donc sélectionner les accessoires qu'il pense correspondre à la situation courante et désélectionner ceux qui ne correspondent plus.

Une marge de tolérance de 10% a été ajoutée aux conditions de choix présentées au paragraphe VI.3.1.1. On considérera par exemple que les gants doivent impérativement être portés pour une température strictement inférieure à 8°C, qu'ils doivent impérativement être retirés lorsque la température dépasse 13°C et que le choix est indifférent dans l'intervalle. L'évaluation des performances s'effectue en partant d'un score initial, qui est abaissé chaque fois qu'une erreur est commise. Pour ce faire, le système examine, à chaque cycle de simulation, les accessoires sélectionnés. Si l'un des accessoires n'est pas correctement sélectionné, le score est d'autant plus abaissé que l'on se trouve loin des conditions acceptables. Si par exemple le sujet a choisit de prendre des gants alors que la température est de 15°C, donc plus élevée que la valeur limite 13°C, le score sera diminué de (15 – 13) / 12.5, c'est-à-dire l'écart par rapport à la valeur acceptable divisé par un coefficient prenant en compte la taille de l'intervalle de définition de la variable (voir figure VI.15). L'expérience se termine lorsque le score devient nul.

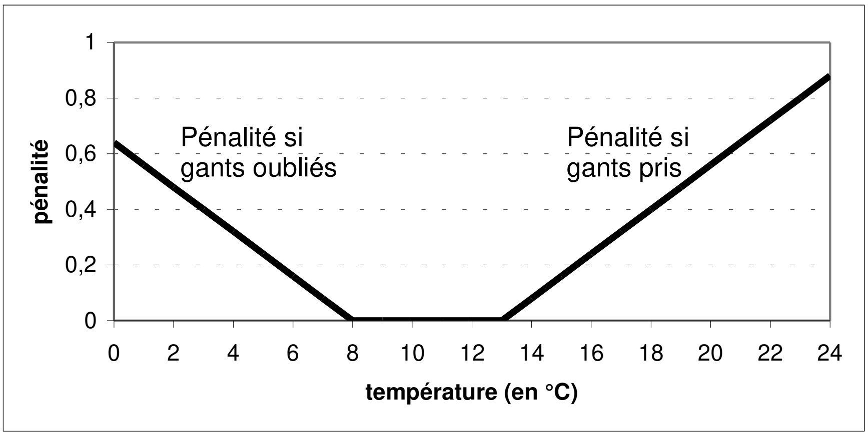


figure VI.15 – Calcul de la pénalité associée à un mauvais choix des gants en fonction de la température.

VI.3.2.2. Résultats

Nous avons nous-mêmes effectué cette expérience une dizaine de fois pour chaque mode de représentation (*Jardin des Hasards*, texte, pictogrammes), en enregistrant à chaque fois la durée de l'expérience, exprimée en nombre de cycles de simulation. Le but est évidemment de faire en sorte que toutes les conditions restent vérifiées le plus longtemps possible, et l'on considérera donc que les résultats sont d'autant meilleurs que la durée de l'expérience est longue. La figure VI.16 montre les résultats obtenus.

Il apparaît très nettement une grande variabilité des résultats d'une expérience à l'autre, un peu moins marquée cependant avec le *Jardin des Hasards*. Cette tendance est confirmée par le tableau VI.8, où l'on voit par l'exemple que pour la représentation textuelle, l'écart-type est presque égal à la moyenne ! On peut voir par ailleurs que si les représentations textuelles et par pictogrammes permettent, dans les bons cas (maxima), de meilleures performances que le *Jardin des Hasards*, elles conduisent également dans d'autre cas (minima), à de très grosses erreurs. On retrouve en cela les résultats évoqués au paragraphe VI.1.2 comparant les jugements effectués en faisant appel au raisonnement ou à la perception.

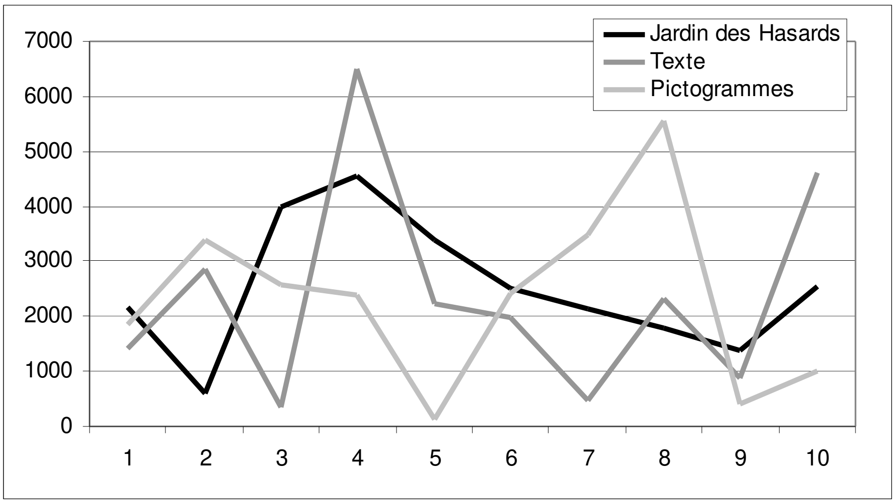


figure VI.16 – Durée de l'expérience (en nombre de cycles de simulation ; 1 minute = environ 300 cycles) sur dix expériences.

Ces erreurs extrêmes tiennent apparemment au fait qu'avec ces représentations, et notamment la représentation textuelle, une valeur devant conduire au choix d'un certain accessoire ne se distingue en rien, du point de vue perceptif, des autres valeurs. Il est donc courant de ne pas se rendre compte du passage d'une valeur acceptable à une valeur inacceptable. Dans d'autres cas, il arrive que l'on se rende compte qu'une des variables a pris une valeur qui devrait conduire au choix d'un accessoire, sans que l'on puisse déterminer tout de suite de quel accessoire il s'agit. Il n'y a en effet aucune correspondance, du point de vue perceptif, entre la valeur numérique en erreur et l'accessoire à choisir. Pour compenser cette homogénéité de la représentation, le texte nécessite un effort de concentration très intense pour réussir à effectuer les bons choix. La représentation par pictogrammes pose des problèmes similaires, mais dans une moindre mesure.

	Jardin des Hasards	Texte	Pictogrammes
Moyenne	2506,6	2360,9	2318,9
Minimum	593	343	127
Maximum	4540	6494	5544
Ecart-type	1131,8	1827,7	1528

tableau VI.8 – Statistiques sur l'ensemble des dix expériences.

Le *Jardin des Hasards* ne demande pas une attention aussi soutenue que les deux autres types de représentation, et nous semble beaucoup plus naturel et agréable à utiliser dans ce contexte. La difficulté essentielle provient de la relativité de la perception proposée. Lorsque la température passe rapidement de 24°C à 15°C, l'impression ressentie est qu'il fait soudain plus froid, et l'on peut alors être tenté de sortir ses gants. Malgré cela, les résultats sont en moyenne meilleurs avec le *Jardin des Hasards* qu'avec les autres représentations, même si les différences ne sont pas très grandes. Plus important, le *Jardin des Hasards* ne demande pas nécessairement une attention soutenue pour être efficace. Dans le cadre du contrôle de systèmes complexes, le *Jardin des Hasards* pourrait donc constituer un complément utile aux représentations plus classiques en proposant un affichage d'ambiance du système. L'opérateur pourrait retirer des informations de cet affichage tout en continuant à focaliser son attention sur une autre tâche. En cas de doute, un affichage numérique, par cadrans ou par pictogrammes, pourrait s'y substituer.

VI.4. DISCUSSION

Avec ces différentes expériences, un premier cycle d'évaluation a été effectué pour essayer de mettre en évidence les qualités ou les défauts du *Jardin des Hasards* comme moyen de représentation de la météorologie. Il est temps d'en tirer les premiers enseignements dans la perspective d'une utilisation plus appliquée et industrielle des questions posées par le projet artistique.

VI.4.1. ENSEIGNEMENTS

Il convient naturellement d'être prudent dans l'interprétation des résultats que nous venons de présenter. Ceux-ci ne concernent en effet qu'un petit nombre de sujets, un seul pour certaines expériences, constituant de plus une population relativement homogène. Il serait sans doute intéressant d'étudier une population plus large et plus diversifiée. Dans l'optique d'une utilisation plus appliquée et industrielle du *Jardin des Hasards*, il serait par ailleurs nécessaire d'établir une collaboration avec des ergonomes afin de bien mettre en évidence tous les biais possibles (effet d'apprentissage, ordre de passage, motivation, choix de valeurs aléatoires ou de situations réelles, etc.). Néanmoins, il nous semble possible de tirer un certain nombre de conclusions.

Les enseignements que l'on peut tirer de l'expérience de précision de perception sont d'abord des enseignements critiques, mais devant permettre de conduire à une représentation plus performante. Cette expérience a en effet permis de mettre en évidence les principaux défauts du *Jardin des Hasards* dès lors que l'on souhaite percevoir précisément les données visualisées. Ces défauts, comme nous l'avons montré, concernent des problèmes d'ambiguïté (formes identiques désignant des nuages et des feuilles, formes de différentes vitesses pour désigner la vitesse du vent), ou d'interférence entre plusieurs variables (problèmes de contraste pour percevoir la pluie lorsque la température est basse, sous-estimation de la vitesse du vent lorsque la nébulosité s'annule). Ces problèmes ne sont pas inhérents à la conception de la plate-forme, mais plutôt aux choix de la symbolique de représentation. Il est donc a priori possible d'améliorer sensiblement les performances en tenant compte des résultats de cette expérience, et en répétant le processus d'évaluation et de conception jusqu'à stabilisation des performances.

Les impressions subjectives des sujets soumis à cette première expérience, ainsi que les expériences suivantes, peuvent davantage nous renseigner sur les qualités du système, et les conditions dans lesquelles son utilisation pourrait se révéler la plus profitable. Les impressions des sujets, ce qu'ils en disent spontanément au cours de l'expérience ou lorsqu'on les interroge, indiquent tout d'abord qu'ils trouvent en général la représentation du *Jardin des Hasards* très agréable et très « parlante ». L'image semble bien transmettre une sensation immédiate du temps qu'il fait même si les sujets ne sont pas forcément capables de traduire cette sensation, ni de manière précise en valeurs numériques (expérience de précision), ni de manière rapide en choix d'habillement (expérience de choix d'accessoires). On peut penser que l'effet produit s'apparente à celui que l'on peut ressentir lorsque l'on perçoit la météorologie dans la vie de tous les jours : si l'on sait intuitivement le temps qu'il fait, rares sont les personnes capables de deviner la température sans regarder un thermomètre ; il n'est pas non plus forcément simple de savoir comment s'habiller le matin !

Les expériences que nous avons nous-mêmes effectuées confirment cette impression, tout en montrant qu'un apprentissage permet de palier en partie aux problèmes de précision. L'expérience de rapidité montre que la perception des données reste acceptable pour des temps de présentation même courts, ce qui accrédite l'idée d'une perception globale d'une situation météorologique, de laquelle il est possible après coup d'extraire des informations concernant les différentes données visualisées. Nos résultats à l'expérience de choix d'accessoires permettent par ailleurs de positionner le *Jardin des Hasards* par rapport à d'autres modes de représentation tels que ceux utilisant le texte ou des pictogrammes, démontrant là encore une perception rapide bien qu'un peu imprécise, à comparer aux résultats précis, mais lents, du texte, et aux résultats à la fois précis et rapides des pictogrammes. Il faut noter, à ce propos, que les résultats seraient sans doute plus sensibles en utilisant un plus grand nombre de variables à visualiser. En effet, les représentations textuelles et par pictogrammes, qui montrent une vision « éclatée » des données, sont d'autant plus difficiles à utiliser que le nombre de variables à visualiser est grand. Au contraire, le *Jardin des Hasards*, qui propose une représentation globale des données, serait sans doute moins pénalisé par l'augmentation du nombre de variables, bien que les problèmes d'interférences entre les différentes variables augmenteraient sans doute également.

Enfin, la version dynamique de cette dernière expérience montre un confort d'utilisation très supérieur du *Jardin des Hasards* par rapport aux autres modes de représentation, et même des performances supérieures lorsque la tâche ne demande pas une précision absolue. Ce dernier résultat est d'autant plus intéressant que l'évaluation concernait un système de visualisation, conçu dans une démarche artistique et dont nous avions auparavant montré toutes les insuffisances quant à la précision des données représentées. Par ailleurs, comme nous venons de le souligner, il semble très probable, bien que cela reste à vérifier, que ce type de visualisation soit d'autant plus intéressant par rapport aux représentations plus classiques que le nombre de données à représenter est important. Avec seulement cinq variables, nous nous placions dans un cadre qui n'était pas encore très complexe, donc dans lequel une approche textuelle ou par pictogramme restait envisageable.

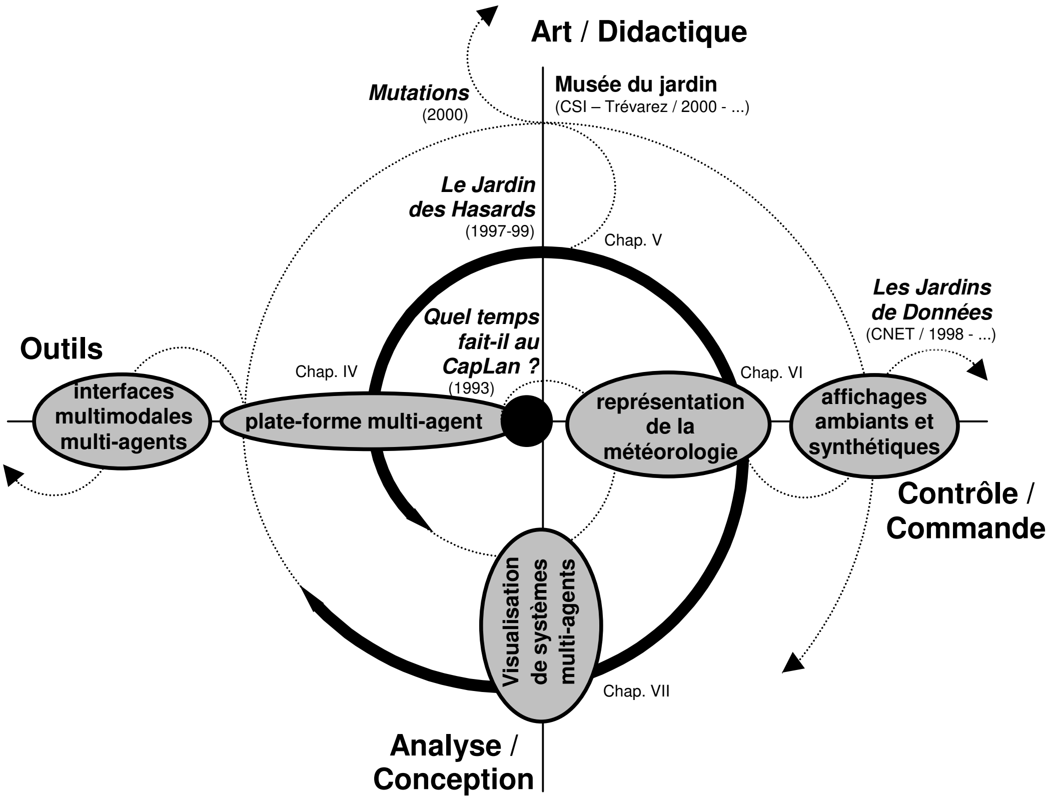


figure VI.17 – Le travail de représentation de la météorologie, amorcé avec le *Jardin des Hasards*, s'est concrétisé par la définition d'une collaboration industrielle avec le Centre National d'Etude des Télécommunications pour la conception d'interfaces de contrôle du trafic automobile.

VI.4.2. VERS LES *JARDINS DE DONNEES* : APPROCHE SYNTHETIQUE

Ces premiers résultats, très encourageants, nous ont amenés à définir un projet dérivé du *Jardin des Hasards*, baptisé *Jardins de Données* par référence au premier, qui fait l'objet d'une collaboration industrielle avec le Centre National d'Etude des

Télécommunications[35]. L'objectif est de valider l'approche que nous venons de présenter pour la construction de représentations « ambiantes » et synthétiques de systèmes complexes, dans le cadre d'une application industrielle de contrôle du trafic automobile (voir figure VI.17). Cette recherche constitue notamment le travail de thèse de V. Renault. Le problème posé est de considérer le trafic automobile comme un système complexe constitué de véhicules, eux-mêmes composés d'un système complexe mécanique (la voiture) piloté par un système complexe biologique (le conducteur), le tout placé dans un système complexe physique (la météorologie). La représentation résultante pourrait être utilisée par un opérateur qui aurait à surveiller à distance un ensemble de véhicules, dans le cadre, par exemple, d'une compagnie de taxis ou de transports en commun.

Il s'agit de s'assurer, en particulier, que l'exemple de représentation de la météorologie proposé par le *Jardin des Hasards* ne constitue pas un « heureux » cas particulier, et peut être généralisé à différents systèmes complexes. Nous avons déjà évoqué le nombre d'informations à afficher qui reste faible dans le projet artistique. En étudiant des systèmes plus complexes en termes de nombre de données nécessaires pour le décrire, il faut vérifier que la démarche reste applicable et donne encore des résultats satisfaisants. Par ailleurs, le système météorologique est associé naturellement par chacun à des sensations visuelles, ce qui facilite sa représentation et sa perception. N. Gershon [Gershon 1998] souligne que l'un des problèmes clés de la visualisation d'information est de trouver de bonnes métaphores pour des données abstraites qui n'ont pas de correspondance physique, visuelle ou sonore. Dans le cadre des *Jardins de Données*, l'idée est d'associer une représentation ambiante de type météorologique à un système complexe à contrôler, permettant de savoir si « il fait beau » ou si « il fait mauvais », indiquant que tout va bien ou signalant la survenue d'un problème dans le système. Lorsque ce dernier cas se produit, il est nécessaire de disposer d'autres méthodes de visualisation, offrant une vision moins abstraite du système. Le dernier chapitre propose des éléments de réflexion pour la conception d'interfaces qui, tout en étant moins abstraites, s'adressent encore aux niveaux de perception les plus bas par la construction d'une hiérarchie visuelle.

[35] Centre de recherche et développement de France Télécom. La collaboration prend la forme du financement d'un contrat de recherche (dans le cadre des Consultations Thématiques Informelles) et d'une thèse, effectuée par Valérie Renault.

CHAPITRE VII

ELEMENTS DE CONCEPTION D'INTERFACES

Nous avons examiné, dans le chapitre précédent, l'utilisation qui pouvait être faite de représentations ambiantes et synthétiques telles que celle proposée par le *Jardin des Hasards*, pour le contrôle et la commande de systèmes complexes. Nous allons à présent nous pencher sur la conception d'interfaces moins abstraites et la construction de hiérarchies visuelles. Dans ce cadre, il ne s'agira plus de représenter, en temps réel, le fonctionnement d'un système réel extérieur à la plate-forme, mais plutôt de proposer des modes d'affichage intéressants pour des systèmes virtuels implantés sur la plate-forme. L'écosystème artificiel du *Jardin des Hasards* est un exemple de tels systèmes (supra V.4). Nous avons présenté au paragraphe IV.1.4 deux types d'affichage utilisés pour la visualisation de systèmes multi-agents tout en soulignant la multitude des solutions envisageables. Si les possibilités sont effectivement très grandes, la question de la représentation est rarement abordée en tant que telle (voir pourtant [Proton et al. 1997]), ce que nous nous proposons de faire dans ce chapitre. En représentant un système multi-agent, l'objectif est double : d'une part faciliter l'analyse visuelle du système, en vue d'en comprendre le fonctionnement et éventuellement d'en modifier la conception (problématique d'analyse-conception, supra II.3.3) ; d'autre part hiérarchiser les informations caractérisant le fonctionnement du système de manière à en percevoir à chaque instant les aspects les plus importants. Avant de présenter des exemples correspondant à ces deux objectifs, nous allons mettre en parallèle la construction d'un système multi-agent et la perception d'une image, ce qui nous donnera des éléments pour comprendre la conception de représentation de systèmes multi-agents.

VII.1. REPRESENTER LES SYSTEMES MULTI-AGENTS

Pour construire une représentation visuelle d'un système multi-agent à destination d'un utilisateur, il est nécessaire de comprendre d'une part comment le système fonctionne, d'autre part comment l'utilisateur perçoit la complexité à travers les images qu'il reçoit. Nous aborderons le premier point à l'aide de la méthode *Cassiopée*, conçue pour faciliter l'analyse de systèmes multi-agents. Le deuxième aspect sera abordé d'un point de vue à la fois psychologique et artistique, avec les recherches de la psychologie de la Gestalt et les recherches analytiques de W. Kandinsky.

VII.1.1. INTERFACE HOMME / SYSTEME COMPLEXE

Que ce soit dans une problématique de contrôle et de commande ou dans une démarche d'analyse et de conception, la construction d'interface impose de se poser les questions « quoi ? » et « comment ? ». Il s'agit d'une part de choisir ce que l'on veut visualiser du système complexe en fonction de ce que l'on souhaite en faire. Il s'agit d'autre part de déterminer la forme à donner à l'information présentée de manière à en faciliter la perception (voir figure IV.8).

Point de rencontre entre un système et un utilisateur, l'interface se doit donc de faire la synthèse des connaissances que l'on possède de chacun d'entre eux, d'intégrer la complexité du système en même temps que celle de l'opérateur humain. Concernant la description du système, de nombreuses méthodes existent, développées notamment en génie logiciel (SADT [Lissandre 1990], Merise [Matheron et al. 1990], OMT [Rumbaugh et al. 1995], réseaux de Pétri [Prot et Xie 1995]). Nous utiliserons quant à nous la méthode *Cassiopée* [Collinot et al. 1996], plus spécifiquement adaptée à l'analyse de systèmes multi-agents. Concernant la modélisation des processus perceptifs de l'utilisateur, de multiples théories sont en concurrence pour expliquer les mécanismes neurophysiologiques de la vision (voir [Delorme 1992] pour une présentation comparée de ces théories), sans doute plus complémentaires que véritablement opposées. Plutôt que de nous appuyer sur l'une ou l'autre, nous nous sommes intéressés aux études phénoménologiques, comme celles proposées par la psychologie de la Gestalt [Kanizsa 1997] ou par certains peintres abstraits comme W. Kandinsky [Kandinsky 1991], qui visent à décrire, plutôt qu'à expliquer, les caractéristiques picturales déterminant la perception d'une image.

Nous serons amenés à nous intéresser à un système en adoptant successivement des points de vue correspondant à différents niveaux, depuis les comportements individuels ou élémentaires jusqu'aux dynamiques collectives, en passant par les interactions entre les éléments constitutifs du système. Parallèlement, nous nous poserons la question de la transcription de ces différents niveaux de fonctionnement sous forme visuelle. Nous nous limiterons dans ce cadre à l'utilisation de l'image, le son méritant à lui seul une étude séparée, sans compter les interactions possibles entre les deux modalités.

VII.1.2. LA METHODE D'ANALYSE CASSIOPEE

Les systèmes multi-agents peuvent être considérés comme des ensembles d'entités qui interagissent les unes avec les autres, et qui participent ainsi à des dynamiques organisatrices. Pour décrire ces systèmes de manière un peu plus précise, il est nécessaire de s'appuyer sur des méthodes et des formalismes particuliers. C'est ce que propose la systémique [Durand 1979], qui s'intéresse à l'étude des systèmes en général. Dans le cadre plus spécifique de l'analyse et de la conception de systèmes multi-agents, la méthode *Cassiopée* propose un « *cadre méthodologique* permettant de mieux problématiser et planifier la conception d'une organisation computationnelle » [Collinot et Drogoul 1996], mais constitue surtout une grille d'analyse de ces organisations. Bien que conçue dans un contexte agent, cette méthodologie utilise un formalisme suffisamment neutre pour être applicable à un large éventail de systèmes.

La méthode s'appuie sur l'identification de rôles dont les agents peuvent être dotés, rôles répartis en trois niveaux : un niveau individuel auquel correspondent des *rôles du domaine*, c'est-à-dire les compétences d'un agent; un niveau interactionnel auquel correspondent des *rôles relationnels* qui décrivent la structure de l'organisation; un niveau global enfin auquel correspondent des *rôles organisationnels* qui décrivent la dynamique de l'organisation et permettent la prise en compte de systèmes dont l'organisation n'est pas figée.

VII.1.3. APPROCHE PSYCHOLOGIQUE ET ARTISTIQUE DE L'IMAGE

La deuxième étape consiste à transcrire ces différents niveaux de complexité sous forme visuelle. A cet effet, il est important de comprendre comment un utilisateur perçoit des images, de manière à donner à la représentation, une forme qui soit effectivement perçue comme la traduction visuelle du système. De même que n'importe quel autre système, l'image peut être abordée du point de vue de ses éléments constitutifs, du point de vue des interactions entre ses éléments ou encore du point de vue global. En adoptant une démarche psychologique, on peut décrire une image comme la composition d'un ensemble de formes, elles-mêmes constituées de primitives visuelles élémentaires. A un niveau plus élevé, ces formes sont mises en relation les unes avec les autres selon des principes d'organisation perceptive décrits par la psychologie de la Gestalt [Kanizsa 1997]. Enfin, au niveau global, la composition d'une image, et donc aussi son interprétation, répondent à des critères que nous essaierons d'expliciter.

Cette analyse peut également s'exprimer dans un contexte artistique comme en témoignent les recherches analytiques de W. Kandinsky. Pour représenter un système multi-agent, nous nous attacherons à donner à des agents une apparence extérieure qui traduise un état interne particulier. W. Kandinsky, pour sa part, a tenté d'associer à des formes et des couleurs, une certaine vie propre, une « nécessité intérieure », afin de comprendre comment des émotions pouvaient être transmises par l'intermédiaire de la peinture. « Extérieurement, toute forme graphique ou picturale est un élément. Intérieurement, ce n'est pas la forme, mais sa tension vivante intrinsèque qui constitue l'élément » [Kandinsky 1991]. Mais si la motivation était d'ordre esthétique voire spirituel, la méthode se voulait quant à elle parfaitement scientifique, par l'étude systématique du rôle de la forme et de la couleur en peinture : « L'ambition de toute recherche est : 1. l'examen minutieux de chaque phénomène – isolé, 2. effet réciproque des phénomènes – synthèse, 3. conclusion générale, découlant des deux parties précédentes » [Kandinsky 1991]. Démarche que l'on pourrait qualifier également de systémique, par l'étude des éléments picturaux et de leurs interactions à l'intérieur du système constitué par le tableau. *Point et ligne sur plan*, titre de l'ouvrage dans lequel W. Kandinsky expose le résultat de ses recherches sur les formes picturales [Kandinsky 1991], résume parfaitement cette démarche, et va nous servir de trame dans une présentation parallèle de la construction d'un système multi-agent et de la perception d'une image.

VII.2. POINT ET LIGNE SUR PLAN

En reprenant une terminologie agent et système, on pourrait mettre en parallèle « point et ligne sur plan » avec « agent en interaction dans système ». En alternant les deux terminologies, l'une artistique et psychologique, l'autre multi-agent, nous allons maintenant décomposer le passage d'un système à sa représentation puis le passage de la représentation à un modèle cognitif du système dans l'esprit de l'observateur.

VII.2.1. POINT…

Du point de vue pictural, le point est l'élément de base, celui dont découle toutes les autres formes. Il est, selon W. Kandinsky, un « être autonome », doté d'une vie intérieure qui s'exprime par des tensions. Nous considérerons quant à nous que la vie intérieure du point découle de la manière dont les processus perceptifs de l'observateur vont donner une existence autonome au point en même temps qu'ils vont établir des relations entre le point et d'autres éléments picturaux. W. Kandinsky s'intéresse par ailleurs moins au point en tant que tel, que comme un élément pictural primaire, puisque le point, bien qu'idéalement considéré comme un disque infiniment petit, sera caractérisé en pratique par sa forme et sa dimension. Du point du vue systémique, c'est l'agent que l'on fera correspondre au point pictural.

VII.2.1.1. Des agents

Nous avons présenté rapidement au paragraphe IV.2.2.1 ce que nous placions derrière le terme « agent » : « une entité autonome dotée d'un certain nombre de *ressources* et pouvant mettre en œuvre un certain nombre de *comportements* ». Nous avons présenté par ailleurs, à la section IV.3.3.2, la manière dont cette conception était implantée dans notre plate-forme. De ce point de vue, ce qui caractérise un agent, ce sont d'une part l'ensemble des paramètres et variables qu'il manipule, d'autre part le type d'action effectuée ou de comportement activé à un moment donné. Il s'agit là d'un point de vue ascendant, par opposition à une démarche systémique qui considérerait l'agent comme une boîte noire qui accomplit une certaine fonction, indépendamment des mécanismes mis en œuvre. En visualisant le fonctionnement interne de l'agent, nous pensons qu'il est possible d'en tirer une meilleure compréhension de ces mécanismes.

A un niveau plus élevé, l'approche systémique souligne que tout système artificiel, donc également les systèmes multi-agents, est conçu en vue d'atteindre un certain but, d'assurer une certaine fonction [Simon 1991]. Encore une fois, cette démarche s'intéresse à la fonction indépendamment des mécanismes en jeu et considère que comprendre le **fonction**nement d'un système, c'est comprendre quelle est sa fonction. Nous nous intéressons quant à nous à cette fonction comme la résultante de l'activité combinée d'un ensemble d'agents, ayant chacun une fonction particulière au sein du système. La méthode *Cassiopée* [Collinot et Drogoul 1996] intègre cette dimension par l'utilisation de la notion de *rôles* qui, du point de vue de l'agent, constituent des « regroupements de comportements qui réalisent des fonctionnalités propres ». On parlera plus précisément de *rôles du domaine*, qui représentent « à la fois la fonction qu'accomplit l'agent à un instant donné et la position qu'il occupe en ce même instant dans le groupe d'agents. »

En travaillant sur la visualisation des agents, l'objectif visé est donc à la fois d'expliciter les mécanismes par lesquels un agent accomplit une certaine fonction, et d'expliciter ceux par lesquels le système dans son ensemble accomplit lui aussi une fonction donnée. Indépendamment de considérations fonctionnelles, il s'agira également de rendre observables les différents modes d'organisation dynamique du système considéré. Pour ce faire, il est nécessaire de traduire les caractéristiques des agents sous forme visuelle.

VII.2.1.2. Des éléments visuels primaires aux formes

Les récepteurs rétiniens sont capables d'extraire un certain nombre de primitives visuelles élémentaires de manière directe. Ils sont bien entendu sensibles à l'intensité de la lumière qu'ils reçoivent [Bonnet et al. 1989]. Certains sont de plus sensibles à la longueur d'onde de cette lumière, ce qui permet la vision des couleurs. Mais l'on observe également que certaines caractéristiques comme l'orientation de segments ou encore la direction et le sens de mouvements activent de manière sélective certains récepteurs rétiniens. D'autres caractéristiques encore, liées à la perception de textures ou de la profondeur, sont également perçues de manière sélective. Toutes ces primitives semblent être codées de manière séparée, dans un ensemble de « modules » du cortex visuel, modules qui constituent des voies distinctes analysant séparément des caractéristiques de forme, de couleur, de mouvement [Bonnet et al. 1989]. A un niveau à peine plus élevé de perception, ces primitives sont utilisées pour le découpage de l'image en zones homogènes et pour la détection de contours, préalable à la détection de figures. Du point de vue de la représentation de systèmes, il apparaît donc que forme, couleur et mouvement pourront être utilisés, seuls ou en combinaison, pour représenter et caractériser des éléments du système.

Pour que ces éléments soient repérés efficacement, il faut que les formes qui les représentent soient facilement distinguées du fond. Or cette distinction n'est pas aussi simple qu'il y paraît puisque de nombreuses figures ont été construites dans lesquelles figure et fond sont susceptibles de s'inverser (voir figure VII.1).

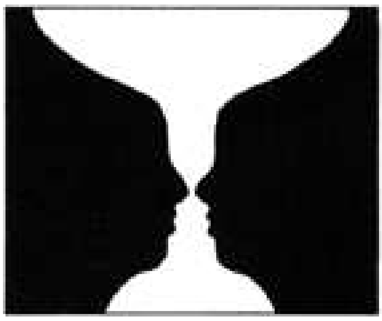


figure VII.1 – Vase de Rubin : la figure peut être perçue alternativement comme un vase ou comme deux profils qui se font face, suivant que c'est la partie blanche ou noire de l'image qui est perçue comme forme (d'après [Delorme 1982]).

Le psychologue E. Rubin s'est intéressé à ce qui, d'un point de vue phénoménologique, caractérise les distinctions que l'on peut faire entre les deux. Il distingue ainsi quatre *traits phénoménaux* qui distinguent la figure du fond [Delorme 1982] :

(i) la figure a un caractère d'objet et le fond un caractère de substance
(ii) la figure paraît plus proche que le fond
(iii) le fond semble se continuer derrière la figure
(iv) le contour appartient à la figure et non pas au fond

Il a défini par ailleurs cinq caractéristiques « objectives » du stimulus influant sur la sélection figure-fond (voir figure VII.2) :

(i) l'*orientation*
(ii) la *grosseur*
(iii) l'*inclusion*
(iv) l'*articulation*
(v) la *symétrie*

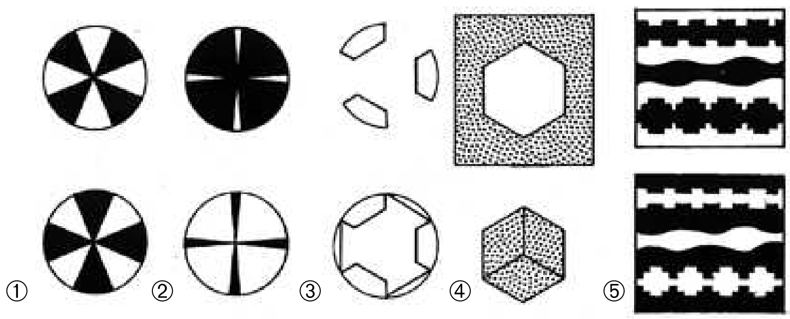


figure VII.2 – Caractéristiques « objectives » du stimulus influant sur la sélection figure-fond selon E. Rubin (d'après [Delorme 1982]) : ① l'orientation ; ② la grosseur ; ③ l'inclusion ; ④ l'articulation ; ⑤ la symétrie.

En pratique, le critère le plus simple pour déterminer qu'une forme constitue une figure plutôt qu'un fond réside dans le fait qu'elle soit délimitée par un contour fermé (critère d'inclusion). Il est possible, par ailleurs, pour la construction de systèmes de représentation, de fixer par convention la couleur du fond, ou de lui attribuer une texture différente des autres éléments picturaux, ce qui simplifie le problème. Dans le *Jardin des Hasards* par exemple (voir figure VII.3), les formes sont distinguées du fond par les traits phénoménaux (ii) et (iii) (la figure paraît plus proche que le fond, ce dernier paraissant se continuer derrière la figure), et par les caractéristiques (ii) et (iii) (la grosseur et l'inclusion).

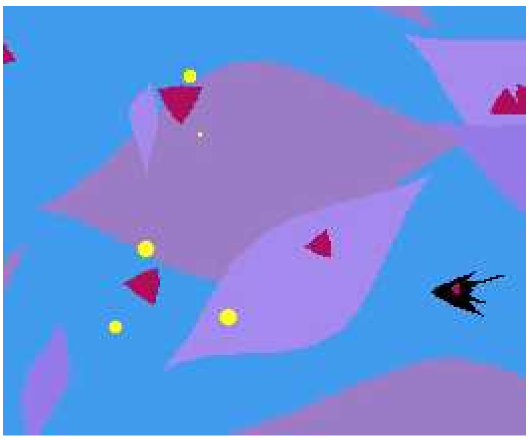


figure VII.3 – Formes du *Jardin des Hasards* montrant plusieurs épaisseurs de formes. Une forme peut être perçue à la fois comme une figure par rapport au fond de l'image, et comme le fond sur lequel se détachent d'autres formes plus petites.

Enfin, dans le cas d'images animées, un facteur très important réside dans le mouvement des figures par rapport au fond. Certains animaux ayant développé l'art du camouflage et du mimétisme [McFarland 1990, art. camouflage, mimétisme], pour se protéger de leurs prédateurs ou ne pas être repérés pas leurs proies, se confondent si bien avec leur environnement qu'ils ne deviennent visibles que lorsqu'ils bougent. Dans le *Jardin des Hasards*, cette notion de mouvement est naturellement un élément important dans la perception de formes en tant que figures qui se déplacent devant un fond.

VII.2.2. …ET LIGNE…

La ligne « est la trace du point en mouvement, donc son produit. (...) En vérité, la ligne peut être considérée comme un élément secondaire » [Kandinsky 91]. La ligne introduit ainsi en peinture la notion de dynamique. « Ici se produit le bond du statique vers le dynamique ». Et du fait de cette dynamique, du fait de ce mouvement du point qui traduit l'application d'une « tension » dans une certaine « direction », est introduite également la notion de relations entre éléments picturaux primaires qui aboutit à la création d'éléments secondaires.

VII.2.2.1. Des agents qui interagissent

Nous avons présenté les différentes méthodes que les agents de notre plate-forme pouvaient utiliser pour interagir les uns avec les autres, par émission de signaux ou par dépôt de traces dans leur environnement (supra IV.3.5), par utilisation d'une structure de données partagée (supra IV.3.4), ou encore en modifiant directement les valeurs de variables d'autres agents (supra IV.3.3.4). De même que pour les ressources et comportements d'un agent, il s'agit là d'une approche locale, de bas niveau, qui ne traduit pas des dépendances fonctionnelles entre agents mais plutôt des interactions concrètes entre eux, au sens où nous l'avons entendu d'actions et de perceptions réciproques. De même que pour les agents considérés de manière isolée, nous pensons que la visualisation de ces actions (un agent qui émet un signal ou qui modifie une variable d'un autre agent) et perceptions (un agent qui perçoit un signal, ou qui prend acte de la modification d'une variable) peut aider à la détection de dépendances fonctionnelles entre les comportements des agents.

La méthode *Cassiopée* aborde quant à elle directement le problème à ce niveau, en explicitant les dépendances entre rôles du domaine identifiés à l'étape précédente (supra VII.2.1.1) sous la forme d'un *graphe de couplage* [Collinot et Drogoul 1996]. Ces dépendances entre rôles se traduisent, du point de vue des agents, par la définition de relations d'influence entre agents, faisant apparaître deux *rôles relationnels* différents, celui *d'agent influent* et celui d'*agent influencé*. Cette influence s'exprime de manière pratique par l'utilisation de *signes d'influence*, produits par l'agent influent et interprétés par l'agent influencé.

Plus que les caractères isolés des différents agents, il s'agit ici de mettre en évidence les relations que ces agents entretiennent les uns par rapport aux autres, de par leurs interactions directes ou de par les dépendances fonctionnelles existant entre leurs comportements respectifs. Pour traduire ces notions sous forme visuelle, il est utile de s'intéresser à la manière dont les éléments du champ visuel sont mis en relation les uns avec les autres.

VII.2.2.2. Des éléments visuels en relation

Il existe principalement deux moyens de mettre des éléments visuels en relation : la similitude et le contraste. Ils ont été étudié en particulier par la psychologie de la Gestalt [Kanizsa 1997], qui a essayé d'extraire des principes d'organisation perceptive, décrivant la manière dont des éléments spatialement distincts sont identifiés comme appartenant à un même groupe. La question du contraste a quant à elle été étudiée plus particulièrement en peinture, conduisant notamment à l'identification de sept contrastes colorés.

La figure VII.4 présente des exemples des principes de regroupement perceptif les plus importants que sont les principes de groupement par proximité, par similitude, par continuité et par clôture. Ces principes formalisent une connaissance essentiellement empirique qui décrit le regroupement par l'œil des formes élémentaires qui sont proches les unes des autres (①), ou similaires (②), ou qui composent de par leur position des formes continues (③), ou encore qui tendent à constituer de par leur association des formes closes (④). Des principes supplémentaires, de sort commun (mouvement identique), de directionnalité, et d'autres encore, complètent l'inventaire. Il est bien évident que dans la plupart des cas, ces différents principes n'opèrent pas isolément et l'organisation du champ visuel s'effectuera alors sous l'influence simultanée de plusieurs principes. Souvent également, plusieurs principes sont susceptibles de s'appliquer et conduisent à des interprétations différentes de l'image. Il est alors difficile de savoir à l'avance lequel de deux principes en concurrence s'appliquera car il n'existe pas d'ordre de priorité strict entre ces principes. Un principe s'imposant avec beaucoup de force dans un certain contexte aura moins d'importance dans un autre contexte. Dans la situation ③ de la figure VII.4 par exemple, le principe de regroupement par continuité prend le pas sur celui de regroupement par proximité.

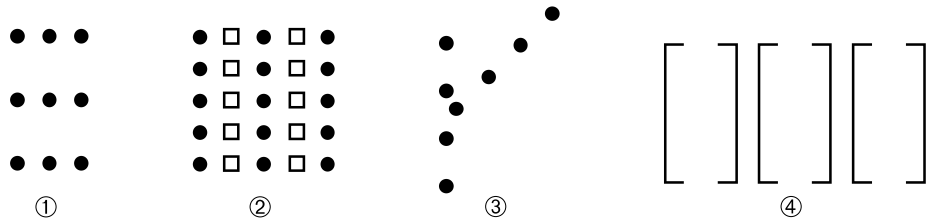


figure VII.4 – Principes de regroupement perceptif : ① par proximité ; ② par similitude ; ③ par continuité ; ④ par clôture.

Ces notions s'appliquent aux *Jardin des Hasards* (voir figure VII.5), bien qu'elles n'aient pas été consciemment utilisées dans la conception de la représentation. En particulier, les principes de regroupement par similitude et proximité s'appliquent très naturellement du fait des formes différentes associées aux différents types d'agents et du fait de leurs positions respectives. Dans le même temps, des formes sont mises en relation du fait de leurs mouvements similaires, une étoile carnivore pourchassant un triangle herbivore par exemple.

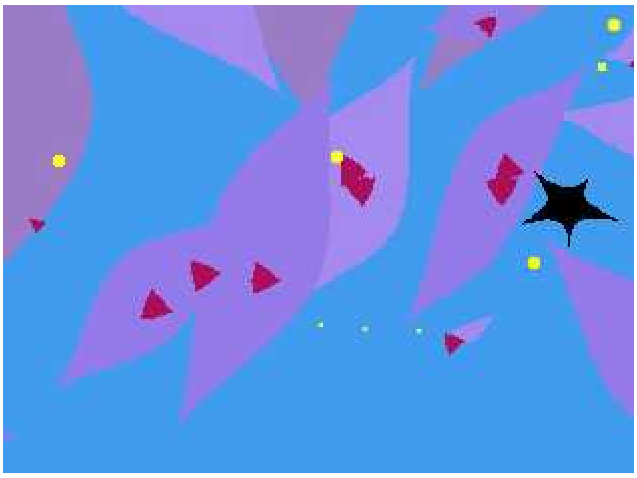


figure VII.5 – Des formes peuvent être associées entre elles, soit parce qu'elles sont similaires, soit parce qu'elles sont proches (par exemple des triangles herbivores et la feuille qu'ils sont en train de manger) ; par ailleurs, les formes sont également mises en relation les unes avec les autres par effet de contraste (feuilles et triangles herbivores, triangles et étoiles carnivores).

Les études en peinture se sont par ailleurs intéressées à la notion de contraste, c'est-à-dire « l'opposition de deux choses qui se font ressortir l'une l'autre » [Souriau 1990]. De fait, si chaque caractéristique d'un élément visuel, forme, mouvement, texture, etc. peut donner lieu à un contraste, ce sont les couleurs qui ont donné lieu à la formalisation la plus aboutie. Sept contrastes différents sont distingués : le contraste de couleurs en soi (opposition de couleurs saturées), le contraste clair-obscur (couleur claire associée à une couleur sombre), le contraste de qualité (couleur pure ou mélangée de noir), le contraste de complémentaires (rouge/vert, jaune/violet, bleu/orange), le contraste de quantité (une petite quantité de couleur dans une grande quantité d'une autre couleur), le contraste simultané (au voisinage d'une tâche colorée, le gris a tendance à être perçue comme la couleur complémentaire) et le contraste chaud-froid (couleur chaude associée à une couleur froide).

Dans le cadre du *Jardin des Hasards*, nous avons déjà évoqué (supra VI.2.3.3) le rôle du contraste dans la perception plus ou moins fiable des différentes variables météorologiques. Lorsque les valeurs de certaines variables sont comprises dans certains intervalles, la perception d'autres variables peut en être affectée. Concernant la température et la pluie par exemple, nous avons vu que des températures basses entraînent un contraste moindre qui conduit à sous-estimer la pluviométrie (voir figure VII.6), tandis que des précipitations importantes peuvent entraîner une surestimation de la température, du fait de l'introduction d'un contraste coloré chaud-froid. Les expériences conduites (voir chapitre VI) couplées à la connaissance des effets des différents contrastes doivent permettre une conception d'interfaces plus efficaces.

figure VII.6 – Exemple de contraste coloré : les points symbolisant la pluie sont moins contrastés lorsque la température est basse (image de gauche, couleurs désaturées) que lorsque la température est élevée (image de droite, couleurs saturées).

Dans le même temps, il faut noter que le *Jardin des Hasards* est également construit sur la base de contrastes de formes, conduisant par exemple à opposer feuilles et herbivores d'une part, herbivores et carnivores d'autre part (voir figure VII.5).

Qu'il s'agisse de principes d'organisation perceptive ou de contrastes picturaux, nous retiendrons, de ces études, les pistes qu'elles nous indiquent quant aux moyens de mettre en relation à distance des éléments picturaux, que ce soit pour les associer ou au contraire les opposer.

VII.2.3. …SUR PLAN

« Nous considérons comme plan originel la surface matérielle appelée à porter le contenu de l'œuvre » [Kandinsky 1991]. Autrement dit, le plan constitue le cadre du système pictural dans lequel les différents éléments expriment leurs relations. Par ailleurs, c'est par rapport à ce cadre que certains éléments acquièrent certaines de leurs caractéristiques : un point n'exprime pas les mêmes tensions suivant qu'il se situe au centre du cadre ou bien dans un coin de la toile.

VII.2.3.1. Des agents qui s'organisent

A partir du moment où des agents sont capables de contrôler les comportements qu'ils activent à un moment donné, et qu'ils ont par ailleurs la possibilité de communiquer les uns avec les autres, rien n'empêche qu'ils s'organisent dynamiquement. Lorsqu'une tâche nécessite la coopération de plusieurs agents, ceux-ci peuvent ainsi provisoirement constituer des groupes, qui pourront être dissous une fois la tâche effectuée. Ces comportements de formation et de dissolution de groupe sont associés, dans la méthode *Cassiopée*, à des *rôles organisationnels*, parmi lesquels il faut distinguer les rôles d'*initiateur* et de *participant* [Collinot et Drogoul 1996].

Avoir un rôle d'initiateur, pour un agent, c'est décider de la formation d'un nouveau groupe, recruter les agents nécessaires à la constitution du groupe, et finalement dissoudre le groupe lorsqu'il n'a plus de raison d'être. Symétriquement, avoir un rôle de participant, c'est interrompre ses activités courantes en réponse à la sollicitation d'un agent initiateur, pour s'engager dans la constitution d'un groupe. Plus précisément, la procédure permettant la constitution d'un groupe est la suivante : l'agent initiateur met en œuvre un *comportement de formation de groupe* par lequel il demande l'aide d'agents participants. Il signifie à ces derniers la constitution d'un groupe par l'utilisation de *signes d'engagement*, auxquels les agents participants répondent par la mise en œuvre de *comportements d'engagement*. Enfin, lorsque l'agent initiateur est satisfait, et que le groupe n'a plus d'utilité, celui-ci met en œuvre un *comportement de dissolution*, indiquant aux participants la fin du groupe grâce à des *signes de dissolution*.

Au niveau local, on peut considérer la constitution de ces groupes sous le même angle que les rôles relationnels examinés précédemment. De ce point de vue, un groupe est donc la mise en relation d'un ensemble d'agents, doublée d'une opposition entre agent initiateur et agents participants. Si l'on adopte par ailleurs un point de vue plus global, la constitution de ces groupes peut correspondre à une réorganisation dynamique de l'ensemble du système, donc à une modification de sa structure. La représentation visuelle de cette dynamique devra intégrer son aspect structurel global, en le transcrivant sous la forme d'une hiérarchie visuelle.

VII.2.3.2. Une hiérarchie perceptive

Les différents éléments qui composent une image n'ont pas tous la même importance du point de vue perceptif. Ils sont perçus de manière plus ou moins rapide, attirent plus ou moins le regard [Solso 1997], se répartissant ainsi selon une hiérarchie perceptive. La position d'un élément particulier au sein de cette hiérarchie dépend d'une part des caractéristiques picturales de cet élément, évaluées par référence aux autres éléments, et d'autre part de la position de l'élément par rapport à la structure globale de l'image.

Du point de vue des caractéristiques picturales, la taille relative d'un élément par rapport aux autres éléments détermine fortement son importance au sein de l'image globale. Une forme a d'autant plus de chance d'être visuellement « prégnante » que sa taille est grande. De manière plus générale, un élément qui contraste fortement avec le reste de l'image, de par sa forme, sa couleur, son mouvement, etc. sera perçu plus facilement et prendra donc un poids plus grand dans la représentation. La position de l'élément dans l'image joue par ailleurs un rôle très important. Un élément pictural a ainsi plus de poids s'il se trouve en haut plutôt qu'en bas de l'image et à gauche plutôt qu'à droite (essentiellement pour des raisons culturelles, liées au sens de lecture de haut en bas et de gauche à droite). De même, le centre de l'image est plus important que le pourtour, pour les raisons déjà évoquées liées aux différences entre perception focalisée et perception périphérique. Enfin, la diagonale montante (coins inférieur gauche - supérieur droit) a, par rapport à la diagonale descendante (coins supérieur gauche - inférieur droit), une connotation plus optimiste, plus volontaire, tournée vers l'avenir, toujours pour des raisons culturelles (lecture de gauche à droite). Cela s'est traduit, dans l'histoire de la peinture, par l'utilisation de structures géométriques spécifiques pour la construction des œuvres (voir figure VII.7).

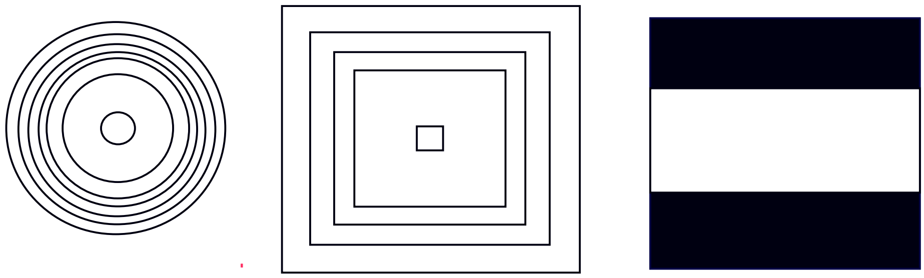


figure VII.7 – Différentes structures géométriques utilisées pour la construction d'œuvres picturales (d'après [Gortais 1998 comm. pers.]).

De ce point de vue, l'image du *Jardin des Hasards* n'est pas composée selon une hiérarchisation globale, puisque l'espace dans lequel se déplacent les formes est isotrope. Aucune position n'est donc privilégiée par rapport à une autre. En revanche, la hiérarchisation est introduite de manière locale du fait des tailles de formes différentes et des contrastes entre formes (voir figure VII.5).

VII.3. UN EXEMPLE : DES PROIES ET DES PREDATEURS

Nous allons maintenant reprendre ces différents éléments de conception dans le contexte d'un exemple, volontairement très simple, qui nous permettra de décomposer la conception d'une interface. Autour de l'exemple des proies et des prédateurs, déjà abordé dans le cadre du *Jardin des Hasards*, et très classique dans le domaine des systèmes multi-agents, nous examinerons la conception de deux interfaces différentes, la première plutôt « naturelle », la seconde introduisant une hiérarchisation de l'image pour refléter la hiérarchisation du système.

VII.3.1. PRESENTATION DE L'EXEMPLE

Nous avons décrit au paragraphe V.4 le *Jardin des Hasards* comme la simulation d'un écosystème, habité notamment de proies et de prédateurs. Si la conception des comportements des agents de ce système répondait d'abord à des critères esthétiques, nous nous sommes également attachés à conserver la plus grande vraisemblance biologique possible. Le système que nous allons maintenant présenter reprend en grande partie les comportements qui avaient alors été définis, et nous les avons adaptés afin d'en rendre l'analyse plus intéressante.

VII.3.1.1. Un écosystème virtuel

En premier lieu, le niveau « producteur » de l'écosystème, correspondant dans le *Jardin des Hasards* à une population d'agents feuilles, a été remplacé par une prairie simulée, constituée d'un quadrillage régulier de parcelles herbeuses. Ces parcelles sont caractérisées par la quantité d'herbe qu'elles contiennent, et par leur taux de régénération, c'est-à-dire la vitesse à laquelle l'herbe repousse. Pour simplifier, ce taux est fixe et ne dépend plus de la météorologie, qui n'interviendra donc pas ici. Le niveau producteur permet à deux populations de consommateurs de se développer, respectivement herbivores et carnivores, et qui constituent ensemble un système de proies et de prédateurs. Le comportement de chaque type de population est donné à la figure VII.8.

Par rapport à l'écosystème du *Jardin des Hasards*, les prédateurs doivent ici coopérer pour attraper une proie, ce qui se traduit par l'émission d'un signal de recrutement lorsque l'un des prédateurs voit une proie. En réponse à ce signal, les autres prédateurs se dirigent alors en direction de celui qui émet le signal, jusqu'à ce qu'ils puissent à leur tour apercevoir la proie. Ce comportement a été ajouté afin de faire intervenir dans le système une dynamique de constitution et de dissolution de groupes, ce qui nous permettra de dérouler jusqu'au bout le fil de la méthode *Cassiopée*.

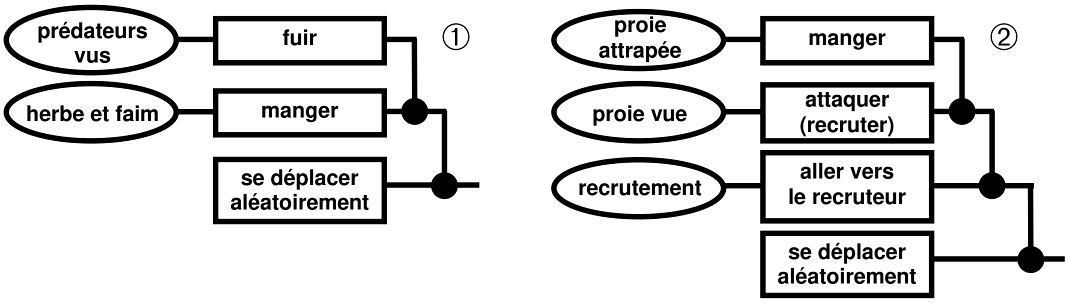


figure VII.8 – Comportements respectifs des proies herbivores (①) et des prédateurs carnivores (②).

VII.3.1.2. Un système de représentation en miroir

Bien que le système à représenter soit, dans ce cas, interne à la plate-forme et qu'il soit donc susceptible d'être représenté directement en donnant une forme particulière aux agents-proies et aux agents-prédateurs, nous l'avons implanté en dissociant le système de simulation d'un écosystème de proies et de prédateurs, du système chargé de le représenter. L'intérêt d'une telle approche est double : elle permet d'une part, comme pour l'exemple de représentation d'un fichier MIDI (supra IV.4), de se placer dans les conditions de représentation d'un système complexe réel ; elle permet d'autre part, comme nous le verrons par la suite, de se démarquer d'une correspondance stricte entre agents et formes colorées.

Pour ce faire, la démarche suivie consiste à dupliquer proies et prédateurs. Les agents appartenant au système de simulation rendent public leur numéro d'identification, par l'intermédiaire d'un canal de communication (voir figure VII.9). Connaissant ces numéros, les agents du système de représentation peuvent alors espionner les premiers, et ainsi connaître à chaque instant leur position, leur énergie, le comportement activé, etc. Ils peuvent donc adapter dynamiquement leur affichage en fonction de l'évolution du système de simulation.

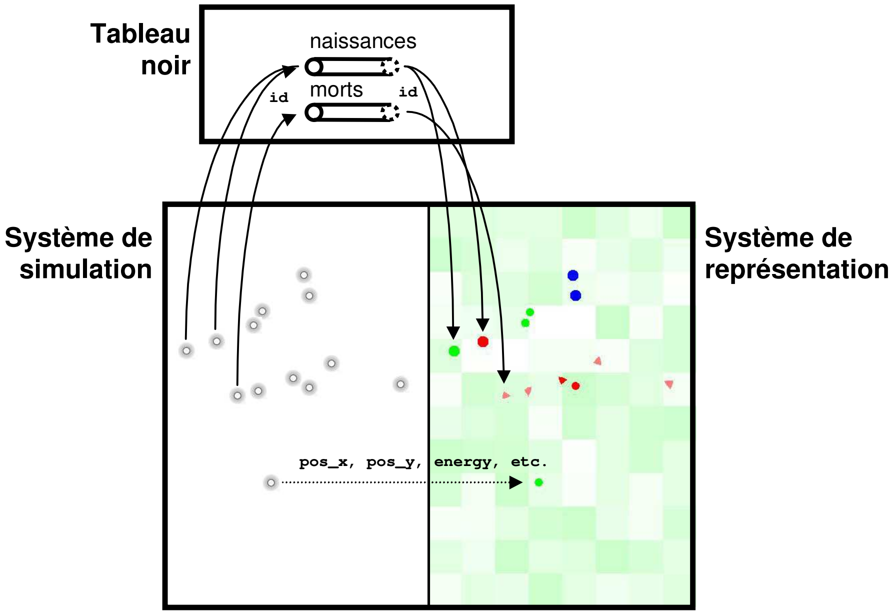


figure VII.9 – Les agents de simulation rendent leur numéro d'identification public, signalant leur naissance et leur mort par deux canaux de communication dédiés. Grâce à ces numéros, les agents chargés de construire la représentation peuvent espionner les agents de simulation, pour connaître leur position, leur quantité d'énergie, etc.

Ce système de représentation en miroir permet naturellement de construire des représentations dans lesquelles une forme colorée est associée à chaque agent de simulation (figure VII.9), mais nous verrons qu'il permet également d'explorer des modes de représentation dans lesquels la position de l'agent-miroir est dissociée de la position de l'agent représenté dans son environnement simulé.

VII.3.2. REPRESENTATION NATURELLE

Dans ce premier exemple de représentation, nous conserverons la correspondance entre un agent et une forme colorée d'une part, et la correspondance entre la position d'un agent et la position de sa forme d'autre part. La représentation ainsi construite restera proche de l'image que l'on pourrait obtenir naturellement en prenant une photo aérienne d'un tel système ; c'est en ce sens que nous pourrons parler de représentation « naturelle ». Ceci est un choix et nous verrons à la section VII.3.3 que d'autres sont possibles.

VII.3.2.1. Des agents proies et des agents prédateurs

Nous prendrons, comme point de départ, une représentation dans laquelle tous les agents proies et prédateurs sont affichés sous la forme d'un rond noir dont la taille est fixe et dont la position correspond à la position de l'agent dans son environnement. Les parcelles d'herbe sont quant à elles affichées comme des carrés blancs recouvrant la surface de la parcelle, formant ainsi un fond uniformément blanc. Seul le mouvement d'un agent peut renseigner quant à sa nature, proie ou prédateur, et son activité du moment. Nous allons maintenant complexifier progressivement la représentation de manière à caractériser de plus en plus finement, par des moyens visuels, les différents agents du système.

En premier lieu, on peut considérer que proies, prédateurs et herbage correspondent à trois « fonctions » distinctes, même s'il peut être délicat de parler de fonction à propos d'organismes naturels. Les parcelles d'herbe auraient ainsi une fonction de producteurs de nourriture, tandis que proies et prédateurs auraient des fonctions de consommateurs de premier et de deuxième niveau. On peut donc établir une première distinction visuelle, en associant chaque type d'agent à une forme distincte. Par exemple, on peut attribuer aux prédateurs une forme anguleuse, plus « agressive » que la forme ronde des proies (voir figure VII.10).

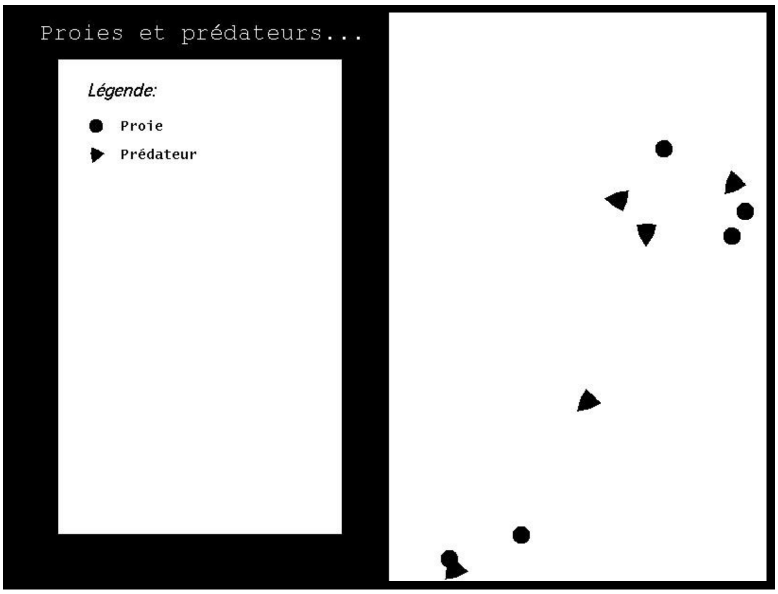


figure VII.10 – Distinction des agents suivant leur « fonction ».

Chacun des agents est par ailleurs caractérisé par des ressources et des comportements mis en œuvre dans l'accomplissement de leur fonction. En ce qui concerne les ressources, il s'agit uniquement d'un paramètre d'énergie qui caractérise l'état de forme d'un agent proie ou prédateur, ou la quantité d'herbe présente dans une parcelle. De même que pour le *Jardin des Hasards*, ce paramètre peut s'exprimer de manière naturelle en établissant un lien direct entre la taille d'un agent et sa quantité d'énergie. Plus la forme de l'agent est grande, plus l'agent dispose d'énergie et réciproquement (figure VII.11). Dans le cas des parcelles, il est préférable de modifier la couleur des agents représentant les parcelles plutôt que leur taille, car dans ce cas précis, la forme et la taille de l'agent correspondent précisément à l'extension spatiale de la parcelle. L'échelle de couleur choisie fait passer la parcelle du blanc lorsqu'il n'y a pas d'herbe, au vert lorsque l'herbe est abondante.

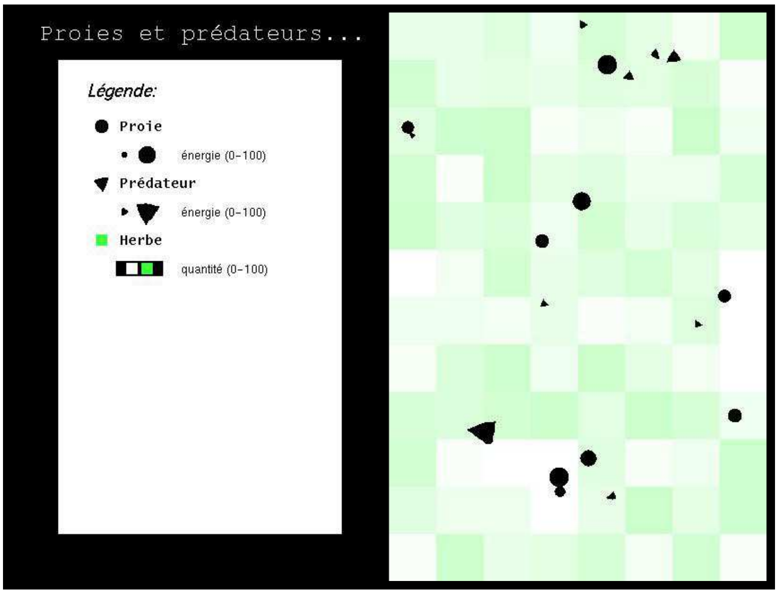


figure VII.11 – Lien entre la taille d'un agent et sa quantité d'énergie.

Concernant enfin l'activité des agents, nous considérerons chacune des actions que l'agent peut effectuer en réponse à ce qu'il perçoit comme un comportement différent (voir l'architecture de décision de la figure VII.8). On voit qu'il y a, pour les proies et les prédateurs réunis, sept comportements différents. On peut considérer par ailleurs que les comportements correspondant, pour les proies et les prédateurs, à l'action de manger, sont fonctionnellement identiques (ils remplissent la même fonction), bien que réalisés différemment. De même, le déplacement aléatoire des uns et des autres correspond à la même fonction. Par ailleurs, on peut considérer que les comportements des prédateurs consistant à attaquer et recruter d'une part, à répondre à un appel de recrutement d'autre part, correspondent au même rôle qui est de chasser une proie. Nous distinguerons finalement un total de quatre rôles différents. Pour traduire cette distinction sous forme visuelle, l'utilisation de couleurs semble bien indiquée dans la mesure où elle permet un grand nombre de choix différents (figure VII.12).

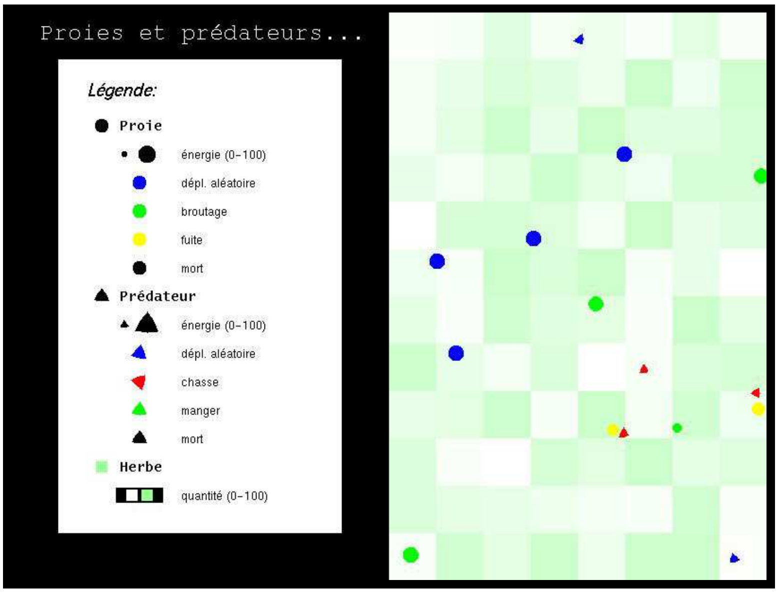


figure VII.12 – Visualisation du comportement activé par l'association de couleurs différentes aux différents comportements.

VII.3.2.2. Des prédateurs qui chassent des proies

Du point de vue des interactions, la relation entre proies et prédateurs est manifeste puisque le comportement des prédateurs est conditionné par la perception de proies, qui elles-mêmes adaptent leur comportement en fonction de la perception de prédateurs (voir figure VII.8). En l'occurrence, cette interaction est déjà figurée visuellement au niveau de chaque agent puisqu'elle est associée à des changements de comportements, qui sont eux-mêmes visualisés par des changements de couleur. En revanche, il n'y pas de visualisation de l'interaction elle-même dans la mesure où ces changements de comportements ne sont pas reliés entre eux, autrement que par la simultanéité de leur occurrence.

Du point de vue de la méthode *Cassiopée*, on peut considérer qu'il y a une dépendance entre le rôle de fuite des agents proies et le rôle d'attaque des agents prédateurs. C'est le signal de présence propagé par chaque prédateur qui constitue dans ce cas le signe d'influence conduisant les proies à adopter un rôle de fuite. On voit bien que dans cette dépendance entre rôles, il y a une mise en relation de deux agents, qui partagent donc momentanément quelque chose de commun. Cela ne les rend pas identiques puisque, dans le même temps, ils s'opposent du fait de l'asymétrie de la relation entre agent influent et agent influencé. Un prédateur établit une relation avec la proie qu'il poursuit, sans que pour autant la distinction proie-prédateur disparaisse. Bien au contraire, c'est cette relation qui les définit, l'un en tant que prédateur, l'autre en tant que proie.

La représentation que l'on donnera de cette interaction doit donc prendre en compte ce double aspect de relation et d'opposition, de similitude et de contraste. Ce contraste, en l'occurrence, est déjà présent dans la représentation puisqu'une telle interaction ne peut se produire qu'entre un ou plusieurs prédateurs d'une part, et une ou plusieurs proies d'autre part. D'aspects respectivement triangulaires et ronds, proies et prédateurs présentent entre eux un contraste de forme. Il ne reste donc plus qu'à les mettre en relation, ce qui peut être réalisé en leur affectant la même couleur, c'est-à-dire en associant la même couleur au comportement de fuite d'une proie et au comportement d'attaque d'un prédateur (voir figure VII.13). De même, des couleurs similaires sont associées à l'herbe et au comportement de nourriture des proies d'une part, aux proies mortes et au comportement de nourriture des prédateurs d'autre part.

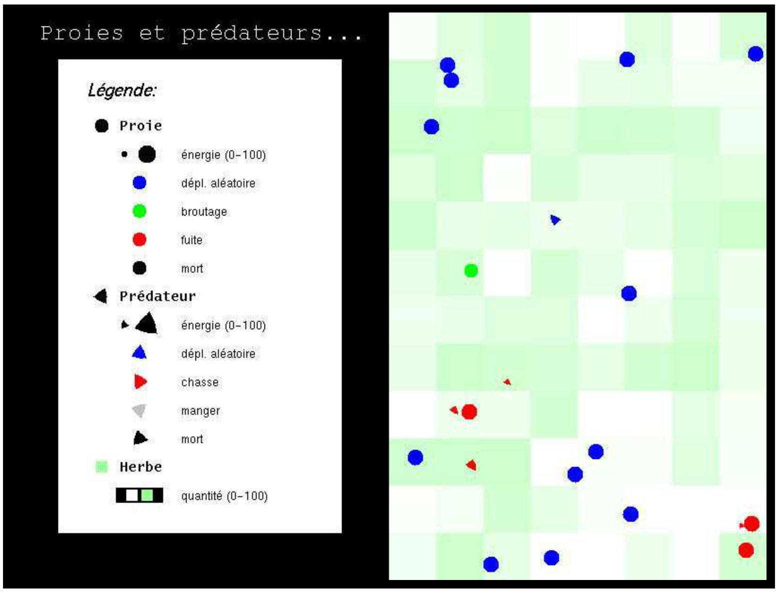


figure VII.13 – Visualisation des interactions entre proies et prédateurs.

VII.3.2.3. Des prédateurs en groupes

Nous avons mentionné la nécessité, pour les prédateurs, de coopérer afin de pouvoir attraper des proies, un prédateur seul ne pouvant y arriver. L'attaque d'une proie s'accompagne donc du recrutement d'autres prédateurs de manière à constituer un groupe de chasse. Nous avons jusqu'à présent considéré les différents agents d'un même groupe de manière homogène, sans distinction entre agent recruteur et agents recrutés (ou initiateur et participants). Cette distinction doit maintenant être faite pour visualiser la dynamique organisationnelle du système. Dans une démarche analogue à celle qui nous avait guidés pour la visualisation des interactions entre proies et prédateurs, il s'agit de mettre en relation les agents d'un groupe tout en introduisant un contraste entre agent recruteur et agents recrutés. Dans le cas de l'interaction proie-prédateur, il fallait mettre en relation des agents qui étaient « naturellement » en opposition. Dans le cas présent, il faut introduire un contraste entre des agents « naturellement » similaires. Ce contraste doit cependant demeurer moins important entre agent recruteur et agents recrutés qu'entre agents du groupe et agents extérieurs au groupe. Pour ce faire, la seule modification introduite a consisté à diminuer la saturation de la couleur des agents recrutés (voir figure VII.14).

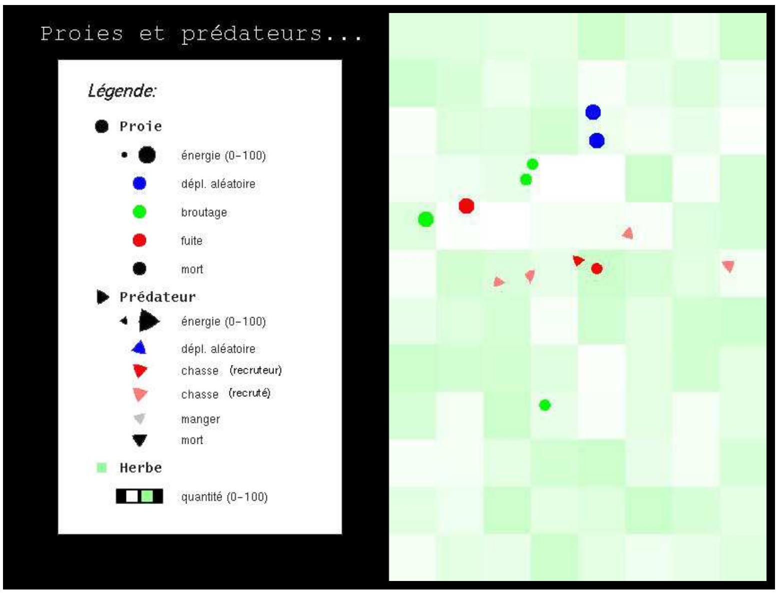


figure VII.14 – Visualisation de la constitution de groupes d'agents prédateurs.

VII.3.3. REPRESENTATION HIERARCHISEE

En adoptant une approche plus globale, on peut concevoir des modes de représentation complètement différents, abandonnant la correspondance entre la position d'un agent dans son environnement et la position à l'écran de la forme associée. Ce faisant, l'objectif est de réfléchir aux moyens permettant de mieux faire ressortir la structure du système.

VII.3.3.1. Hiérarchie de comportements

Les différentes actions que proies et prédateurs sont susceptibles d'effectuer sont organisées suivant une hiérarchie de priorités (voir figure VII.8), une action n'étant choisie que si les actions de priorité supérieure ne peuvent être réalisées. Une première hiérarchisation possible consiste donc à organiser les agents dans l'écran en fonction de la priorité attachée aux actions qu'ils effectuent. Dans la figure VII.15, la partie droite de l'image correspond à la représentation proposée au paragraphe VII.3.2.3. La partie gauche correspond quant à elle à une première tentative de hiérarchisation en fonction du comportement activé. Plus le comportement activé est important, plus la position de l'agent est haute dans l'image. La position horizontale correspond à peu près à celle des agents proies et prédateurs dans l'environnement simulé, ce qui permet de conserver les relations entre agents qui se poursuivent ou qui se mangent.

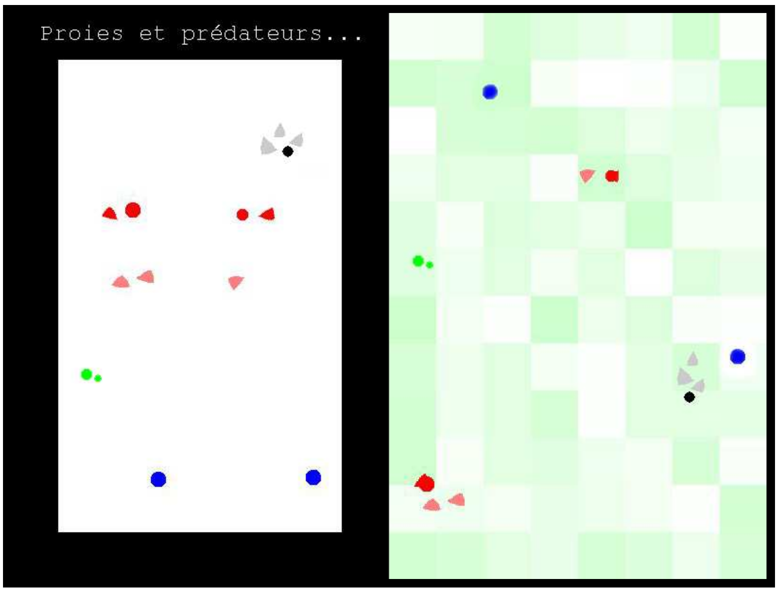


figure VII.15 – Hiérarchie de comportement : les agents accomplissant les actions les plus prioritaires se retrouvent dans le haut de l'image de gauche.

La figure VII.16 reprend ce même principe, en adoptant cette fois-ci une hiérarchie centrale, les agents effectuant les actions associées aux priorités les plus élevées se retrouvant vers le centre de l'image, et avec une taille plus importante. Pour construire cette représentation, les agents sont tous attirés vers le centre du rectangle blanc, d'autant plus fortement que la priorité de l'action qu'ils effectuent est importante. Dans le même temps, les différents agents se repoussent de manière à éviter les recouvrements. A chaque instant, les agents qui se trouvent au centre de la représentation sont donc ceux qui effectuent les tâches les plus prioritaires.

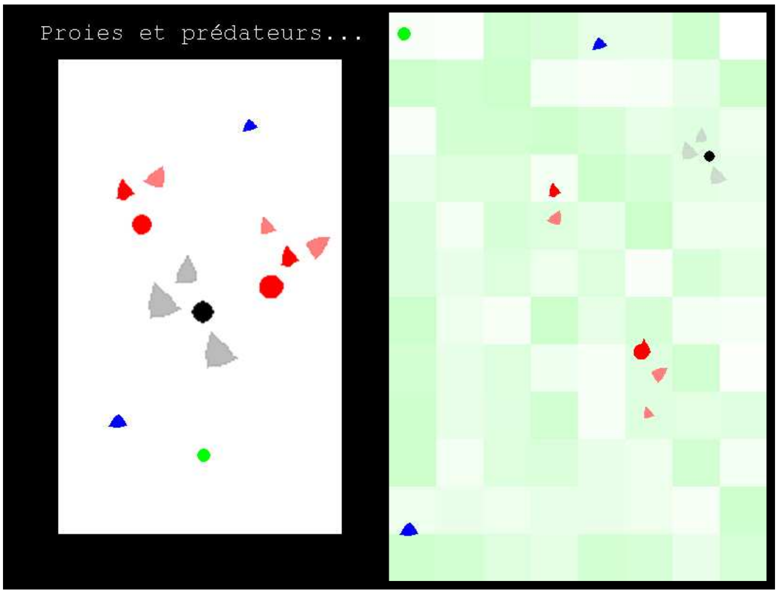


figure VII.16 - Hiérarchie de comportement : les agents accomplissant les actions les plus prioritaires se retrouvent au centre de l'image de gauche et sont affichés avec une plus grande taille.

VII.3.3.2. Hiérarchie de groupes

Dans la représentation précédente, les relations de chasse (un prédateur qui chasse une proie), d'alimentation (un prédateur qui mange une proie) et de recrutement (un prédateur qui recrute un autre) sont conservées. On peut imaginer de passer à un niveau d'abstraction supérieur en identifiant ces groupes et en les associant à une représentation commune, c'est-à-dire à un agent-miroir unique.

C'est ce que propose la représentation de la figure VII.17, où les groupes d'agents apparaissent comme des rectangles, plus ou moins gros suivant la taille du groupe, plus ou moins centraux suivant la priorité associée aux actions des agents du groupe,

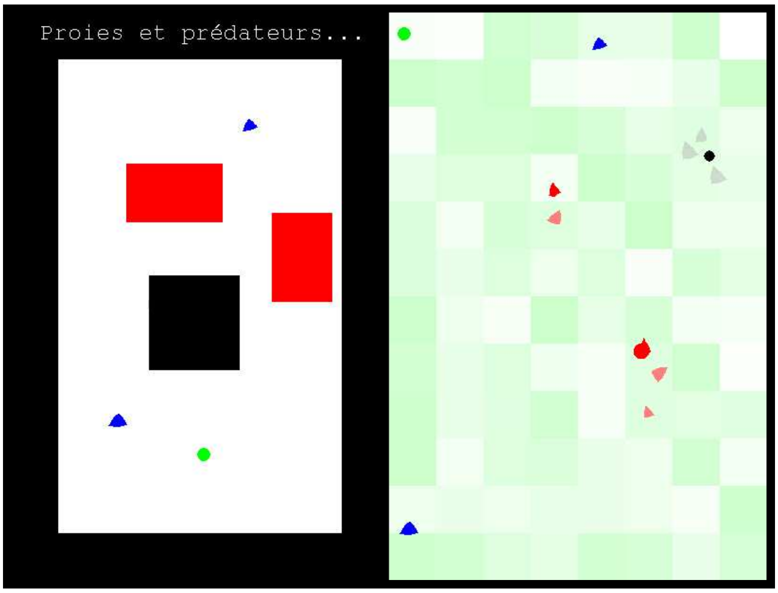


figure VII.17 – Hiérarchie de groupes : des carrés synthétisent la présence d'un groupe prédateur/proie ou recruteur/recruté.

et dont la couleur signale le type de relation mis en place entre les agents. En fonction des actions effectuées, des agents peuvent être incorporés de manière dynamique à un groupe existant ou constituer un nouveau groupe ; ils peuvent également s'extraire d'un groupe existant, ce dernier pouvant être dissout lorsque les agents qui le constituaient cessent d'être en relation les uns avec les autres.

VII.4. DISCUSSION

Nous venons de présenter les bases d'une approche visant à aborder méthodiquement le problème de la représentation visuelle, en temps réel, de systèmes multi-agents, et de systèmes complexes de manière plus générale. Par ailleurs, cette étude est amenée à constituer le fondement du projet des *Jardins de Données*, pour la construction de représentations hiérarchiques.

VII.4.1. ENSEIGNEMENTS

Dans ce travail, nous nous démarquons des représentations sous forme de graphes, pour essayer de tirer parti des propriétés des mécanismes perceptifs humains de bas niveau, ce qui devrait permettre, à terme, de proposer des représentations plus intuitives et plus naturelles de ces systèmes. Dans le cadre de ce chapitre, nous avons illustré notre démarche par un exemple de système dont le fonctionnement était connu, ce qui nous a permis d'y appliquer la méthode d'analyse *Cassiopée* pour la construction d'une représentation efficace. Nous avons montré, dans le même temps, que cette connaissance a priori n'était pas indispensable, une représentation pouvant s'appuyer directement sur les ressources, comportements et perceptions des agents, indépendamment de la fonction assumée par l'agent au sein du système. Dans ce dernier cas, la représentation doit permettre l'analyse visuelle du rôle joué par un agent par rapport au autres agents et par rapport au système dans son ensemble.

L'intérêt suscité par cette démarche auprès de l'équipe de développement de *Swarm* [Burkhart 1994 ; Minar et al. 1996], plate-forme utilisée par une large communauté de chercheurs dans de nombreuses disciplines, nous semble constituer un bon indicateur de son utilité pratique. Constatant le manque de moyens d'analyse visuelle qualitative de Swarm, l'objectif [Ropella comm. pers.], à terme, est d'adapter les méthodes de représentation de notre plate-forme à la plate-forme *Swarm*.

Mais si les aspects techniques sont bien maîtrisés, l'approche soulève cependant un certain nombre de questions du point de vue de la construction de représentations particulières. Nous avons mentionné, à plusieurs reprises, la variabilité du processus perceptif, d'une culture à l'autre, d'une personne à l'autre au sein d'une culture, d'un moment à un autre pour une personne donnée, en fonction de ses émotions, de sa motivation, de ses besoins, etc. De par la grande souplesse des solutions d'affichage qu'elle propose, la plate-forme multi-agent permet la construction rapide de représentations adaptées à chaque cas particulier. Par ailleurs, du fait de l'interaction directe que l'on peut mettre en place entre un utilisateur et la représentation proposée, il est possible de faire évoluer cette dernière dynamiquement en fonction de l'intérêt qu'elle suscite, ou encore d'adapter le point de vue de représentation choisi en fonction de la situation courante. Nous n'avons pas abordé cet aspect interactif dans ce chapitre, mais il est clair qu'il constitue une composante fondamentale du processus de construction d'une interface.

Un deuxième problème de l'approche provient du fait que les différentes stratégies de représentation, liées à l'affichage des ressources internes d'un agent, de ses comportements et rôles, ou encore de ses perceptions, ne sont pas indépendantes, puisqu'elles reposent tous sur la manipulation d'un nombre limité de caractéristiques graphiques, forme, taille, couleur, mouvement. Par ailleurs, nous avons rappelé que les notions de taille ou de couleur par exemple sont des notions relatives, ce qui rend les comportements d'affichage des différents agents dépendants les uns des autres. Ces contraintes peuvent rapidement rendre la conception de représentations très complexe, à mesure que le système considéré devient lui-même plus complexe. De ce fait, il nous semble important, à terme, de pouvoir doter les agents, non plus de comportements d'affichage définis par le concepteur, mais de stratégies d'affichage permettant à un agent d'adapter son affichage en fonction de celui des autres agents présents, et en fonction de la situation courante.

VII.4.2. VERS LES *JARDINS DE DONNEES* : AFFICHAGE HIERARCHISE

Nous avons vu également comment combiner différentes représentations d'un système correspondant à différents niveaux d'abstraction (supra VII.3.1.2). Il est bien entendu que les quelques exemples de représentations proposés dans ce chapitre ne constituent que des pistes à approfondir et à explorer, ce qui doit être fait dans le cadre du projet des *Jardins de Données* déjà évoqué au paragraphe VI.4.2 (voir figure VII.18). En complément d'une représentation ambiante et synthétique, l'objectif est de proposer à un opérateur, sur la base des mêmes outils et de la même plate-forme, des affichages adaptés à chaque type de tâche à accomplir. Pour être efficace, un opérateur doit en effet posséder une représentation mentale du système qu'il contrôle, organisée suivant une hiérarchie d'abstraction [Rasmussen 1986], depuis une vue d'ensemble très schématique jusqu'à une vue détaillée de chacun des composants du système. L'interface qu'il utilise doit donc refléter ce modèle pour lui permettre de percevoir le système et d'agir sur lui à ces différents niveaux. Dans ce but, les différents affichages proposés pourront être disponibles simultanément ou à la demande de l'opérateur, de manière à faire toujours correspondre le niveau d'abstraction de la représentation avec le niveau d'abstraction de la tâche à effectuer.

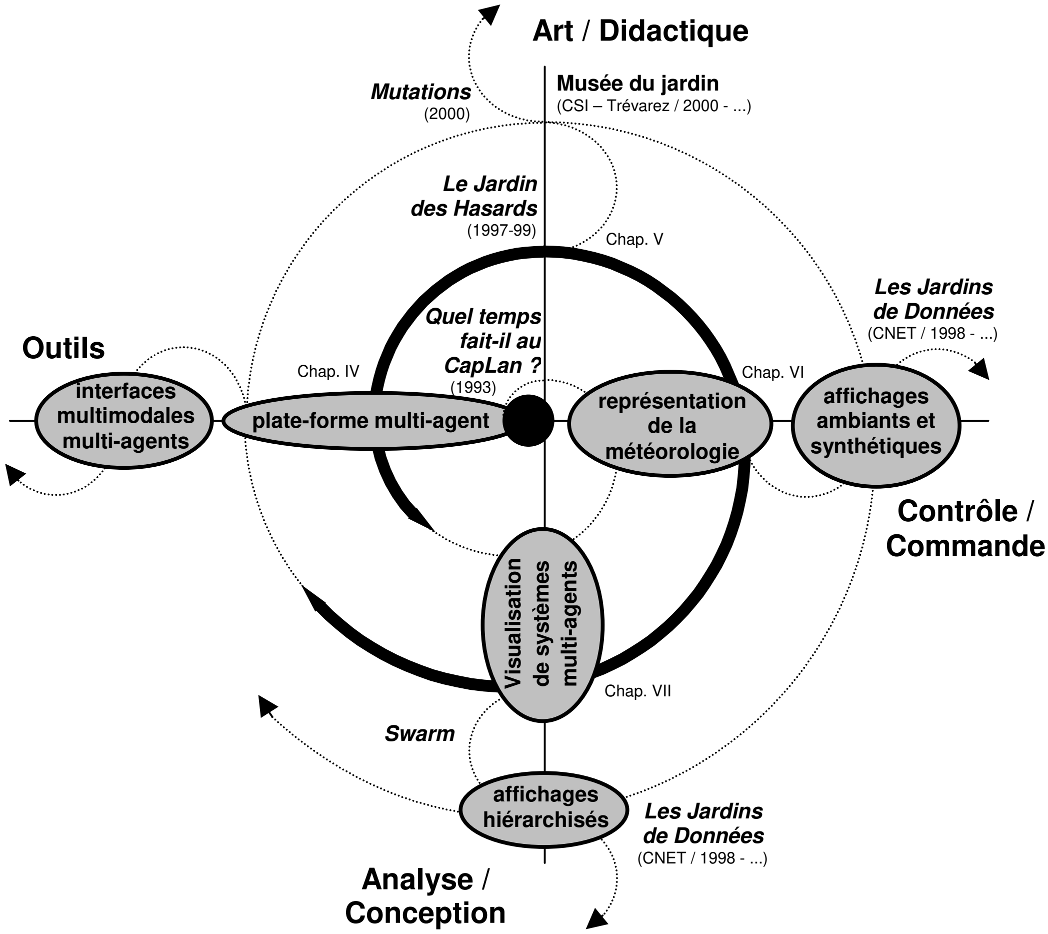


figure VII.18 - La question de la visualisation de systèmes multi-agents doit conduire à une collaboration avec l'équipe de *Swarm*. Associée à la question de contrôle de systèmes complexes, elle conduit à la question d'affichages hiérarchisés que nous aborderons dans le cadre des *Jardin de Données*.

De par ses qualités de modularité, ses capacités à mettre en œuvre une interaction avec l'utilisateur, et les possibilités qu'elle offre pour la construction de représentations synthétiques et ambiantes, et/ou « analytiques » et hiérarchisées, la plate-forme développée dans le cadre de cette thèse nous semble constituer une bonne base technique pour la conception d'interfaces pour des systèmes complexes dans une perspective de contrôle ou d'analyse. En comparaison, les quelques éléments de réflexion présentés dans ce chapitre, et devant aider à la conception de représentations intéressantes de systèmes multi-agents, traduisent une connaissance encore empirique qu'il est nécessaire de valider et de compléter avec des systèmes et des problèmes réels. Dans le contexte des *Jardins de Données*, ces connaissances constitueront la base d'une méthodologie à développer, complément indispensable de l'outil technique lui-même.

CONCLUSION

Au moment de conclure, il faut revenir sur ce qui a été réalisé et sur ce qu'il reste à faire, ou ce que l'on va faire. Plutôt que de faire la liste, il nous semble plus intéressant de revenir sur la dynamique de recherche établie par la collaboration avec l'artiste B. Gortais. Cette dynamique nous paraît en effet constituer, en elle-même, une des originalités du travail présenté dans cette thèse.

Le Jardin des Hasards n'est ni un projet artistique, ni un projet informatique, et il est plus qu'un projet d'art informatique ou d'informatique artistique. Ou plutôt, il est tout cela en même temps. Il est surtout le lieu d'une double recherche, artistique d'une part, informatique d'autre part, où chacune a questionné l'autre, l'obligeant à se remettre en question, à expliciter ses hypothèses, à préciser les concepts manipulés, et en définitive à progresser. Cette progression s'est traduite par la définition d'une succession de projets, *Le Jardin des Hasards* (supra chapitre V) faisant suite à *Quel temps fait-il au CapLan ?* (supra V.1.3) et annonçant le projet *Mutations* (supra V.6.3). Chaque fois, les questions artistiques à l'origine d'un projet se renouvellent de par la confrontation avec les questions informatiques développées en parallèle. De même les problématiques informatiques s'enrichissent-elles des échanges avec l'art. De fait, cette thèse ne constitue pas un aboutissement, mais un maillon d'un processus plus général, amorcé avant elle et qui a d'ores et déjà trouvé un certain nombre de prolongements. Le mouvement en spirale qui caractérise cette progression se laisse difficilement appréhender par la linéarité imposée par le texte ; la figure 5 en propose une synthèse qui constitue l'aboutissement des figures partielles proposées tout au long de la thèse.

Puisque des projets d'art informatique constituent, dans notre démarche, le point de rencontre et de dialogue entre art et science, il va de soi que l'exposition de ces projets est le résultat le plus tangible du travail de recherche. De ce point de vue, *Le Jardin des Hasards* (voir chapitre V) peut être considéré comme une belle réussite, d'autant plus si l'on considère la difficulté inhérente à l'exposition de ce type d'œuvres, à forte composante technologique. De notre point de vue pourtant, l'objectif n'est pas de produire des œuvres, en se mettant au service d'un artiste, mais plutôt d'utiliser les questionnements de l'artiste pour progresser dans notre propre recherche informatique. L'art est pour nous un moyen, pas une fin en soi. Nous espérons avoir démontré, par cette thèse, qu'il s'agissait d'un bon moyen.

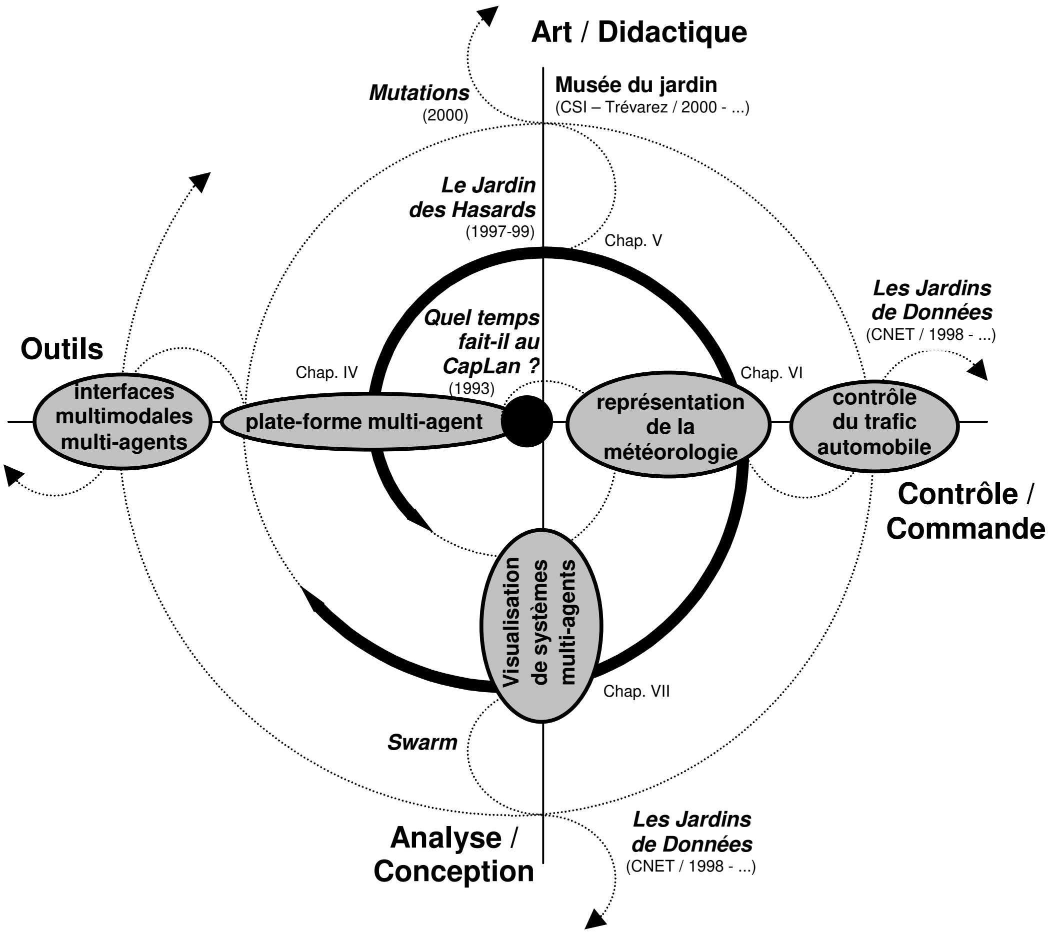


figure 5 - Processus de recherche en spirale.

Contrairement à certaines idées reçues, ce qui caractérise l'art n'est pas le flou, mais au contraire une exigence et une rigueur extrêmes. Il faut en effet de la précision pour maîtriser le flou, des règles pour maîtriser le hasard. Cette exigence conduit toujours à pousser le travail informatique à ses limites, l'obligeant à progresser. Elle transparaît dans la construction du *Jardin des Hasards*, suffisamment précise pour autoriser l'introduction du hasard, sans pour autant perdre tout contrôle sur l'œuvre et son évolution. Elle transparaît également dans la reconstruction d'une ambiance météorologique au sein du *Jardin des Hasards*, dont nous avons pu montrer les bonnes performances dans un contexte de contrôle de système (voir chapitre VI). Ce qui caractérise l'art, c'est également une démarche de recherche, qui alterne sans fin les questions et les réponses. De ce fait, c'est un outil de création, beaucoup plus qu'une œuvre particulière, qu'il s'agissait de développer. Le système résultant se trouve ainsi être d'une très grande généralité, de par sa conception modulaire et l'utilisation d'un langage de script. En témoignent les différents exemples présentés tout au long de ce document ; en témoigne également la réutilisation de la plate-forme dans le cadre de différents projets au sein du Laboratoire d'Informatique de Paris 6 ; en témoignent enfin les perspectives ouvertes pour la définition d'un nouveau projet artistique baptisé *Mutations* utilisant la même plate-forme (supra V.6.3).

> *"Or, with more fantasy, we can imagine a future of the visual arts populated with patronizing pieces of sculpture and caustic canvases that recognize the viewer to be male or female, rich or poor, bewildered or blasé, you or me. In this fiction, that artist runs a kernel for cuddly art forms that get to know their future owners, who in turn get to know and love them."*[36]
>
> *N. Negroponte [Negroponte 1979]*

Nous avons vu que la conception de la plate-forme rendait l'ajout de nouveaux modules particulièrement facile, en vue de prendre en compte d'autres types d'interaction (rythme cardiaque, mouvements oculaires, voix, etc.). Du point de vue artistique, cela permet d'envisager des modes d'interaction très riches avec le public, et cela constituera un élément essentiel du projet *Mutations*. Outre une composante musicale importante, qui n'existait pas dans le *Jardins des Hasards*, ce projet devrait permettre de développer les aspects interactifs avec le public, et explorer, ce qui s'annonce passionnant, l'adaptation de l'œuvre en fonction du goût et des réactions du public. Dans une démarche plus appliquée, cette modularité permet d'envisager la conception d'interfaces multi-agent (H. Lieberman, conférence invitée aux JFIADSMA'98 [Barthès et al. 1998]), ce qui nous semble constituer une piste potentiellement très intéressante à explorer.

Nous avons montré que la plate-forme fonctionnait comme un véritable système d'interface multimodal, pouvant manipuler différentes modalités d'interaction aussi bien en entrée (clavier, souris) qu'en sortie (image, son). Par ailleurs, nous avons montré, dans le cadre du *Jardin des hasards*, un exemple d'utilisation d'agents en tant que

[36] « Avec un peu plus d'imagination, on peut rêver à un futur des arts visuels peuplé de sculptures protectrices et de peintures caustiques qui perçoivent que le spectateur est mâle ou femelle, riche ou pauvre, troublé ou blasé, vous ou moi. Dans cette fiction, l'artiste utilise un générateur de formes d'art de compagnie qui apprennent à connaître leurs futurs propriétaires qui, en retour, apprennent à les connaître et à les aimer » (traduction personnelle).

composants d'interface, réagissant aux actions de l'utilisateur en plus de leurs comportements habituels. Des interfaces utilisateurs fondées sur la notion d'agent pourraient avoir, par rapport aux interfaces fondées sur la notion d'objet, la capacité d'adapter leur aspect ou leurs fonctionnalités suivant l'utilisateur, ses actions, le contexte courant, etc., en résumé de réagir dynamiquement au contexte dans lequel elles interviennent. Dans ce cadre, l'utilisateur est un système complexe presque comme les autres, auquel les agents doivent réagir pour adapter leur aspect, leur position, leur organisation, etc. Nous avons vu, avec le *Jardin des Hasards*, les applications possibles de ces caractéristiques d'un point de vue didactique, permettant à un utilisateur d'interagir directement avec les agents pour étudier leurs réactions. L'intérêt pédagogique de tels principes nous semble très important et nous souhaitons pouvoir continuer par la suite dans cette direction. La sélection de la plate-forme pour la réalisation de bornes interactives didactiques dans le cadre d'un musée ayant pour thème le jardin, et qui sera aménagé au château de Trévarez (Morbihan), doit nous offrir un terrain propice pour poursuivre cette recherche.

Enfin, si la plate-forme de conception de systèmes multi-agents, et le projet artistique du *Jardin des Hasards* qui s'appuie sur elle, constituent les résultats les plus tangibles de notre travail de recherche, un résultat tout aussi important nous semble être l'ouverture à laquelle le projet artistique a pu donner lieu, du fait de la très grande généralité des principes retenus pour sa conception. Le projet industriel des *Jardins de Données* [Renault 1998], travail initié conjointement avec le CNET, est ainsi directement dérivé des questionnements posés par le travail artistique. Alors que ce dernier s'intéresse à l'évolution d'un jardin virtuel sous l'influence de la météorologie réelle, le projet des *Jardins de Données* s'intéresse à l'utilisation des systèmes multi-agents pour hiérarchiser des flux d'information complexes, de manière à produire des représentations synthétiques, permettant à un opérateur d'avoir une perception d'ensemble des informations visualisées. Dans ce cadre, non seulement le *Jardin des Hasards* a constitué une source d'inspiration importante, mais il a également pu servir de prototype (voir chapitres VI et VII) en vue d'obtenir une première validation des idées proposées. Le projet des *Jardins de Données* a ainsi pris son autonomie par rapport à notre propre recherche en 1998, réutilisant aussi bien la plate-forme développée pour le projet artistique que les concepts sur lesquels il se fonde. Le processus qui a permis ce passage d'une collaboration art/informatique à la définition d'un projet industriel apparaît analogue à celui qui a permis, dans le domaine de la vie artificielle, le passage de la simulation d'animaux sociaux à la conception d'organisations artificielles [Drogoul 1993 ; Steels 1994] (voir figure 6). Il atteste d'une

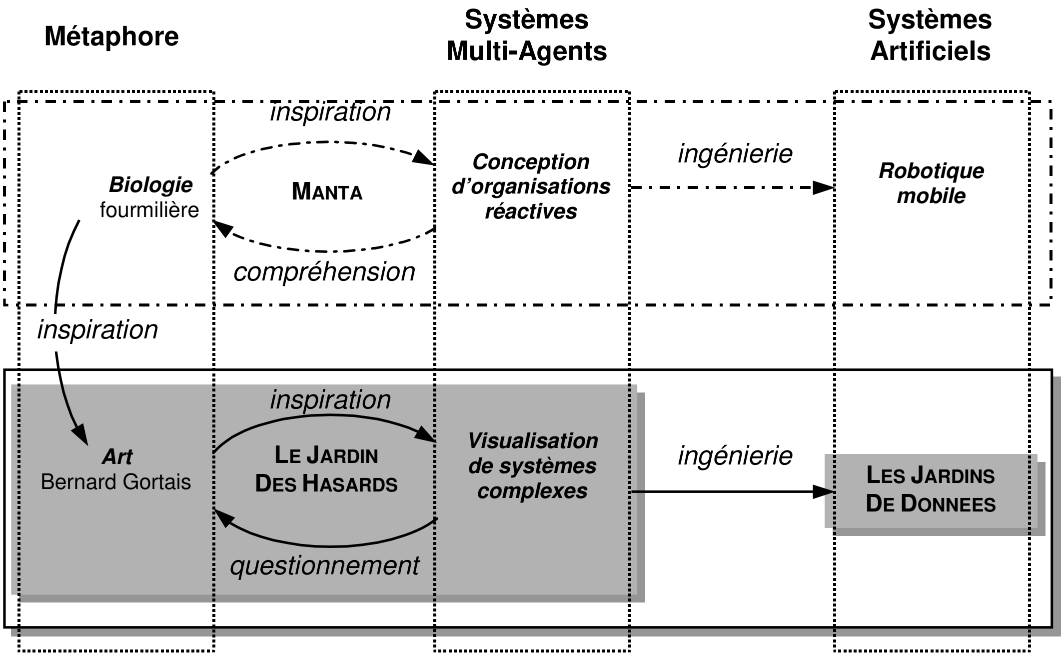


figure 6 - La progression, depuis le cycle d'enrichissements mutuels avec l'art jusqu'au développement d'applications concrètes (bas de la figure), a été très similaire à celle évoquée par A. Drogoul entre la biologie et la conception d'organisations réactives (haut de la figure) [Drogoul 1993].

part de la généricité des outils développés, d'autre part de la généralité des concepts en jeu, et reflète selon nous la maturité de cette recherche.

BIBLIOGRAPHIE

[Alberch 1998] ALBERCH P., « L'ingénieur, l'artiste et les monstres », in *La Recherche*, spécial L'origine des formes, n°305, janvier 1998.

[d'Arcy Thompson 1994] D'ARCY W. THOMPSON, *Forme et Croissance*, (éd. originale *On Growth and Form*, Cambridge University Press 1961), Ed. du Seuil, Paris, 1994.

[Arnheim 1976] ARNHEIM R., *La pensée visuelle*, Flammarion, Paris, 1976.

[Atlan 1979] ATLAN H., *Entre le cristal et la fumée – essai sur l'organisation du vivant*, Editions du Seuil, Paris, 1979.

[Atlan 1987] ATLAN H., "Self Creation of Meaning", in *Physica Scripta*, Vol. 36, pp. 563-576, 1987.

[Avenier 1990] AVENIER M.-J., « Apports d'un système interactif de représentations graphiques hiérarchisées, pour l'intelligence de phénomènes complexes », in *115ème Congrès National des Sociétés Savantes, L'image et la Science* (Avignon), pp. 285-302, 1990.

[Baals 1994] BAALS N. A., "Emergence, Hierarchies, and Hyperstructures", in *Artificial Life III*, Ed. C. Langton, Addison-Wesley, London, 1994.

[Barthès et al. 1998] BARTHES J.-P., CHEVRIER V. et BRASSAC C. éds., *Systèmes multi-agents, de l'interaction à la socialité, JFIADSMA'98*, Hermès, Paris, 1998.

[Batty 1987] BATTY M., *Micro-computer Graphics – Art, Design, and Creative Modeling*, Chapman and Hall Computing, 1987.

[Benthall 1972] BENTHALL J., *Science and Technology in Art Today*, Thames and Hudson, London, 1972.

[von Bertalanffy 1993] VON BERTALANFFY L., *Théorie générale des systèmes*, Dunod, Paris, 1993.

[Biles 1994] BILES J. A., "GenJam: A Genetic Algorithm for Generating Jazz Solos", in *Proceedings of ICMC*, pp. 131-137, 1994.

[Boden 1994] BODEN M. A., "Agents and Creativity", in *Communications of the ACM*, vol. 37, n° 7, pp. 117-121, July 1994.

[Boden 1996] BODEN M. A., *Dimensions of Creativity*, MIT Press, Cambridge, 1996.

[Bonabeau et Theraulaz 1996] BONABEAU G. et THERAULAZ E. éds., *L'intelligence Collective*, Hermès, Paris, 1996.

[Bonfand 1995] BONFAND A., *L'art abstrait*, Que sais-je ?, P.U.F, Paris, 1995.

[Bonnet et al. 1989] BONNET C., GHIGLIONE R., RICHARD J.-F., *Traité de psychologie cognitive 1 - perception, action, langage*, Dunod, Paris, 1989.

[Bousquet 1994] BOUSQUET F., *Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents, le cas de la pêche dans le delta central du Niger*, Thèse de l'université Claude Bernard – Lyon 1, 1994.

[Breton et al. 1999] BRETON L., ZUCKER J.-D. et CLEMENT E., « Une approche multi-agent pour la résolution d'équations en physique des milieux granulaires », in *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents'99*, Gleizes M.-P. et Marcenac P. éds., pp. 281-293, Hermès, Paris, 1999.

[Briot 1989] BRIOT J.-P., "Actalk: a Testbed for Classifying and Designing Actor Languages in the Smalltalk-80 Environment", in *Proceedings of ECOOP'89*, pp. 109-129, 1989.

[Brooks 1991] BROOKS R. A., "Intelligence Without Reason", in *Proceedings of IJCAI'91*, Sydney, Morgan-Kaufmann, pp. 569-595, 1991.

[Brooks 1999] Brooks R. A., *Cambrian Intelligence : The Early History of the New Ai*, MIT Press, Cambridge, 1999.

[Burkhart 1994] BURKHART R., "The Swarm Multi-Agent Simulation System", in *Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications*, *OOPSLA'94 Workshop on "The Object Engine"*, 1994.

[Canfield Smith 1977] CANFIELD SMITH D., *Pygmalion - A Computer Program to Model and Stimulate Creative Thought*, Birkhaüser Verlag, Basel, 1977.

[Canfield Smith et al. 1994] CANFIELD SMITH D., CYPHER A. et SPOHRER J., "KIDSIM: Programming Agents Without a Programming Language", in *Communications of the ACM*, Vol. 37, No. 7, pp. 55-67, July 1994.

[Card et al. 1983] CARD S. K., MORAN T. P. et NEWELL A., *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Associates, London, 1983.

[Cardon 1998] CARDON A., « La complexité des systèmes d'expression du sens », *Rapport Technique du LAFORIA*, n° 96/09, 1996.

[Cardon 1998a] CARDON A., « Les systèmes adaptatifs à architecture d'agents dynamiques : une approche de la conscience artificielle », *Rapport de Recherche du LIP6*, n°98/003, 1998.

[Cardon 1998b] CARDON A., « Modélisation de Systèmes Adaptatifs par Agents: vers une Analyse-conception Orientée Objet », *Rapport de Recherche du LIP6*, n°98/011, 1998.

[Cariani 1990] CARIANI P., "Emergence and Artificial Life", in *Artificial Life II*, C. Langton ed., Addison-Wesley, London, 1990.

[Cauquelin 1998] CAUQUELIN A., *Les théories de l'art*, Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 1998.

[Cayla 1995] CAYLA E., "TAPIS-BULLES1 - Prototype d'une approche multi-agents des formes et des couleurs", in *3èmes JFIADSMA* (Chambéry-St Badolph), pp. 375-386, 1995.

[Chacron 1980] CHACRON J., *Esthétique mathématique - Théorie de la peinture*, Editions Scientifiques de l'Art, Amiens, 1980.

[Chandler 1994] CHANDLER D., *Semiotics for Beginners*, document électronique, http://www.aber.ac.uk/~dgc/semiotic.html, visité le 20 juillet 1999.

[Chauvin 1982] CHAUVIN R., *Les sociétés animales*, P.U.F., Paris, 1982.

[Chernoff 1973] CHERNOFF H., "Using Faces to Represent Points in K-Dimension Space Graphically", in *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 68, N° 342, pp. 361-368, June 1973.

[Chi et al. 1998] CHI E. H., PITKOW J., MACKINLAY J., PIROLLI P., GOSSWEILER R. et CARD S. K., "Visualizing the Evolution of Web Ecologies", in *Proceedings of Computer Human Interaction'98* (Los Angeles), pp. 400-407, ACM Press, 1998.

[Clemens 1998] CLEMENS M., « Visualizing Complex Systems Science », poster presenté à *Managing the Complex, Annual Colloquium on Complex Systems and the Management of Organizations*, Toronto, Canada April 3-5, 1998, document électronique, http://www.idiagram.com/vcss/vcss.html, visité le 5 janvier 2000.

[Codognet 1995] CODOGNET P., « Programmation logique avec contraintes : une introduction », in *RAIRO Technique et Science Informatiques*, vol. 14, n° 6, 1995.

[Codognet 1996] CODOGNET P., "The Semiotics of the Web", présenté à *2nd International Conference on Semiotics*, Varna, Bulgaria, 1996.

[Codognet 1998] CODOGNET P., "Artificial Nature and Natural Artifice", présenté au workshop *Virtual Reality: Technological and Sociological Impact*, Hakone, Japan, 1998.

[Coekin 1968] COEKIN J. A., "A Versatile Presentation of Parameters for Rapid Recognition of Total State", International Symposium on Man-Machine Systems, in *IEEE Conference Record 69 C58-MMS*, 1968.

[Cohen 1979] COHEN H., "What is an Image", in *Proceedings of IJCAI'79*, Tokyo, Morgan-Kaufmann, pp. 1028-1057, 1979.

[Cohen 1988] COHEN H., "How to Draw Three People in a Botanical Garden", in *Proceedings of AAAI'88*, St. Paul, pp. 846-855, 1988.

[Cohen 1995] COHEN H., "The further exploits of AARON, Painter", document électronique, in *Stanford Electronic Humanities Review*, vol. 4, issue 2, visité le 15 septembre 1999.

[Collinot et al. 1995] COLLINOT A., CARLE P et ZEGHAL K., "Cassiopeia: A Method for Designing Computational Organizations", in *Proceedings of the First Workshop on Decentralized Intelligent Multi-Agent Systems*, DIMAS'95, PP. 124-131, 1995.

[Collinot et Drogoul 1996] COLLINOT A. et DROGOUL A., « La méthode de conception multi-agents *Cassiopée* : application à la robotique collective », *Rapport Technique du LAFORIA*, n°96/25, 1996.

[Collinot et al.1996a] COLLINOT A., DROGOUL A. et BENHAMOU P., "Agent Oriented Design of a Soccer Robot Team", in *Proceedings of International Conference on Multi-Agent Systems,* ICMAS'96, AAAI Press, 1996.

[Colonna 1994] COLONNA J.-F., “Scientific Display: A Means of Reconciling Artists and Scientists”, in *Frontiers of Scientific Visualization*, Pickover C. A. et Tewksbury S. K. eds., John Wiley & Sons, New York, 1994.

[Corbara et al. 1986] CORBARA B., FRESNEAU D., LACHAUD J.-P., LECLERC Y. et GOODALL G., "An Automated Photographic Technique for Behavioural Investigations of Social Insects", in *Behavioural Processes*, vol. 13, pp. 237-249, 1986.

[Cosshall 1995] COSSHALL W. J., “Mathematically Generated Images: Art or Science”, in *Complexity International*, (1995) 2, http://www.csu.edu.au/ci/vol2/wjc3/wjc3.html, visité le 15 septembre 1999.

[Courdier et al. 1998] COURDIER R., MARCENAC P., GIROUX S., « Un processus de développement en spirales pour la simulation multi-agents », in *L'Objet*, Hermès, 1(4), pp. 73-86, 1998.

[Coutaz 1996] COUTAZ J., « L'art de communiquer à plusieurs voies”, in *Spécial La Recherche* “L'ordinateur au doigt et à l'œil », n°285, mars 1996, pp. 66-73.

[Cox 1988] COX D. J., “Using the Supercomputer to Visualize Higher Dimensions: An Artist’s Contribution to Scientific Visualization”, in *Leonardo*, Vol. 21, No. 3, pp. 233-242, 1988.

[Darwin 1985] DARWIN C., *The Origin of Species*, première édition J. Murray 1859, Penguin Classics, London, 1985.

[Davies et al. 1996] DAVIES N. J., WEEKS R., REVETT M. C., "Information agents for the World Wide Web", in *BT Technol. J.*, vol. 14, n° 4, October 1996.

[Dawkins 1988], DAWKINS R., "The Evolution of Evolvability", in *Artificial Life*, pp. 201-220, C. Langton ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1988.

[Dawkins 1989] DAWKINS R., *The Selfish Gene*, Oxford Paperbacks, 1989.

[Degazio 1996] DEGAZIO B. "Evolution of Musical Organisms", in *Proceedings of ICMC*, pp. 36-39, 1996.

[Delorme 1982] DELORME A., *Psychologie de la perception*, Editions Etudes Vivantes, Montréal, 1982.

[Deneubourg et al. 1992] DENEUBOURG J.-L., THERAULAZ G. et BECKERS R., “Swarm-Made Architectures”, in *Towards a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press, Cambridge, pp. 123-133, 1992.

[Descartes 1637] DESCARTES R., *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences*, document électronique, http://cedric.cnam.fr/cgi-bin/ABU/donner?methode3, visité le 5 novembre 1999.

[Domik 1991] DOMIK G., “The Role of Visualization in Understanding Data”, in *New Trends and Results in Computer Science*, *LNCS 555*, pp. 91-107, Springer Verlag, 1991.

[Domik 1996] DOMIK G., *Tutorial on Visualization*, document électronique, http://www.education.siggraph.org/materials/HyperVis/domik/folien.html, visité le 15 octobre 1999.

[Drogoul et al. 1992] DROGOUL A., FERBER J., CORBARA B. et FRESNEAU D., “A Behavioral Simulation Model for the Study of Emergent Social Structures”, in *Towards a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press, Cambridge, pp. 161-170, 1992.

[Drogoul 1993] DROGOUL A., De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes: une étude de l’émergence de structures d’organisation dans les systèmes multi-agents, Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1993.

[Drogoul et al. 1993] DROGOUL A., FERBER J. et LALANDE S., “Du Petit Poucet aux Dockers: une Etude Comparative d’Architectures de Robots Fourrageurs”, *Rapport Technique du LAFORIA*, n° 93/13, 1993.

[Dumouchel et Dupuy 1983] DUMOUCHEL P. et DUPUY J.-P. éds., *Colloque de Cerisy : l’Auto-Organisation, de la Physique au Politique*, Editions du Seuil, Paris, 1983.

[Durand 1979] DURAND D., *La systémique*, Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 1979.

[Eco 1992] ECO U., *La production des signes*, Le livre de poche, Librairie Générale Française, Paris, 1992.

[Eco 1997] ECO U., *Art et beauté dans l’esthétique médiévale*, Grasset, Paris, 1997.

[Eco 1999] ECO U., *Kant et l’ornithorynque*, Grasset, Paris, 1999.

[Engelmore et Morgan 1988] ENGELMORE R. et MORGAN T. eds., *Blackboard Systems*, Addison Wesley, Wokingham, 1988.

[Erceau et Ferber 1991] ERCEAU J. et FERBER J., “L’intelligence Artificielle Distribuée”, in *La Recherche*, n° 233, pp. 750-758, 1991.

[Ferber 1995] FERBER J., *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, 1995.

[Fleischer et Barr 1994] FLEISCHER K. et BARR A. H., “A Simulation Testbed for the Study of MultiCellular Development: The Multiple Mechanisms of Morphogenesis”, in *Artificial Life III*, Addison-Wesley, London, 1994.

[Francès, 1992] FRANCES R., *La perception*, 8ème éd., Que sais-je?, P.U.F., Paris,1992.

[Freeman et al. 1995] FREEMAN E., GELERNTER D., JAGANNATHAN S., « In Search of a Simple Visual Vocabulary », in *IEEE Symposium on Visual Languages*, Yale-CS TR 1074, 1995.

[Gabora 1997] GABORA L., "The Origin and Evolution of Culture and Creativity", document électronique, in *Journal of Memetics,* n°1, http://www.cpm.mmu.ac.uk/jom-emit/1997/vol1/gabora_l.html, visité le 15 octobre 1999.

[Gaarder 1995] GAARDER J., *Le monde de Sophie*, Editions du Seuil, Paris, 1995.

[Gebhardt 1994] GEBHARDT N., “The Alchemy of Ambience”, in *Proceedings of the 5th International Symposium on Electronic Art*, Helsinki, 1994.

[Gelernter et Bernstein 1982] GELERNTER D. et BERNSTEIN A. J., "Distributed Communication via Global Buffer", in *Proceedings of the ACM Principles of Distributed Computing Conference*, pp. 10-18, 1982.

[Gelernter 1992] GELERNTER D., *Mirror Worlds – The Day Software Puts the Universe in a Shoebox… How it will Happen and What it Will Mean*, Oxford University Press, Oxford, 1992.

[Gershon 1994] GERSHON N., "From Perception to Visualization", in *Scientific Visualization, 1994, Advances and Challenges*, L. Rosenblum et al. eds., Academic Press, 1994.

[Gershon et al. 1998] GERSHON N., CARD S. et EICK S. G., *Information Visualization*, CHI'98 Tutorial Notes n° 3, ACM Press, New York, 1998.

[Gilbert et Conte 1995] GILBERT N. et CONTE R. eds., *Artificial Societies: the Computer Simulation of Social Life*, UCL Press, London, 1995.

[Gillan 1998] GILLAN D. J., *The Psychology of Multimedia: Principles of Perception and Cognition*, CHI'98 Tutorial Notes n°22, ACM Press, New York, 1998.

[Giordan 1995] GIORDAN A., *Comme un poisson rouge dans l'homme*, Payot, Paris, 1995.

[Giordan 1996] GIORDAN A., "Voici venue l'ère de la physionique", in *La Recherche*, n° 284, pp. 750-758, 1991.

[Gips et Stiny 1975] GIPS J. et STINY G., “Artificial Intelligence and Aesthetics”, in *Advance Papers of IJCAI’75* (Tbilisi), Morgan-Kaufmann, pp. 907-911, 1975.

[Giroux et al. 1994] GIROUX S., PACHET F., DESBIENS J., “Debugging Multi-Agent Systems: a Distributed Approach to Events Collection and Analysis”, in *Canadian Workshop on Distributed Artificial Intelligence’94* (Banff), 1994.

[Gleick 1991] GLEICK J., *La théorie du chaos, vers une nouvelle science*, Flammarion, Paris, 1991.

[Goethe 1996] GOETHE J. W., *Ecrits sur l'art*, (éd. originale Klincksieck, Pairs, 1983), GF-Flammarion, Paris, 1996.

[Goldberg 1989] GOLDBERG D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, 1989.

[Goldberg et Robson 1989] GOLDBERG A. et ROBSON D. eds., *Smalltalk-80: the language*, Addison-Wesley, 1989.

[Green 1994] GREEN D., « Emergent Behavior in Biological Systems », document électronique, in *Complexity International*, n° 1, 1994, http://www.csu.edu.au/ci/vol1/David.Green/paper.html, visité le 16 juin 1999.

[Grislin-Le Sturgeon et Peninou 1998] GRISLIN-LE STURGEON E. et PENINOU A., « Interaction Homme-SMA : réflexions et problématiques de conception », in *JFIADSMA’98*, Barthès J.-P., Chevrier V., Brassac C. éds., pp. 133-146, Hermès, Paris, 1998.

[Guerrin et al. 1998] GUERRIN F., COURDIER R., CALDERONI S., PAILLAT J.-M., SOULIE J.-C. et VALLY J.-D., « Conception d'un modèle Multi-Agent pour la gestion des effluents d’élevage », in *6èmes JFIADSMA* (Pont-à-Mousson), 1998.

[Guessoum et Durand 1996a] GUESSOUM Z. et DURAND R., « Des agents intelligents pour modéliser l'évolution des entreprises », in *4èmes JFIADSMA*, J.-P. Müller et J. Quinqueton éds., Hermès, Paris, pp. 37-58, 1996.

[Guessoum et Durand 1996b] GUESSOUM Z. et DURAND R., “A multi-agent system to study the economics agents evolution”, in *The third International Conference on Applications of Computer Systems* (*ACS'96*), Szczecn, Poland, pp. 137-142, 1996.

[Hamm 1988] HAMM R. M., “Moment-By-Moment Variation in Experts’ Analytic and Intuitive Cognitive Activity”, in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 18, No. 5, September/October 1988.

[Hammond et al. 1987] HAMMOND K. R., Hamm, R. M., Grassia J. et Pearson T., “Direct Comparison of the Efficiency of Intuitive and Analytical Cognition in Expert Judgement”, in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 17, No. 5, September/October 1987.

[Hart et al. 1997] HART D., KRAEMER E., ROMAN G.-C., “Interactive Visual Exploration of Distributed Computations”, in *Proceedings of 11th International Parallel Processing Symposium*, 1997.

[Heppner et Grenander 1990] HEPPNER F. et GRENANDER U., “A Stochastic Nonlinear Model for Coordinated Bird Flocks”, in *The Ubiquity of Chaos*, S. Krasner ed., AAAS Publications, Washington DC, 1990.

[Hewett 1998] HEWETT T. T., *Cognitive Factors in Design: Basic Phenomena in Human Memory and Problem Solving*, CHI'98 Tutorial Notes n°7, ACM Press, New York, 1998.

[Hogeweg 1988] HOGEWEG P., “MIRROR beyond MIRROR, Puddles of Life”, in *Artificial Life*, Addison-Wesley, London, pp. 298-316, 1988.

[Hölldobler et Wilson 1990] HÖLLDOBLER B. et WILSON E. O., *The Ants*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

[Holtzman 1994] HOLTZMAN S. R., *Digital Mantras – The Languages of Abstract and Virtual Worlds*, The MIT Press, Cambridge, 1994.

[Houdé et al. 1998] HOUDE O., KAYSER D., KOENIG O., PROUST J., RASTIER F., *Vocabulaire de sciences cognitives, Neuroscience, psychologie, intelligence artificielle, linguistique et philosophie*, P.U.F., Paris, 1998.

[Hutzler 1993] HUTZLER G., "*Quel temps fait-il au Caplan?* : animation d'une image abstraite en fonction de variables météorologiques", rapport de stage de 2ème année de l'Institut d'Informatique d'Entreprise, 1993.

[Hutzler et Drogoul 1996] HUTZLER G., DROGOUL A., "Le jardin Des Hasards: peinture abstraite et I.A.D. réactive", *Rapport technique du LAFORIA*, n° 96/04.

[Hutzler et al.1997a] HUTZLER G., GORTAIS B., DROGOUL A., "The Garden of Chances: an Integrated Approach to Abstract Painting and Reactive D.A.I.", in *4th European Conference on Artificial Life*, Husbands P. and Harvey I. eds., pp. 566-573, MIT Press, 1997.

[Hutzler et al.1997b] HUTZLER G., GORTAIS B., DROGOUL A., "Le Jardin Des Hasards: peinture abstraite et I.A.D. réactive", in *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, J.-P. Muller et J. Quinqueton éds., pp. 295-306, Hermès, Paris, 1997.

[Hutzler 1997c] HUTZLER G., "Compte-rendu de la conférence ECAL'97", in *Bulletin de l'AFIA*, n° 31, p. 46, octobre 1997

[Hutzler et al. 1998a] HUTZLER G., GORTAIS B., DROGOUL A., "Grounding Virtual Worlds in Reality", in *Virtual Worlds'98*, Heudin J.-C. ed., pp. 274-285, LNAI 1434, Springer, 1998.

[Hutzler et al.1998b] HUTZLER G., GORTAIS B., RENAULT V., "Point et ligne sur plan : des agents qui communiquent visuellement", in *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, pp. 191-204, Hermès, Paris, 1998.

[Hutzler 1998c] HUTZLER G., "Data Gardens : Visualizing the Evolution of Complex Dynamic Data Using the Garden Metaphor", présenté au workshop *Innovative Interface Metaphors for Visual Media*, Computer Human Interaction'98 (Los Angeles), 1998.

[Hutzler et al. 1998d] HUTZLER G., GORTAIS B., DROGOUL A., "Data Gardens : An Artistic Proposal Towards the Representation of Distributed and Dynamic Data Using Multiagent Systems", in *International Conference on Multi-Agent Systems'98*, Demazeau Y. ed., pp. 435-436, IEEE Computer Society, 1998.

[Hutzler et al. 1998e] HUTZLER G., GORTAIS B., DROGOUL A., "Complexity Made Perceptible", in *Proceedings of Nîmes'98 - Complex Systems Intelligent Systems and Interfaces*, La Lettre de l'IA, n° 134-135-136, p. 287, mai-juin-juillet-août 1998.

[Hutzler 1999a] HUTZLER G., "Growing Artificial Gardens Under Web Meteorological Conditions", présenté au workshop *Artificial Life Integration in Virtual Environments*, European Conference on Artificial Life'99.

[Hutzler 1999b] HUTZLER G., « Vers une conception multi-agent des interfaces Homme-Machine », à paraître dans *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, 1999.

[Hutzler et al. 2000] HUTZLER G., GORTAIS B., DROGOUL A., "The Garden of Chances: A Visual Ecosystem", à paraître dans *Leonardo*, Vol. 33, Issue 2, MIT Press, 2000.

[Imberty 1991] IMBERTY M., "Le concept de hiérarchie perceptive face à la musique atonale", in *Sistemi ad auto-organizzazione, Communicazioni Scientifiche di Psichologia Generale*, Edizioni Scientifiche Italiane, 1991.

[Ishii et Ullmer 1997] ISHII H. et ULLMER B., "Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms", in *Proceedings of CHI '97* (Atlanta), ACM Press, 1997.

[Ishizaki 1996] ISHIZAKI S., "Multiagent Model of Dynamic Design - Visualization as an Emergent Behavior of Active Design Agents", in *Proceedings of CHI '96* (Vancouver), ACM Press, 1996.

[Jambu 1999] JAMBU M., *Introduction au data mining : analyse intelligente des données*, Eyrolles, Paris, 1999.

[Jones 1995] JONES B. J., "Variability and Universality in Human Image Processing", in *Understanding Images, Finding Meaning in Digital Imagery*, Marchese F. T. ed., Springer Verlag, New York, 1995.

[Kandinsky 1989] KANDINSKY W., *Du spirituel dans l'art et dans la peinture en particulier*, Gallimard, Paris, 1989.

[Kandinsky 1991] KANDINSKY W., *Point et ligne sur plan – contribution à l'analyse des éléments de la peinture*, Gallimard, Paris, 1991.

[Kanizsa 1997] KANIZSA G., *La grammaire du voir*, Diderot Editeur, Arts et Science, Paris, 1997.

[Karat et al. 1998] KARAT C.-M., LUND A., COUTAZ J. et KARAT J. EDS., *Proceedings of CHI'98 - Human Factors in Computing Systems* (Los Angeles), ACM Press, New York, 1998.

[Kawata et Toquenaga 1994] KAWATA M. et TOQUENAGA Y., "From artificial individuals to global patterns", in *TREE*, 9(11), pp. 417-421, 1994.

[de Kepper et al. 1998] DE KEPPER P., DULOS E., DE WIT A., DEWEL G. et BORCKMANS P., “Tâches, rayures et labyrinthes”, in *La Recherche*, n° 305, 1998.

[Kitano et al. 1997] KITANO H., HAMAHASHI S., KITAZAWA J., TAKAO K. et IMAI S.-I., “The Virtual Laboratory: A New Approach of Computational Biology”, in *4th European Conference on Artificial Life*, Husbands P. and Harvey I. eds., pp. 274-283, MIT Press, 1997.

[Klee 1977] KLEE P., *Histoire naturelle infinie - Ecrits sur l'art II*, Dessain et Tolra, Paris, 1977.

[Klee 1985] KLEE P., *Théorie de l'art moderne*, Denoël, Paris, 1985.

[Kolski 1997] KOLSKI C., *Interfaces homme-machine – application aux systèmes industriels complexes*, Hermès, Paris, 1997.

[Lacoste 1998] LACOSTE J., *La philosophie de l’art*, Que sais-je ?, P.U.F., Pairs, 1998.

[Langton 1988] LANGTON C. ed., *Artificial Life*, Addison Wesley, London, 1988.

[Laredo 1996] LAREDO N., ftp://sunsite.unc.edu/pub/Linux/apps/sound/midi/playmidi-2.2.tar.gz., visité le 15 octobre 1999.

[Larkin et Simon 1987] LARKIN J. H. et SIMON H. A., “Why a Diagram is (Sometimes) Worth Ten Thousands Words”, in *Cognitive Science*, 11, pp. 65-69, 1987.

[Leavitt 1976] LEAVITT R. ed., *Artist and Computer*, Harmony Books, New York, 1976.

[Le Moigne 1990] LE MOIGNE J.-L., *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, Paris, 1990.

[Le Moigne 1999] LE MOIGNE J.-L., *Les épistémologies constructivistes*, Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 1999.

[Lieberman 1990] LIEBERMAN H., *Habilitation à diriger des recherches*, Université Paris 6, 1990.

[Lieberman 1997] LIEBERMAN H., Autonomous Interface Agents, in *Proceedings of the ACM Conference on Computers and Human Interface*, Atlanta, Georgia, March 1997.

[Lindsay et Norman 1980] LINDSAY P. H. et NORMAN D. A., *Traitement de l'information et comportement humain*, Editions Etudes Vivantes, Montréal, 1980.

[Lissandre 1990] LISSANDRE M., *Maîtriser SADT*, Armand Colin, Paris, 1990.

[Löffelmann et Gröller 1998] LÖFFELMANN H. et GRÖLLER E., “Enhancing the Visualization of Characteristic Structures in Dynamical Systems”, *Rapport technique* TR-186-2-98-05, Institute of Computer Graphics, Vienna University of Technology, janvier 1998.

[Lokuge et Ishizaki 1995] LOKUGE I. et ISHIZAKI S., “GeoSpace: An Interactive Visualization System for Exploring Complex Information Spaces”, in *Computer Human Interactions’95*, ACM Press, 1995.

[McCormick et al. 1987] MCCORMICK B., DEFANTI T. et BROWN M., “Visualization in Scientific Computing”, in *Computer Graphics (AC-SIGGRAPH)*, 21(6), pp. 1-15, 1987.

[McFarland 1990] MCFARLAND D., *Dictionnaire du comportement animal*, Robert Laffont, Paris, 1990.

[Mackinlay 1986] MACKINLAY J., "Automating the design of Graphical Presentations of Relational Information", in *ACM transactions on Graphics*, vol. 5, n° 2, pp. 110-141, April 1996.

[McMullin et Varela 1997] MC MULLIN B. et VARELA F. J., “Rediscovering Computational Autopoiesis”, in *4th European Conference on Artificial Life*, Husbands P. and Harvey I. eds., pp. 38-47, MIT Press, 1997.

[Maes 1994] MAES P., "Agents that reduce work and information overload", in *Communications of the ACM*, 37(7), July, 1994.

[Malévitch 1994] MALEVITCH K., *Les arts de la représentation*, Editions l’Age d’Homme, Lausanne, 1994.

[Malina 1979] MALINA F. J., *Visual Art, Mathematics and Computers*, MALINA F. J. ed., Pergamon Press, Oxford, 1979.

[Marcenac 1997] MARCENAC P., "Modélisation de systèmes complexes par agents", in *Revue de l'AFCET Technique et Science Informatiques*, vol.16(8), pp. 1013-1037, Hermès, octobre 1997.

[Marcenac et Calderoni 1998] MARCENAC P., CALDERONI S., "Modeling MultiAgent Systems as Self-Organized Critical Systems", in *Proceedings of HICSS-98*, Dan Dolk ed., IEEE-Computer Press, vol.5, pp.86-95, 1998.

[Marcenac et Giroux 1998] MARCENAC P. et GIROUX S., "GEAMAS", in *International Journal of Applied Intelligence*, Kluwer Pbs, 8(3), pp. 247-267, 1998.

[Marchese 1995] MARCHESE F. T. ed., *Understanding Images, Finding Meaning in Digital Imagery*, Springer Verlag, New York, 1995.

[Marx et Engels 1968] MARX K., ENGELS F., *L'idéologie allemande*, 1845, Editions sociales, Paris, 1968.

[Mataric 1993] MATARIC M. J., "Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence", in *From Animals to Animats II*, MIT Press, Cambridge, pp. 432- 441, 1993.

[Matheron et al. 1990] MATHERON J.-P., DAUMARD P., TARDIEU H., *Comprendre MERISE : outils conceptuels et organisationnels*, Eyrolles, Paris, 1990.

[Maturana et Varela 1994] MATURANA H. et VARELA F. J., *L'arbre de la connaissance*, Addison-Wesley, Paris, 1994.

[Météo France] METEO FRANCE, site Web, http://www.météofrance.fr, visité le 5 novembre 1999.

[MIDI] MUSICAL INSTRUMENT DIGITAL INTERFACE, site Web, http://www.midi.org/, visité le 5 novembre 1999.

[Minar et al. 1996] MINAR N., BURKHART R., LANGTON C., et ASKENAZI M., "The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations", Santa Fe Institute Working Paper 96-06-042, 1996.

[Minar et Donath1999] MINAR N. et DONATH J., "Visualizing the Crowds at a Web Site", à paraître in *CHI '99 Late Breaking Papers*, 1999.

[Minsky, 1988] MINSKY M., *La société de l'esprit*, InterEditions, Paris, 1988.

[Minsky 1993] MINSKY M., "The Future Merging of Science, Art and Psychology", in *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 7, No 1, 1993, pp. 87-108, January-March.

[Mitchell et Sundström 1997] MITCHELL C. M. et SUNDSTRÖM G. A., "Human Interaction with Complex Systems: Design Issues and Research Principle", in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 27, n°3, pp. 265-273, May 1997.

[Moles 1966] MOLES A. A., *Information Theory and Esthetic Perception*, University of Illinois Press, Urbana, 1966.

[Moles 1990] MOLES A. A., *Art et ordinateur*, Blusson, Paris, 1990.

[Morin 1977] MORIN E., *La méthode, Tome 1. La Nature de la Nature*, Editions du Seuil, Paris, 1977.

[Moukas 1996] MOUKAS A., "Amalthaea : Information Discovery and Filtering Using a Multiagent Evolving Ecosystem", in *Proceedings of PAAM'96*, London, 1996.

[Myers 1996] MYERS B. A., "A Brief History of Human Computer Interaction Technology", *Rapport technique* CMU-CS-96-163, Carnegie Mellon University, 1996.

[Nakauchi et al. 1992] NAKAUCHI Y., ITOH Y., SATO M. et ANZAI Y., "Modeling and Implementation of Multiagent Interface System for Computer-Supported Cooperative Work", in *Ergonomics*, Vol. 35, Iss. 5-6, pp. 565-576, 1992.

[Ndumu et al. 1999] NDUMU D. T., NWANA H. S., LEE L. C. et HAYNES H. R., “Visualisation and debugging of distributed multi-agent systems”, in *Applied Artificial Intelligence Journal*, vol. 13(1), pp. 187-208, 1999.

[Negroponte 1979] NEGROPONTE N., “The Return of the Sunday Painter”, in *The Computer Age: a Twenty-year View*, M. Dertouzos and J. Moses eds., MIT Press, Cambridge, 1979.

[Orlarey et al. 1994] ORLAREY Y., FOBER D., LETZ S., “Lambda Calculus and Music Calculi”, in *Proceedings of the International Computer Music Conference 1994*, pp.243-250, 1994.

[Oustershout 1994] OUSTERSHOUT J. K., *Tcl and the Tk Toolkit*, Addison-Wesley, New York, 1994.

[Parunak 1996] PARUNAK H. V. D., "Visualizing Agent Conversations: Using Enhanced Dooley Graphs for Agent Design and Analysis", in *Proceedings of ICMAS'96*, AAAI Press, 1996.

[Pelt 1984] PELT J.-M., *La vie sociale des plantes*, Fayard, Paris, 1984.

[Penny 1994] PENNY S., “The Darwin Machine: Artificial Life and Art”, in *Proceedings of the 5th International Symposium on Electronic Art*, Helsinki, 1994.

[Piaget 1987] PIAGET J., *Le structuralisme*, Que sais-je ?, P.U.F., Paris, 1987.

[Pickover et Tewksbury 1994] PICKOVER C. A. et TEWKSBURY S. K., *Frontiers of Scientific Visualization*, Pickover C. A. et Tewksbury S. K. eds., John Wiley & Sons, New York, 1994.

[Piéron 1990] PIERON H., *Vocabulaire de la psychologie*, 8ème éd. (1ère éd.: 1951), P.U.F., Paris, 1990.

[Platon 1966] PLATON, *La République*, Gallimard, Paris, 1966.

[Popper 1993] POPPER F., *L'art à l'âge électronique*, Hazan, Paris, 1993.

[Power 1993] POWER R. J. D., *Cooperation Among Organizations : The Potential of Computer Supported Cooperative Work*, Springer-Verlag, Berlin, 1993.

[Preti et Miotto 1997] PRETI A. et MIOTTO P., "Creativity, Evolution and Mental Illnesses", document électronique, in *Journal of Memetics,* n°1, http://www.cpm.mmu.ac.uk/jom-emit/1997/vol1/preti_a&miotto_p.html, visité le 15 octobre 1999.

[Principia Cybernetica] PRINCIPIA CYBERNETICA PROJECT, site Web, http://pespmc1.vub.ac.be/, visité le 5 novembre 1999.

[Proth et Xie 1995] PROTH J.-M. et XIE X., *Les réseaux de Pétri pour la conception et la gestion des systèmes de production*, Masson, Paris, 1995.

[Proton et al. 1997] PROTON H., BOUSQUET F. et REITZ P., "Un outil pour observer l'organisation d'une société d'agents; le cas d'une société d'agents chasseurs agriculteurs", in *JFIADSMA'97* (La Colle sur Loup), J. Quinqueton, M.-C. Thomas et B. Trousse éds, Hermès, 1997.

[Prusinkiewicz 1994] PRUSINKIEWICZ P., “Visual Models of Morphogenesis”, in *Artificial Life*, Volume I, Nb 1/2, MIT Press, pp. 61-74, Fall 1993/Winter 1994.

[Quéau 1986] QUEAU P., *Eloge de la simulation – de la vie des langages à la synthèse des images*, Champ Vallon, Seyssel, 1986.

[Quéau 1989] QUEAU P., *Metaxu – théorie de l'art intermédiaire*, Champ Vallon, Seyssel, 1989.

[Rao 1996] RAO R., “Quand l'information parle à nos yeux”, in Spécial *La Recherche* “L'ordinateur au doigt et à l'œil”, n° 285, mars 1996, pp. 66-73.

[Rasmussen 1983] RASMUSSEN J., "Skills, Rules, Knowledge: Signals, Signs, and Symbols and Other Distinctions in Human Performance Models", in *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 13, pp. 257-267, May 1983.

[Rasmussen 1986] RASMUSSEN J., *Information processing and human-machine interaction, an approach to cognitive engineering*, Elsevier Science Publishing, 1986.

[Rasmussen et Vicente 1989] RASMUSSEN J. et VICENTE K. J., "Coping with human errors through system design: implications for ecological interface design", in *International Journal of Man-Machine Studies*, n° 31, pp. 517, 534, 1989.

[Rasmussen et al. 1991] RASMUSSEN J., ANDERSEN H. B. et BERNSEN N. O., *Human-Computer Interaction - Research Directions in Cognitive Science: European Perspectives Vol. 3*,

[Renault 1998] RENAULT V., « Jardins de Données et Parc Automobile: Processus Distribués de Hiérarchisation Pour la Visualisation Dynamique de Données numériques », Mémoire du DEA IARFA, 25p., 1998.

[Resnick 1988] RESNICK M., "LEGO, Logo, and Life", in *Artificial Life*, C. Langton ed., Addison-Wesley Publishing Company, pp. 397-406, 1988.

[Resnick 1991a] RESNICK M., “Overcoming the Centralized Mindset: Towards an Understanding of Emergent Phenomena”, in *Constructionism*, Harel I. and Papert S. eds., pp. 205-214, Ablex, Norwood, 1991.

[Resnick 1991b] RESNICK M., "Animal Simulations with *Logo: Massive Parallelism for the Masses", in From Animals to Animats, pp. 534-539, MIT Press, Cambridge, 1991.

[Reuchlin 1990] REUCHLIN M., *Psychologie*, 8ème éd. (1ère éd.: 1977), P.U.F., Paris, 1990.

[Risan 1997] RISAN L., ""Why are there so few biologists here?" - Artificial Life as a theoretical biology of artistry", in *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, Husbands P. and Harvey I. eds., pp. 28-35, MIT Press, 1997.

[Robertson 1991] ROBERTSON P. K., "A Methodology for Choosing Data Representations", in *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 11, n°3, May 1991, pp. 56-58.

[Roman et Cox 1993] ROMAN G.-C. et COX K. C., "A Taxonomy of Program Visualization Systems", in *IEEE Computer*, vol. 26, n° 12, pp. 11-24, 1993 (également rapport technique WUCS-93-22, Washington University, 1993).

[de Rosnay 1975] DE ROSNAY J., *Le macroscope – Vers une vision globale*, Editions du Seuil, Paris, 1975.

[de Rosnay 1995] DE ROSNAY J., *L'homme symbiotique*, Editions du Seuil, Paris, 1995.

[Rumbaugh et al. 1995] RUMBAUGH J., BLAHA M., EDDY F., PREMERLANI W., LORENSEN W., *OMT : Modélisation et conception orientées objet*, Masson, Paris, 1995.

[Schildt 1998] SCHILDT H., *C++, The Complete Reference*, Osborne McGraw-Hill, Berkeley, 1998.

[Schneiderman 1996] SCHNEIDERMAN B., "The Eyes Have It : A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualization", in *IEEE Symposium on Visual Languages* (Boulder), 1996.

[Schneiderman et Plaisant 1998] SCHNEIDERMAN B. et PLAISANT C., *Information Visualization: Advanced Interface and Web Design*, CHI'98 Tutorial Notes n° 23, ACM Press, New York, 1998.

[Servant 1990] SERVANT D., "Le rôle des images dans les sciences de gestion", in *115ème Congrès National des Sociétés Savantes, L'image et la science* (Avignon), pp. 387-409, 1990.

[Servat et al. 1998] SERVAT D., PERRIER E., TREUIL J.-P., DROGOUL A., "When Agents Emerge From Agents: Introducing Multi-scale Viewpoints in Multi-Agent Simulations", in *Multi-Agent systems and Agent-Based Simulation*, Sichman, Conte and Gilbert eds., LNAI series, vol.1534, December 1998, Berlin, Springer-Verlag.

[Sicard 1995] SICARD M. éd., *Chercheurs ou artistes ? Entre art et science, ils rêvent le monde*, Editions Autrement, Série Mutations, n°158, octobre 1995.

[Simon 1991] SIMON H.-A., *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*, Dunod, Paris, 1991.

[Sims 1994] SIMS K., "Evolving SD Morphology and Behavior by Competition", in *Artificial Life*, Vol. 1, N° 4, pp. 353-372, 1994.

[Smith 1991] SMITH J. R., "Designing Biomorphs with an Interactive Genetic Algorithm", in *Proceedings of the fourth International Conference on Genetic Algorithms* (San Diego), Belew R. K., Booker L. B. eds., Morgan Kaufmann, San Mateo, 1991.

[Solso 1997] SOLSO R. L., *Cognition and the Visual Arts*, The MIT Press, Cambridge, 1997.

[Souriau 1990] SOURIAU E., *Vocabulaire d'esthétique*, P. U. F., Paris, 1990.

[Steels 1990] STEELS L., "Cooperation between distributed agents through self-organization", in *Proceedings of the First European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, Y. Demazeau et J.-P. Müller eds., pp. 175-196, Elsevier Science Publishers B. V., 1990.

[Steels 1991] STEELS L., "Towards a Theory of Emergent Functionality", in *From Animals to Animats*, MIT Press, Cambridge, 1991.

[Steels 1994] STEELS L., "The artificial life roots of artificial intelligence", in *Artificial Life Journal*, Vol. 1, n°1, MIT Press, Cambridge, 1994.

[Steels 1996] STEELS L., "Synthesizing the origins of language and meaning using coevolution, self-organization and level formation", in *Evolution of Human Language*, J. Hurford, C. Knight and M. Studdert-Kennedy eds., Edinburgh Univ. Press., 1997.

[Stevens 1978] STEVENS P. S., *Les formes dans la nature*, Editions du Seuil, Paris, 1978.

[Terveen et Hill 1998] TERVEEN L. et HILL W., "Finding and Visualizing Inter-site Clan Graphs", in *Proceedings of Computer Human Interactions'98* (Los Angeles), pp. 448-455, ACM Press, 1998.

[Thywissen 1996] THYWISSEN, K., "*GeNotator*: An Environment for Investigating the Application of Genetic Algorithms in Computer Assisted Composition", in *Proceedings of ICMC*, pp. 274-277, 1996.

[Tisseau 1997] TISSEAU G., "Les activités d'un chercheur en Intelligence Artificielle: méthodes et conseils", *Rapport Technique du LAFORIA*, n° 97/06, 1997.

[Tisseron 1997] TISSERON S., *Psychanalyse de l'image – Des premiers traits au virtuel*, Dunod, Paris, 1997.

[Todd et Latham 1992] TODD S. et LATHAM W., "Artificial Life or Surreal Art?", in *Towards a Practice of Autonomous Systems*, Varela F.J. et Bourgine P. eds., MIT Press, Cambridge, pp. 504-513, 1992.

[Treuil et al. 1997] TREUIL J.-P., PERRIER E., CAMBIER C., "Directions pour une approche multi-agent de la simulation de processus physiques spatialisés", in *Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, J.-P. Muller et J. Quinqueton éds., pp. 295-306, Hermès, Paris, 1997.

[Tufte 1983] TUFTE E. R., *The Visual Display of Quantitative Information*, Graphics Press, Cheshire CN, 1983.

[Verdi 1984] VERDI R., *Klee and Nature*, A. Zwemmer, London, 1984.

[Vicente et Rasmussen 1992] VICENTE K. J. et RASMUSSEN J., "Ecological Interface Design: Theoretical Foundations", in *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 22, n°4, July/August 1992.

[de Vinci 1987] DE VINCI L., *Les carnets de Léonard de Vinci*, 2 vol., Gallimard, Paris, 1987.

[Wagensberg 1997] WAGENSBERG J., *L'âme de la méduse – idées sur la complexité du monde*, Seuil, Paris, 1997.

[Wavish 1992] WAVISH P., "Exploiting Emergent Behaviour in Multi-Agents Systems", in *Decentralized Artificial Intelligence*, E. Werner et Y. Demazeau eds., pp. 297-310, Elsevier North Holland, 1992.

[Wegenkittl et al. 1997] WEGENKITTL R., LÖFFELMANN H. et GRÖLLER E., "Visualizing the Behavior of Higher Dimensional Dynamical Systems", in *Proceedings of IEEE Visualization'97*, pp. 119-125, 1997.

[Wilson 1991] WILSON S., "Research and Development as a Source of Inspiration and Ideas for Artists", in *Leonardo*, vol. 24:n°3, 1991.

[Wilson 1996] WILSON S., "Art as Research", document électronique, http://userwww.sfsu.edu/~swilson/papers/artist.researcher.html, visité le 15 septembre 1999.

[Wolfram 1994] WOLFRAM S., "Cellular Automata and complexity: Collected Papers", Addison-Wesley, 1994.

[Wright 1994] WRIGHT R., "Art and Science in Chaos: Contesting Readings of Scientific Visualization", in *Proceedings of the 5th International Symposium on Electronic Art*, Helsinki, 1994.

[Zeghal 1993] ZEGHAL K., « Champs de Forces Symétriques: un Modèle de Coordination d'Actions Réactive Appliqué au Trafic Aérien », *Rapport Technique LAFORIA*, n° 93/14, 1993

[Zeghal 1994] ZEGHAL K., « Un modèle de coordination d'actions pour agents mobiles », *Rapport Technique LAFORIA*, n° 94/9, 1994.

[Zinser 1993] ZINSER K., "Integrated Multi Media and Visualisation Techniques for Process S&C", in *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Le Touquet), vol. I, pp. 367-372, 1993.

GLOSSAIRE

Ce glossaire regroupe les termes les plus importants pour appréhender ce travail, ou ceux qui seraient susceptibles de ne pas être familiers au lecteur, ou dont l'utilisation qui est faite dans ce document serait différente de l'acception courante. Beaucoup d'entre eux peuvent admettre autant de définitions que de chercheurs dans le domaine (un agent, un système) et la définition que nous en donnerons correspondra, dans ce cas, à l'utilisation que nous faisons du terme dans le document.

Agent

Entité logicielle ou robotique (voire humaine), autonome vis-à-vis de son environnement, qui dispose de ressources et de buts, qui peut percevoir son environnement, et qui peut décider spontanément d'actions à effectuer, en fonction de ses ressources et de ses perceptions, pour atteindre son but.

Agent cognitif

Les agents cognitifs sont construits sur la base d'une métaphore sociologique. « Chaque agent dispose d'une base de connaissances comprenant l'ensemble des informations et savoir-faire nécessaires à la réalisation de sa tâche et à la gestion des interactions avec les autres agents et avec son environnement. On dit aussi que les agents sont « intentionnels », c'est-à-dire qu'ils possèdent des buts et des plans explicites leur permettant d'accomplir leurs buts » [Ferber 1995].

Agent réactif

Les agents réactifs sont construits sur la base d'une métaphore biologique. « Un agent réactif ne possède pas de représentations symboliques de son environnement ni de lui-même. Par conséquent, il n'est pas censé pouvoir contrôler son propre comportement. Son contrôle est entièrement pris en charge par un mécanisme rigide qui se sert du résultat de la perception pour déclencher une action, et ce mécanisme n'est modifiable ni par l'action, ni par la perception de l'agent. En ce sens, le contrôle du comportement est donc en partie effectué par l'environnement » [Drogoul 1993].

Algorithme génétique

« Catégorie de programme informatique utilisant des principes voisins de ceux de l'évolution biologique (mutation, sélection, amplification) pour trouver des solutions à un problème donné » [de Rosnay 1995].

Analyse

« Décomposition d'un tout complexe » [Souriau 1990].

Automate cellulaire

Quadrillage de cellules qui ont un nombre limité d'états autorisés. A chaque pas de temps, une règle locale de transition décrit l'état pris par chaque cellule en fonction de son état et de l'état de ses voisines au pas de temps précédent.

Auto-organisation

Processus d'émergence spontanée d'ordre dans un système, dû à des relations internes au système et/ou à des relations avec son environnement et à la manifestation de ces relations dans l'écoulement du temps.

Autopoïèse

(du grec auto: soi-même, poièsis: production; néologisme) Propriété d'un système qui se produit lui-même. « Un système autopoïétique est organisé comme un réseau de processus de production de composants qui : a) régénèrent continuellement par leurs transformations et leurs interactions le réseau qui les a produits, et qui b) constituent le système en tant qu'unité concrète dans l'espace où il existe, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau » (F. Varela).

Calcul parallèle

Calcul pouvant s'exécuter simultanément sur plusieurs microprocesseurs informatiques.

Chaos

« Comportement imprévisible de certains systèmes pourtant régis par des lois déterministes » [de Rosnay 1995].

Commande

Action de « manipuler les ressources disponibles (...) de manière à atteindre le résultat désiré » [Cooper 1994].

Composition

« *Dans son acception la plus générale, le terme de composition désigne l'ordre, les proportions et les corrélations qu'ont entre elles les différentes parties d'une œuvre d'art*, particulièrement lorsque cet ordre et ces corrélations ont été l'effet d'une décision expresse de l'artiste » [Souriau 1990]. Désigne également l'action de composer.

Conception

On pourrait dire que la conception est au système, ce que la composition (voir composition) est à l'œuvre d'art, c'est-à-dire le processus par lequel les éléments du système et leurs relations mutuelles sont organisés selon un ordre particulier.

Constructivisme

Théorie selon laquelle « la connaissance n'est pas le reflet du monde extérieur (...). Le monde physique (...) n'est reconnu, découpé en objets singuliers interreliés, qu'en vertu des actions et opérations que le sujet exerce à son encontre » [Houdé et al. 1998].

Contrôle

Ensemble des opérations permettant « d'observer la situation présente, d'évaluer l'écart entre la situation et l'état désiré, et d'émettre de nouveaux objectifs afin de se rapprocher du résultat souhaité » [Cooper 1994].

Crypticité

« Travail nécessaire à un modélisateur pour réduire un système à une représentation descriptive » (K. Dooley).

Didactique

(du grec didaktikos : propre à instruire) « Qui a pour but d'apporter des connaissances » [Souriau 1990]

Ecosystème

« Système regroupant des espèces vivant en interdépendance » [de Rosnay 1995].

Emergence

« Les systèmes dynamiques auto-organisés, composés d'un très grand nombre d'entités en interaction, manifestent des propriétés globales qui n'existent pas au niveau de leurs entités de base et que l'on désigne sous l'expression de « propriétés émergentes ». Ces propriétés dépendent généralement de patterns spatio-temporels qui résultent des interactions entre les entités » P. Bourgine [Houdé et al. 98].

Epidémiologie

Etude des épidémies [Petit Larousse 1980].

Epistémologie

« (l'épistémologie peut se définir) en première approximation comme l'étude de la constitution des connaissances valables » [Piaget 1987].

« L'épistémologie est la branche de la philosophie qui étudie la connaissance. Elle essaye de répondre à la question de base : en quoi la vraie connaissance (adéquate) se distingue-t-elle de la fausse connaissance (inadéquate) ? En pratique, cette question se traduit par un problème de méthodologie scientifique : comment développer des théories ou des modèles qui soient meilleurs que les théories concurrentes ? » (F. Heylighen [Principia Cybernetica]).

Evolution

« (1) Un processus de changement continu depuis un état bas, simple ou mauvais, vers un état plus haut, plus complexe ou meilleur, un processus de changement dans une certaine direction (Webster's) (2) La naissance d'un processus nouveau et d'ordre supérieur (Laszlo) (3) Le développement de chaque espèce à partir de formes ancestrales différentes, généralement plus simples. (Arbib) (4) L'histoire du changement dans la réalisation d'une organisation invariante incarnée dans des entités indépendantes générées séquentiellement par des étapes reproductives, dans lesquelles la réalisation structurelle particulière de chaque entité résulte de la modification de la (ou des) précédente(s), qui constitue ainsi son antécédent à la fois séquentiel et historique (Maturana and Varela) » [Principia Cybernetica].

Forme

Désigne à la fois la notion de figure qui se détache par rapport à un fond, et la notion d'*organisation* qui ne peut se ramener à une juxtaposition d'éléments, qui possède en propre « une qualité ne se trouvant dans aucun des éléments constituants » [Reuchlin 1990] (voir aussi Gestalt).

Fractal

« Forme ou structure constituée de motifs identiques se retrouvant à des échelles différentes d'observation » [de Rosnay 1995].

Gestalt

(mot allemand signifiant forme) « Le mot Forme, au sens des gestaltistes, est à peu près synonyme de structure, d'organisation unitaire présentant une identité propre » [Reuchlin 1990] (voir aussi forme).

Heuristique

« Une idée heuristique sert de guide à la découverte. Elle constitue une aide précieuse pour une recherche empirique mais peut ne pas être démontrée ni démontrable (Umpleby). Une procédure ou un algorithme pour rechercher quelque chose par l'exploration incrémentale d'un terrain inconnu, en utilisant un certain critère (Krippendorff) » [Principia Cybernetica].

Homéostasie

« Du grec *homeos* (même) et *stasis* (rester). Propriété de stabilité dynamique des systèmes complexes, organismes vivants ou écosystèmes. L'homéostasie signifie le maintien d'un équilibre par le jeu des régulations. Un système homéostatique résiste aux changements et aux perturbations » [de Rosnay 1995].

Internet (INTERnational NETwork)

Réseau informatique mondial, composé d'un ensemble de sous-réseaux interconnectés. L'Internet constitue le support physique des « autoroutes de l'information », gigantesque base de connaissances à l'échelle mondiale, dont le courrier électronique et le Web sont les composantes les plus connues (voir aussi Web).

Isomorphisme

(l) La transcription d'une entité dans une autre ayant la même structure élémentale, par laquelle la description des comportements des deux entités est identique (John Warfield) (2) Une correspondance formelle de principes généraux ou même de lois spécifiques (Bertalanffy) (3) Un ensemble de principes pourrait être transféré d'un domaine à l'autre sans qu'il soit nécessaire de dupliquer l'effort (Weinberg) (4) Une correspondance un-à-un entre les éléments de deux ensembles de sorte que le résultat d'une opération sur les éléments d'un ensemble correspond au résultat de l'opération analogue sur leurs images dans l'autre ensemble » [Principia Cybernetica].

Luminance

Quantité de lumière émise par unité de surface. Dans le modèle Teinte / Saturation / Luminance, par rapport à une couleur pure, diminuer la luminance revient à ajouter du noir à la couleur.

Macroscope

« Méthode et outil d'observation de l'infiniment complexe. L'ordinateur, grâce à son pouvoir de simulation, est devenu un macroscope » [de Rosnay 1995].

Mème

Terme proposé par R. Dawkins pour proposer un équivalent, d'un point de vue sociologique, du concept de gène en biologie.

« Les airs musicaux, idées, répliques, modes vestimentaires, techniques pour faire des pots ou construire des arches sont des exemples de mèmes. De même que les gênes se propagent dans le réservoir de gènes en sautant de corps en corps par le sperme ou les œufs, les mèmes se propagent dans le réservoir de mèmes en sautant de cerveau en cerveau par un processus qui, au sens large, peut être appelé l'imitation » [Dawkins 1989].

MIDI (Musical Instrument Digital Interface)

« Le protocole MIDI est un langage complet de description musicale sous forme binaire. A chaque mot décrivant une action d'une performance musicale est associé un code binaire spécifique. (...) Pour jouer une note en langage MIDI, vous envoyez un message "Note On" puis vous assignez à cette note une "vélocité", qui détermine son intensité sonore. D'autres messages MIDI concernent la sélection de l'instrument qui joue, le mixage et l'échantillonnnage de sons, et le contrôle de différents aspects des instruments de musique électronique.

Quand ils sont enregistrés sur disque, les messages MIDI sont généralement sauvegardés au format de fichier Standard MIDI, légèrement différent du protocole MIDI original, puisque les événements reçoivent également une étiquette temporelle pour la restitution dans l'ordre de la séquence » [MIDI].

Modèle

« Un modèle, en science, est une image stylisée et abstraite d'une portion de réalité. (...) L'intérêt d'un modèle est d'abord d'être plus explicite, plus simple et plus facile à manipuler que la réalité qu'il est censé représenter » [Ferber 1995].

Modèle cognitif

Voir représentation mentale

Modèle computationnel

Modèles que l'on peut simuler par ordinateur.

Multimodal(e), multimodalité

Qui utilise simultanément plusieurs modalités sensorielles, la vue et l'ouïe par exemple. On parle notamment d'interfaces multimodales.

Ontogénèse

« (du grec *on*, *ontos*, être, et *genesis*, génération) Série de transformations subies par l'individu depuis la fécondation de l'œuf jusqu'à l'être parfait » [Larousse 1980] (voir aussi phylogénèse).

Organisation

« L'organisation lie, transforme, produit, maintient. Elle lie, transforme les éléments en un système, produit et maintient ce système » [Morin 1977].

Perception

« Activité au moyen de laquelle l'organisme prend connaissance de son environnement sur la base des informations prélevées par les sens » [Houdé et al. 1998].

Phylogénèse

« (du grec *phulê*, tribu, et *genesis*, génération) Recherche de l'arbre généalogique des organismes » [Larousse 1980] (voir aussi ontogénèse).

Positivisme

Théorie qui postule « qu'il existe, indépendamment de la perception, un monde d'objets physiques dont la nature peut être connue par l'homme » [Houdé et al. 1998].

Programmation évolutionniste

Voir programmation génétique

Programmation génétique

Conception de programmes par algorithmes génétiques (voir algorithme génétique).

Rationalisme

Doctrine fondée sur les quatre principes fondamentaux présentés par Descartes dans le *Discours de la méthode* comme le fondement de tout travail de recherche.

« Le premier était de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connaisse évidemment pour telle, c'est-à-dire d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention (...)

Le second de diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour les mieux résoudre.

Le troisième de conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés (...)

Et le dernier de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales que je fusse assuré de ne rien omettre » [Descartes 1637] (voir aussi systémique).

Réalisme

Voir positivisme

Représentation

« Action de présenter de nouveau » [Larousse 1980]. Utilisé seul, le terme de représentation est généralement utilisé dans ce document dans le sens d'une représentation sensible (voir représentation sensible), plutôt que dans le sens, couramment utilisé en sciences cognitives, de représentation mentale symbolique (voir représentation mentale).

Représentation computationnelle

Représentation d'un phénomène sous forme informatique.

Représentation mentale

« Entité interne, correspondant cognitif individuel des réalités externes expérimentées par un sujet » [Houdé et al. 1998].

Représentation sensible

Représentation faisant intervenir les sens, notamment la vision ou l'ouïe : « perception ou image qui offre l'apparence sensible d'un être dont elle est un équivalent » [Souriau 1990].

Réseau neuronal

Programme de simulation informatique dans lequel des unités (ou neurones artificiels) interconnectées travaillent ensemble afin de résoudre un calcul particulier [Houdé et al. 1998].

Saturation

Dans le modèle Teinte / Saturation / Luminance, une couleur saturée est une couleur pure, « aussi proche que possible d'une longueur d'onde définie du spectre solaire » [Souriau 1990]. Désaturer une couleur revient à y ajouter du blanc.

Sémiologie

Voir Sémiotique

Sémiotique

La science des signes (voir Signe).

Signe

Unité de sens, qui peut prendre la forme d'un mot, d'une image, d'un son, d'un acte, d'un objet, qui se réfère à quelque chose d'autre qu'elle-même, référence reconnue comme telle par un interprète. Un signe peut être un symbole (la forme, ou signifiant, ne ressemble pas à la choses référencée, le signifié – ex : un mot), une icône (le signifiant ressemble au signifié ou l'imite – ex : un portrait) ou un index (le signifiant est lié, par un lien physique ou causal, au signifié – ex : une empreinte de pas) (d'après [Chandler 1994]).

Structure

« C'est en général des règles d'assemblage, de liaison, d'interdépendance, de transformation que l'on conçoit sous le nom de structure, et celle-ci, à la limite, tend à s'identifier à l'invariant formel d'un système » [Morin 1977].

Système

Définition par l'absurde : « il semble en premier lieu que la définition des systèmes comme « ensembles d'éléments en interaction » est si générale et si vague, qu'on ne peut pas en tirer grand chose » [von Bertalanffy 1993].

Plus qu'un tout composé d'éléments en interaction, certains auteurs considèrent un système comme une totalité dynamique (de Rosnay), complexe (Ladrière), organisée (Morin).

Système complexe

Différentes mesures ont été proposées pour caractériser la complexité, comme le nombre des éléments du système, la nature des interactions entre les éléments, le nombre et la variété des liaisons qui relient ces éléments entre eux [de Rosnay 1995]. Certains considèrent par ailleurs que « la notion de complexité implique celle d'imprévisible possible, d'émergence plausible du nouveau et du sens du phénomène que l'on tient pour complexe » [Le Moigne 1990] (voir paragraphe II.1.3).

Système dynamique

Un ensemble de variables qui varient au cours du temps selon des ensembles de règles spécifiques.

Système d'information

Joue le rôle d'interface entre un système opérant (qui effectue des opérations tangibles) et un système de décision (qui élabore des stratégies). Il renseigne d'une part le système de décision du fonctionnement du système opérant. Il permet d'autre part au système de décision d'agir sur le système opérant.

Système multi-agent

Ensemble d'agents (voir Agent) qui interagissent les uns avec les autres dans un environnement commun (voir paragraphe IV.2.2.1).

Systémique

« Nouvelle approche permettant d'organiser les connaissances en vue d'une plus grande efficacité de l'action. La systémique se rapporte à l'étude des systèmes et de leur évolution dans le temps » [de Rosnay 1995].

Approche qui s'oppose au rationalisme cartésien classique pour l'étude des systèmes, et qui au précepte d'évidence oppose celui de pertinence (par rapport au chercheur), au précepte réductionniste (priorité à l'analyse), celui de globalisme (par rapport à l'environnement), au précepte causaliste (raisonnement linéaire), le précepte téléologique (recherche du comportement du système), à celui d'exhaustivité, celui d'agrégativité (en vue d'une représentation simplificatrice) [Durand 1998].

Teinte

Dans le modèle Teinte / Saturation / Luminance, une teinte est associée à une longueur d'onde donnée du spectre solaire.

Test de Turing

Test imaginé par A. Turing devant permettre de décider si une machine est capable de penser. Pour ce faire, un examinateur est en relation, par l'intermédiaire de deux terminaux, d'une part à un homme, d'autre part à un ordinateur. En dialoguant avec chacun d'eux, l'examinateur doit essayer de deviner quel terminal est relié à un homme, et lequel est relié à une machine.

Vie artificielle

Par rapport à la biologie qui serait « l'étude de la vie telle qu'elle est », la vie artificielle pourrait être définie comme « l'étude de la vie telle qu'elle pourrait être ». Domaine de recherche pluridisciplinaire, la vie artificielle s'intéresse à la construction de systèmes artificiels ayant des caractéristiques propres aux systèmes vivants.

Web (World Wide Web)

Base d'information multimédia à l'échelle mondiale, accessible sur l'Internet, organisée selon des principes hypermédia, c'est-à-dire où des mots, ou des graphiques, peuvent être utilisés comme des liens qui référencent d'autres documents ou parties de documents.

ANNEXES

ANNEXE A : LE LANGAGE DE PROGRAMMATION DE LA PLATE-FORME

Le Jardin des Hasards fonctionne avec des fichiers de script que le système interprète avant de commencer l'exécution. L'interprétation procède en deux étapes: une première passe est effectuée par l'interprète du langage de script Tcl [Oustershout 1994], qui transmet à notre plate-forme les instructions rencontrées ainsi que les arguments utilisés. Ces instructions constituent soit:

- des commandes permettant d'initialiser la plate-forme (déclaration des familles d'agents par exemple), et sont alors destinées à être exécutées au moment de l'interprétation du fichier (ces instructions sont regroupées dans la procédure **`families`**, voir plus bas)
- des commandes faisant partie du comportement d'un agent, auquel cas leur exécution est différée jusqu'à l'activation de l'agent (ces instructions sont regroupées dans la procédure **`laws`**, voir plus bas). Dans ce dernier cas, la phase d'interprétation du fichier de configuration sert à construire les comportements des agents. Une deuxième passe est alors assurée par un interprète spécifique à notre plate-forme pour décomposer les arguments de ces instructions en arbres d'évaluation, en vue de leur exécution ultérieure.

Du fait de l'utilisation de l'interprète Tcl, il est donc possible de mélanger, dans le fichier de configuration, des instructions propres au langage de script Tcl et d'autres spécifiques du langage de script de la plate-forme. La structure de base d'un fichier est la suivante (le caractère '#' indique le début d'une ligne de commentaires) :

```
# paramètres généraux et déclaration des différentes
# familles (paramètres, géométrie, trajectoire, etc.)
proc families {} {
   ...
}

# declaration des lois des familles d'agents
proc laws {} {
   ...
}

# lecture des variables d'environnement
source $env(JDHRC)

# appel des différentes sous-procédures
families
laws
```

Le découpage en deux procédures distinctes n'est pas obligatoire mais correspond à un ordre imposé dans les déclarations (d'abord les familles et leurs paramètres, puis leurs comportements).

Pour la description d'une instruction, nous utiliserons le format suivant:

✔ **`nom_de_la_fonction param_1 ... param_n [param_facultatifs...]`**
(le symbole ✔ désigne une déclaration à inclure obligatoirement)
☛ Description de ce que fait la fonction;

- ✘ **`Param_1`** (type du paramètre) = description du paramètre;
  - **`Valeur_possible_1`** = description de la valeur;
  - ...
  - **`Valeur_possible_n`** = description de la valeur;
- ✘ **`...`**
- ✘ **`Param_n`** (type du paramètre) = description du paramètre;
- ✘ **`Param_facultatif_1`** = description du paramètre;
- ✘ **`...`**
- ✘ **`Param_facultatif_n`** = description du paramètre;

❢ Remarque
➴ <u>Exemple</u>

```
proc families {} {

  # Dans cette procédure sont placées les déclarations concernant
  # l'environnement et les différentes familles d'agents
  # d'information, d'environnement et de simulation

  # déclaration générales relatives à l'environnement et aux
  # paramètres globaux
  geometry ...
  ...

  # déclaration d'une grille d'agents d'environnement
  patch_family ...
    # paramétrage des agents d'environnement
    ...
  end_family

  # déclaration d'une famille d'agents de simulation ou
  # d'information
  family ...
    # paramétrage des agents de simulation
    ...
  end_family
}
```

Déclarations générales

✔ **geometry largeur hauteur x y tore continu_ou_discret**

☞ Définition de la géométrie de l'environnement simulé (voir IV.3.5);

- ✘ **largeur** (entier) = largeur de l'environnement simulé (en pixels)
- ✘ **hauteur** (entier) = hauteur de l'environnement simulé (en pixels)
- ✘ **x** (entier) = abcisse du coin supérieur gauche de l'environnement simulé (en pixels)
- ✘ **y** (entier) = ordonnée du coin supérieur gauche de l'environnement simulé (en pixels)
- ✘ **tore** (booléen) = environnement en forme de tore ou non
- ✘ **continu_ou_discret** (booléen) = déplacement continu ou discret des agents

➤ Exemple

```
# déclaration d'un environnement simulé de 400 pixels de haut et 400 pixels de large,
# dont le coin supérieur gauche est à la position (100; 100), en forme de tore, avec un
# déplacement continu des agents
geometry 400 400 100 100 1 1
```

---

globalParam nom_parametre val_ini val_min val_max

☞ déclare un paramètre global, accessible et modifiable par tous les agents;

- ✘ **nom_paramètre** (identificateur Tcl valide) = le nom du paramètre
- ✘ **val_ini** (entier) = la valeur initiale du paramètre
- ✘ **val_min** (entier) = la valeur minimale que peut prendre le paramètre
- ✘ **val_max** (entier) = la valeur maximale que peut prendre le paramètre

❢ L'utilisation de valeurs initiales, minimales et maximales sera sans doute rendue optionnelle par la suite;

➤ Exemple

```
# déclaration d'un paramètre global appelé param, initialisé à 0, et pouvant varier entre
# 0 et 10
globalParam param 0 0 10
```

---

sound nom_fichier

☞ charge en mémoire le fichier son désigné par **nom_fichier**, avant de pouvoir l'utiliser par la commande **playSound**;

- ✘ **nom_fichier** (nom de fichier Tcl) = nom du fichier son (au format Sun ".au");

➤ Exemple

```
# charge en mémoire le fichier toto.au
sound toto.au
```

Déclaration de familles d'agents d'environnement

```
patch_family nom type_agent nb_colonnes nb_lignes
  ...
end_family
```

☛ Déclaration d'une grille d'agents d'environnement; le paramétrage de la famille devra être fait entre les déclaration **patch_family** et **end_family**;

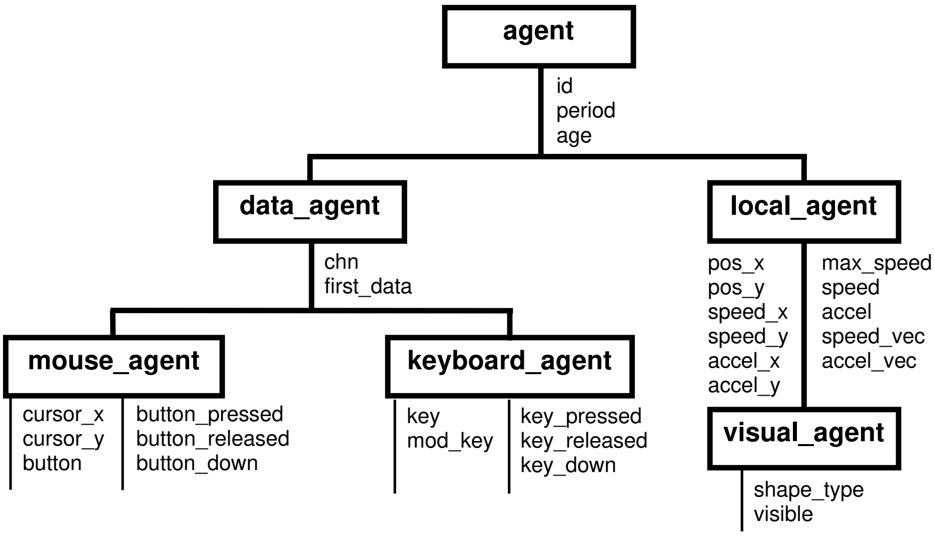
- ✘ **nom** (identificateur Tcl valide: chaîne de caractère alphanumérique libre, plus le caractère '_') = nom de la famille d'agents;
- ✘ **type_agent** (un des types réservés) = le type de l'agent; ce type est choisi parmi les types `local`, `rectangle`, `starpoly`, `text`, `image` (chacun de ces types sera décrit plus en détail par la suite);
  - `local` = agent localisé mais sans représentation graphique (classe local_agent);
  - `rectangle` = agent localisé de forme rectangulaire (classe rectangle_agent);
  - `starpoly` = agent localisé de forme "étoilée" (classe starpoly_agent);
  - `text` = agent localisée de représentation textuelle (classe text_agent);
  - `image` = agent localisée de représentation imagée (classe image_agent);
- ✘ **nb_colonnes** (entier) = le nombre de colonnes d'agents d'environnement;
- ✘ **nb_lignes** (entier)= le nombre de lignes d'agents d'environnement;

➘ Exemple

```
# déclaration d'une grille de 8 colonnes et 12 lignes d'agents d'environnements appelés
# local et représentés sous forme de rectangles
patch_family local rectangle 8 12
```

Déclaration de familles d'agents d'information ou de simulation

La figure ci-dessous montre l'arborescence des classes d'agents et leurs variables réservées associées. Un agent d'un certain type a accès à toutes les variables réservées associées à sa classe, en plus des variables réservées associées aux classes dont elle hérite. Les variables réservées associées aux classes **`mouse_agent`** et **`keyboard_agent`** sont quant à elles accessibles à tous les agents.




```
family nom type_agent nb_agents
  ...
end_family
```

☛ Déclaration d'une famille d'agents de simulation ou d'information le paramétrage de la famille devra être fait entre les déclaration **`family`** et **`end_family`**;

✘ **`nom`** (identificateur Tcl valide) = nom de la famille d'agents;;

✘ **`type_agent`** = le type de l'agent; ce type est choisi parmi les types d'agent de simulation (`agent`, `local`, `rectangle`, `starpoly`, `text`, `image`) ou parmi les types d'agents d'information (`mouse`, `keyboard`, `midi`, `meteo`);

- `agent` = agent sans localisation particulière ni représentation graphique;
- `local` = agent localisé mais sans représentation graphique (classe local_agent);

agents visuels

- `rectangle` = agent localisé de forme rectangulaire (classe rectangle_agent);
- `starpoly` = agent localisé de forme "étoilée" (classe starpoly_agent);
- `text` = agent localisée de représentation textuelle (classe text_agent);
- `image` = agent localisée de représentation imagée (classe image_agent);

agents d'information

- `mouse` = agent d'information qui gère la souris;
- `keyboard` = agent d'information qui gère le clavier;
- `midi` = agent d'information renvoyant les informations d'un fichier MIDI;
- `meteo` = agent d'information récupérant des informations météorologiques;

✘ **`nb_agents`** (entier) = nombre d'agents constituant la population initiale de la famille;

- Pour l'instant, les agents d'information ne sont pas localisés dans l'environnement et n'ont pas de représentation; ce qui sera sans doute modifié par la suite;

- Exemple

```
# déclaration d'une famille de 10 agents rectangulaires appelée toto
family toto rectangle 10
```

Caractérisation des agents de type `agent`

Nous décrivons ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents de type `agent`.

Variables réservées

Ces variables n'ont pas à être déclarées, elles sont définies pour tous les agents

- **`id`** (entier >= 0; lecture seule) = le numero d'identification de l'agent;
- **`period`** (entier >= 0; lecture/écriture) = la période d'activation de l'agent; mettre cette variable à 0 revient à désactiver l'agent (il ne pourra alors être réveillé que par un autre agent);
- **`age`** (entier >= 0; lecture seule) = le nombre de cycles écoulés depuis la création de l'agent;

Instructions spécifiques

Celles-ci doivent être placées entre les déclarations **`family`** et **`end_family`**

`internalParam nom_parametre val_ini val_min val_max`

☚ déclare un paramètre interne associé aux agents de la famille en cours de définition;

✘ **`nom_paramètre`** (identificateur Tcl valide) = le nom du paramètre
✘ **`valeur_initiale`** (entier) = la valeur initiale du paramètre
✘ **`valeur_min`** (entier) = la valeur minimale que peut prendre le paramètre
✘ **`valeur_max`** (entier) = la valeur maximale que peut prendre le paramètre

❢ L'utilisation de valeurs initiales, minimales et maximales sera sans doute rendue optionnelle par la suite;

➴ Exemple

```
# déclaration d'un paramètre interne appelé param, initialisé à 0, et pouvant varier entre
# 0 et 10
internalParam param 0 0 10
```

`tableau nom_tableau nb_valeurs [-f nom_fichier]`

☚ permet de charger en mémoire un tableau de valeurs (et éventuellement initialiser ses valeurs à partir d'un fichier);

✘ **`nom_tableau`** (identificateur Tcl valide) = nom du tableau
✘ **`nb_valeurs`** (entier) = le nombre de valeurs du tableau
✘ **`nom_fichier`** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier dans lequel sont enregistrées les valeurs du tableau (fichier texte, une valeur par ligne)

❢ Une interface spécifique permet de créer et d'éditer des courbes qui peuvent ensuite être enregistrées sous forme de tableaux de valeurs (voir Annexe B).

➘ Exemple

```
# déclaration d'un tableau appelé tab, pouvant contenir 100 valeurs, et initialisé à partir
# du fichier "fich_tab.txt"
tableau tab 100 –f "fich_tab.txt"
```

Caractérisation des agents de type `local`

Nous décrivons ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents de type `local`, qui correspondent à la classe local_agent (supra IV.3.5).

Variables réservées

Ces variables s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de type agent, puisque la classe local_agent est une sous-classe de la classe agent (voir hiérachie des classes);

- **pos_x** (réel; lecture/écriture) = l'abcisse de l'agent dans l'environnement;
- **pos_y** (réel; lecture/écriture) = l'ordonnée de l'agent dans l'environnement;
- **max_speed** (réel; lecture/écriture) = la vitesse maximale autorisée de l'agent;
- **speed** (réel; lecture/écriture) = la norme de la vitesse de l'agent;
- **speed_vec** (vecteur de 2 réels; lecture/écriture) = le vecteur vitesse de l'agent;
- **speed_x** (réel; lecture/écriture) = la composante en x du vecteur vitesse;
- **speed_y** (réel; lecture/écriture) = la composante en y du vecteur vitesse;
- **accel** (réel; lecture/écriture) = la norme de l'accélération de l'agent;
- **accel_vec** (vecteur de 2 réels; lecture/écriture) = le vecteur accélération de l'agent;
- **accel_x** (réel; lecture/écriture) = la composante en x du vecteur accélération;
- **accel_y** (réel; lecture/écriture) = la composante en y du vecteur accélération;

❢ A chaque cycle de simulation, la nouvelle position est déterminée suivant le calcul suivant :

```
speed_vec = speed_vec + accel_vec / 2
pos_x = pos_x + speed_x
pos_y = pos_y + speed_y
```

Instructions spécifiques

Ces instructions s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de type agent, puisque la classe local_agent est une sous-classe de la classe agent (voir hiérarchie des classes); celles-ci doivent également être placées entre les déclarations **family** et **end_family;**

externalParam nom type int_ini int_min int_max dist_ini dist_min dist_max

☛ déclare un paramètre externe associé aux agents de la famille en cours de définition;

✘ **nom** (identificateur Tcl valide) = le nom du paramètre;

✘ **type** (un des types réservés) = le type de propagation du signal; ce type est choisi parmi les types `linear, 1/r, 1/r2`;
- `linear =` décroissance linéaire du signal en fonction de la distance au point d'émission;
- `1/r` = décroissance du signal en 1/r en fonction de la distance au point d'émission;
- `1/r2` = décroissance du signal en 1/r en fonction de la distance au point d'émission;

✘ **int_ini** (entier) = la valeur initiale de l'intensité

✘ **int_min** (entier) = la valeur minimale de l'intensité

✘ **int_max** (entier) = la valeur maximale de l'intensité

- ✘ **dist_ini** (entier) = la valeur initiale de la distance de propagation (en pixels)
- ✘ **dist_min** (entier) = la valeur minimale de la distance de propagation (en pixels)
- ✘ **dist_max** (entier) = la valeur maximale de la distance de propagation (en pixels)

❢ L'utilisation de valeurs initiales, minimales et maximales sera sans doute rendue optionnelle par la suite;

➘ Exemple

```
# déclaration d'un paramètre externe appelé param, ayant une décroissance linéaire en
# fonction de la distance à l'agent, une intensité de 10 au niveau de l'agent, pouvant
# varier entre 0 et 10 et une distance de propagation de 50, pouvant varier entre 0 et
# 400
externalParam param linear 10 0 100 50 0 400
```

---

position posx posy

☚ donne la position initiale d'un des agents de la famille

- ✘ **posx** (entier) = position initiale de l'agent en abcisse (en pixels)
- ✘ **posy** (entier) = position initiale de l'agent en ordonnée (en pixels)

❢ Pour une famille donnée, on peut utiliser cette instruction au maximum un nombre de fois égal au nombre d'agents de la famille. Les agents dont la position n'est pas initialisée explicitement seront positionnés aléatoirement dans l'environnement simulé;

➘ Exemple

```
# positionne un des agents de la famille à la position (100; 100)
position 100 100
```

---

trajec accel_tang accel_norm duree_min duree_max per_min per_max

☚ associe une trajectoire particulière aux agents de la famille. Les agents peuvent avoir une trajectoire particulière qu'ils parcourent à intervalle plus ou moins régulier. Cette trajectoire est spécifiée sous la forme d'une suite d'accélérations tangentielles (portées par le vecteur vitesse) et d'accélérations normales (orthogonales au vecteur vitesse). Ces suites d'accélérations sont enregistrées dans deux fichiers distincts, générés grâce à une interface dédiée décrite dans l'annexe B.

- ✘ **accel_tang** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier d'accélérations tangentielles
- ✘ **accel_norm** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier d'accélérations normale
- ✘ **duree_min**, **duree_max** (entiers) = la durée de la trajectoire est choisie aléatoirement entre **duree_min** et **duree_max** (en nombre de cycles de simulation)
- ✘ **per_min**, **per_max** (entiers) = la trajectoire se déclenche après un nombre de cycles de simulation compris entre **per_min** et **per_max**

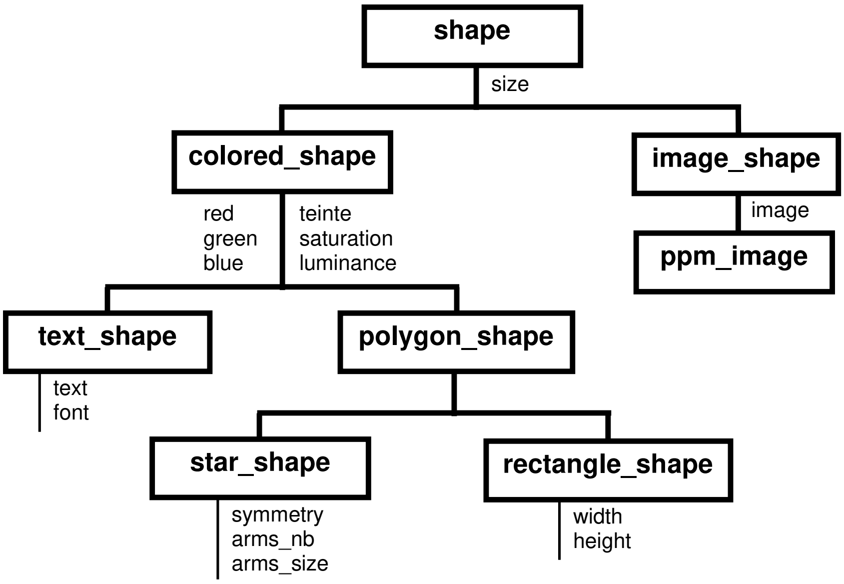
❢ une interface spécifique permet de créer et d'éditer les trajectoires des agents (voir Annexe B);

➘ Exemple

```
# positionne un des agents de la famille à la position (100; 100)
position 100 100
```

Caractérisation des agents visuels

La caractéristique essentielle des agents visuels est qu'ils sont associés à une forme, qui les représente et qu'ils peuvent modifier. La figure ci-dessous montre la hiérarchie des classes de formes utilisables pour la représentation visuelle des agents, avec leurs paramètres réservés respectifs.



Nous décrivons donc ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents visuels, c'est-à-dire correspondant à la classe visual_agent (types `rectangle`, `starpoly`, `text`, `image`).

Variables réservées

Ces variables s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent et local_agent, puisque la classe visual_agent est sous-classe de la classe local_agent (voir hiérarchie des classes);

- **`visible`** (réel; lecture/écriture) = indique si l'agent doit être affiché;
- **`shape`** (chaîne de caractères; lecture/écriture) = le type de forme de l'agent ('rectangle', 'starpoly', 'text', 'image');
- **`size`** (réel; lecture/écriture) = la taille de l'agent;

- **`mouse_over`** (booléen; lecture) = lorsque l'agent d'information `mouse_agent` est utilisé, la variable réservée `mouse_over`, permet de savoir si le curseur de la souris est au-dessus de la forme;

Instructions spécifiques

Ces instructions s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent et local_agent, puisque la classe visual_agent est sous-classe de la classe local_agent (voir hiérarchie des classes); celles-ci doivent également être placées entre les déclarations **`family`** et **`end_family;`**

`taille taille_ini taille_min taille_max`

☛ donne la taille de l'agent

- ✘ **`taille_ini`** (réel) = taille initiale de l'agent;
- ✘ **`taille_min`** (réel) = taille minimale de l'agent;
- ✘ **`taille_max`** (réel) = taille maximale de l'agent;

➘ Exemple

```
# la taille initiale des agent est de 10 et peut varier entre 1 et 100
taille 10 1 100
```

Caractérisation des agents colorés

Nous décrivons ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents colorés, c'est-à-dire dont la forme correspondant à une sous-classe de colored_shape (types `rectangle`, `starpoly`, `text`).

Variables réservées

Ces variables s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent puisqu'il s'agit d'agents correspondant à la classe visual_agent (voir hiérarchie des classes);

- **`red`** (entier 0-65535; lecture/écriture) = composante rouge de la couleur;
- **`green`** (entier 0-65535; lecture/écriture) = composante verte de la couleur;
- **`blue`** (entier 0-65535; lecture/écriture) = composante bleue de la couleur;
- **`teinte`** (entier 0-360; lecture/écriture) = composante de teinte de la couleur;
- **`saturation`** (entier 0-100; lecture/écriture) = composante de saturation de la couleur;
- **`luminance`** (entier 0-100; lecture/écriture) = composante de luminance de la couleur;

❢ L'agent peut modifier sa couleur soit dans le modèle Rouge-Vert-Bleu (variables **`red`**, **`green`**, **`blue`**), soit dans le modèle Teinte-Saturation-Luminance (variables **`teinte`**, **`saturation`**, **`luminance`**). Lorsque le système fonctionne avec une palette de couleurs, un agent, par défaut, n'a pas de cellule de couleur dans la palette qui lui soit attribuée.

Instructions spécifiques

Ces instructions s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent; celles-ci doivent également être placées entre les déclarations **`family`** et **`end_family;`**

`private_color`

☛ attribue à chaque agent de la famille une cellule de couleur qui lui est propre;

`common_color`

☛ attribue une cellule de couleur pour l'ensemble de la famille; tous les agents de la même famille auront donc la même couleur;

`rgb red green blue`

☛ initialise la couleur des agents de la famille dan le modèle Rouge-Vert-Bleu

✘ **`red`** (entier 0-65535) = composante rouge de la couleur;
✘ **`green`** (entier 0-65535) = composante verte de la couleur;
✘ **`blue`** (entier 0-65535) = composante bleue de la couleur;

➘ <u>Exemple</u>

```
# donne la couleur blanche aux agents
rgb 65535 65535 65535
```

`tsl teinte saturation luminance`

☛ initialise la couleur des agents de la famille dans le modèle Teinte-Saturation-Luminosité

- ✘ **`teinte`** (entier 0-360) = composante de teinte de la couleur;
- ✘ **`saturation`** (entier 0-100) = composante de saturation de la couleur;
- ✘ **`luminance`** (entier 0-100) = composante de luminance de la couleur;

➤ Exemple

```
# donne la couleur rouge aux agents
tsl 0 100 100
```

Caractérisation des agents de type `rectangle`

Nous décrivons ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents de type `rectangle`, dont la forme correspond à la classe `rectangle_shape`.

Variables réservées

Ces variables s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent, ainsi qu'à celles définies pour les formes de type colored_shape, puisque la classe rectangle_shape dérive de la classe polygon_shape, elle-même sous-classe de colored_shape;

- **`width`** (réel; lecture/écriture) = largeur de la forme;
- **`height`** (réel; lecture/écriture) = hauteur de la forme;

❢ La largeur en pixels du rectangle est donnée par `width*size`, et la hauteur par `height*size`;

Instructions spécifiques

Ces instructions s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent, ainsi qu'à celles définies pour les formes de type colored_shape, puisque la classe rectangle_shape dérive de la classe polygon_shape, elle-même sous-classe de colored_shape; celles-ci doivent également être placées entre les déclarations **`family`** et **`end_family;`**

`largeur largeur_ini largeur_min largeur_max`

☚ donne la largeur de l'agent

✘ **`largeur_ini`** (réel) = largeur initiale de l'agent;
✘ **`largeur_min`** (réel) = largeur minimale de l'agent;
✘ **`largeur_max`** (réel) = largeur maximale de l'agent;

➘ Exemple

```
# la largeur initiale des agent est de 10 et peut varier entre 1 et 100
largeur 10 1 100
```

`hauteur hauteur_ini hauteur_min hauteur_max`

☚ donne la hauteur de l'agent

✘ **`hauteur_ini`** (réel) = hauteur initiale de l'agent;
✘ **`hauteur_min`** (réel) = hauteur minimale de l'agent;
✘ **`hauteur_max`** (réel) = hauteur maximale de l'agent;

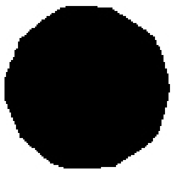
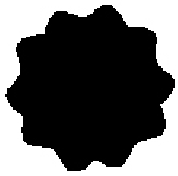
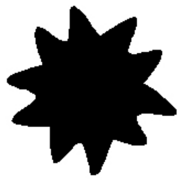
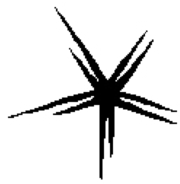
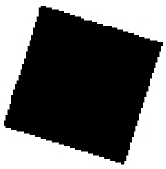
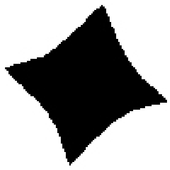
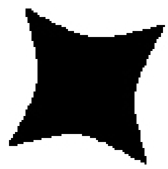
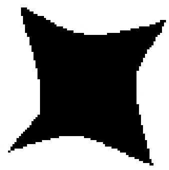
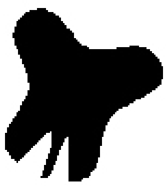
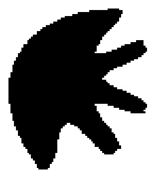
➘ Exemple

```
# la hauteur initiale des agent est de 10 et peut varier entre 1 et 100
hauteur 10 1 100
```

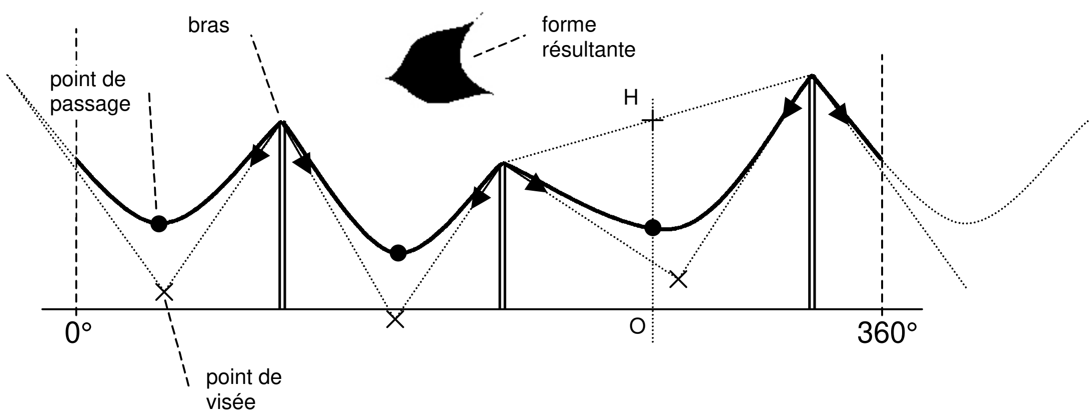
Caractérisation des agents de type `starpoly`

Nous décrivons ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents de type `starpoly`, dont la forme correspond à la classe `starpoly_shape`.

La représentation graphique des agents feuilles, herbivores et carnivores du *Jardin des Hasards* correspond à une forme polygonale générée par un algorithme unique utilisé avec différents paramétrages. Le tableau ci-dessous reproduit différentes autres formes obtenues avec ce même algorithme (voir plus loin la description du paramétrage).

 bras 5 5 1 1 1 0 passage 0.49 0.51 1 1 visee 0.49 0.51 1 1	 bras 5 5 1 1 1 0 passage 0.49 0.51 1 1 visee 0.49 0.51 2 2	 bras 5 5 1 1 1 0 passage 0.49 0.51 1 1 visee 0.49 0.51 5 5	 bras 5 5 1 1 1 0 passage 0.49 0.51 1 1 visee 0.49 0.51 5 5
 bras 4 4 1 1 1 0 passage 0.49 0.51 0.7 0.7 visee 0.49 0.51 0.7 0.7	 bras 4 4 1 1 1 0 passage 0.2 0.8 0.6 0.6 visee 0.2 0.8 0.6 0.6	 bras 4 4 1 1 1 0 passage 0.49 0.51 0.5 0.5 visee 0.49 0.51 0.5 0.5	 bras 4 4 1 1 1 0 passage 0.1 0.9 0.5 0.5 visee 0.1 0.9 0.5 0.5
 bras 5 5 1 1 1 0 passage 0.49 0.51 0.5 0.5 visee 0.49 0.51 1.5 1.5	 bras 5 5 1 1 0 0 passage 0.49 0.51 0.5 0.5 visee 0.49 0.51 1.5 1.5	 bras 5 5 1 1 0 0 passage 0.49 0.51 0.5 0.5 visee 0.49 0.51 1.5 1.5	 bras 5 5 1 1 0 0 passage 0.49 0.51 0.5 0.5 visee 0.49 0.51 1.5 1.5

La génération des formes repose sur la construction d'un contour en représentation polaire, donnant la distance d'un point du contour au centre de la forme en fonction de l'angle de 0° à 360° :



Ce contour est déterminé par interpolation à partir de quelques points particuliers (voir figure) : les sommets des bras de l'étoile, et entre deux bras consécutifs, un point de passage par lequel dit passer le contour, et un point de visée qui définit la pente au niveau de chacun des bras.

Variables réservées

Ces variables s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent, ainsi qu'à celles définies pour les formes de type colored_shape, puisque la classe starpoly_shape dérive de la classe polygon_shape, elle-même sous-classe de colored_shape;

- **`arms_nb`** (entier; lecture/écriture) = le nombre de bras de la forme;
- **`symmetry`** (booléen; lecture/écriture) = répartition symétrique ou non des bras;
- **`orient`** (booléen; lecture/écriture) = orientation ou non de la forme en fonction de ses déplacements;
- **`head`** (réel 0-360; lecture/écriture) = la direction de la forme;
- **`magnet`** (vecteur de 2 réels, lecture/écriture) = un vecteur qui détermine une attirance pour la forme: les bras de la forme sont attirés dans la direction de ce vecteur, ce qui produit une déformation;

Instructions spécifiques

Ces instructions s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent, ainsi qu'à celles définies pour les formes de type colored_shape, puisque la classe starpoly_shape dérive de la classe polygon_shape, elle-même sous-classe de colored_shape; celles-ci doivent également être placées entre les déclarations **`family`** et **`end_family;`**

`bras nb_min nb_max longueur_min longueur_max symétrie orientation`

☞ spécifie les caractéristiques des bras de la forme

✘ **`nb_min, nb_max`** (entiers) = nombres minimal et maximal de bras de la forme de l'agent; le nombre de bras est choisi aléatoirement entre ces deux valeurs;
✘ **`longueur_min, longueur_max`** (réels) = longueurs minimale et maximale des bras de la forme de l'agent; la taille de chaque bras est choisie aléatoirement entre ces deux valeurs. Les longueurs sont ensuite normalisées de manière à ce que la moyenne des longueurs soit égale à 1; de ce fait, le couple de valeur (0.5-1) est équivalent au coule (5-10)
✘ **`symétrie`** (booléen 0/1) = répartition régulière ou non des bras de la forme de l'agent;
✘ **`orientation`** (booléen 0/1) = autorise ou non les rotations de la forme lors de son déplacement;

➴ Exemple

```
# la forme aura trois ou quatre bras, dont la longueur peut varier entre 0.5 et 1,
# répartis régulièrement, et ne s'oriente pas lors de son déplacement
bras 3 4 0.5 1 1 0
```

`passage angle_min angle_max hauteur_min hauteur_max`
`visee angle_min angle_max hauteur_min hauteur_max`

☞ Délimite les zones dans lesquelles sont les points de passage et de visée sont choisis aléatoirement

- ✘ **`angle_min, angle_max`** (réel 0-1, angle_max > angle_min) = angles minimal et maximal entre lesquels l'angle du point est choisi (abcisse du point en représentation polaire, voir figure). Dans la représentation polaire, une valeur de 0 correspond au bras gauche, une valeur de 1 correspond au bras droit.
- ✘ **`hauteur_min, hauteur_max`** (réels, >= 0 pour les points de passage, hauteur_max > hauteur_min) = hauteurs minimale et maximale entre lesquelles la hauteur du point est choisie aléatoirement (ordonnée du point en représentation polaire, voir figure). Les hauteurs sont indiquées relativement à la hauteur OH (voir figure), une valeur égale à 1 correspondant au point H, c'est-à-dire dans l'alignement des deux bras, ce qui se traduit ensuite par une forme arrondie.

➘ Exemple

```
# l'angle des points de passage est positionné entre 10 et 30% de l'intervalle entre les
# deux bras, et entre 30 et 50% de la hauteur OH.
passage 0.1 0.3 0.3 0.5
```

Caractérisation des agents de type `text`

Nous décrivons ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents de type `text`, dont la forme correspond à la classe `text_shape`.

Variables réservées

Ces variables s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent, ainsi qu'à celles définies pour les formes de type colored_shape, puisque la classe text_shape dérive de la classe colored_shape;

- **`text`** (chaîne de caractères; lecture/écriture) = le texte associé à la forme;
- **`font`** (chaîne de caractères; lecture/écriture) = la fonte avec laquelle le texte sera affiché;

Instructions spécifiques

Ces instructions s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent, ainsi qu'à celles définies pour les formes de type colored_shape, puisque la classe text_shape dérive de la classe colored_shape; celles-ci doivent également être placées entre les déclarations **`family`** et **`end_family;`**

`texte "texte de la forme"`

☛ initialise le texte associé à la forme

✘ **`"texte de la forme"`** (chaîne de caractères) = texte associé à l'agent;

➘ <u>Exemple</u>

```
# associe à l'agent le texte "je suis un agent texte"
texte "je suis un agent texte"
```

`fonte nom_de_la_fonte`

☛ initialise la fonte avec laquelle sera affiché le texte

✘ **nom_de_la_fonte** (chaîne de caractères) = nom de la fonte associée à l'agent, au format X11;

➘ <u>Exemple</u>

```
# associe à l'agent la fonte helvetica, taille 14
fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-14-*-*-*-*-*-*-*"
```

Caractérisation des agents de type `image`

Nous décrivons ici les variables réservées et les instructions qui se réfèrent spécifiquement aux agents de type `image`, dont la forme correspond à la classe `image_shape`.

Variables réservées

Ces variables s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent;

- **`image`** (chaîne de caractères; lecture/écriture) = le nom du fichier image associé à la forme;

Instructions spécifiques

Ces instructions s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de types agent, local_agent, et visual_agent; celles-ci doivent également être placées entre les déclarations **`family`** et **`end_family;`**

`image nom_du_fichier`

☚ spécifie le nom du fichier image

✘ **`nom_du_fichier`** (nom de fichier Tcl) = texte associé à l'agent;

❢ Les fomats reconnus sont le format ppm et un format spécifique (extension .jdh), plus rapide à charger;

➴ Exemple

```
# associe à l'agent l'image contenue dans le fichier "image.ppm"
image "image.ppm"
```

Caractérisation des agents d'information

Nous décrivons ici les variables réservées qui se réfèrent spécifiquement aux agents d'information, c'est-à-dire ceux qui dérivent de la classe data_agent (`meteo_agent`, `midi_agent`, `keyboard_agent`, `mouse_agent`).

Data_agent

Ces variables sont définies pour tous les agents qui dérivent de la classe data_agent, et s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de type agent;

- **`chn`** (entier; lecture) = le numéro du canal d'information dans lequel l'agent place des données; lorsque l'agent utilise plusieurs canaux, **`chn`** désigne le premier canal utilisé;
- **`first_data`** (entier; lecture) = l'indice de la première cellule du canal utilisée numéro du canal d'information dans lequel l'agent place des données;

Mouse_agent

La classe mouse_agent correspond à un agent d'information (nom de famille réservé `mouse`) chargé de surveiller les événements de la souris et de mettre à jour un certain nombre de variables réservées. Celles-ci sont accessibles à tous les agents de simulation et d'environnement;

- **`cursor_x`, `cursor_y`** (entiers; lecture) = coordonnées du curseur de la souris;
- **`button_pressed`** (booléen 0/1; lecture) = indique qu'un des boutons de la souris a été enfoncé;
- **`button_released`** (booléen 0/1; lecture) = indique qu'un des boutons de la souris a été relâché;
- **`button_down`** (booléen 0/1; lecture) = indique qu'un des boutons de la souris est enfoncé;
- **`button`** (entier; lecture) = indique quel est le bouton concerné lorsque l'une des 3 variables précédentes vaut 1;

Keyboard_agent

La classe keyboard_agent correspond à un agent d'information (nom de famille réservé `keyboard`) chargé de surveiller les événements du clavier et de mettre à jour un certain nombre de variables réservées. Celles-ci sont accessibles à tous les agents de simulation et d'environnement;

- **`key_pressed`** (booléen 0/1; lecture) = indique qu'une des touches du clavier a été enfoncée;
- **`key_released`** (booléen 0/1; lecture) = indique qu'une des touches du clavier a été relâchée;
- **`key_down`** (booléen 0/1; lecture) = indique qu'une des touches du clavier est enfoncée;
- **`key`** (entier; lecture) = indique quelle est la touche concernée lorsque l'une des 3 variables précédentes vaut 1;
- **`mod_key`** (entier; lecture) = indique si une touche de contrôle est enfoncée (Ctrl, Alt, Shift, Echap);

Meteo_agent

Ces variables sont définies pour les agents de la classe meteo_agent (nom de famille réservé `meteo`), et s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de type data_agent;

- **`code_aeroport`** (chaîne de 4 caractères; lecture/écriture) = le code de l'aéroport d'où récupérer les données;

Midi_agent

Ces variables sont définies pour les agents de la classe midi_agent (nom de famille réservé `midi`), et s'ajoutent à celles déjà définies pour les agents de type data_agent;

- **`file`** (nomde fichier Tcl; lecture/écriture) = le nom du fichier midi utilisé;
- **`playing`** (booléen 0/1; lecture/écriture) = indique si l'agent doit jouer le fichier; permet de faire une pause, et de reprendre par la suite;

```
proc laws {} {

   # Dans cette procédure sont placées les scripts définissant les
   # comportements des agents. Ces scripts sont de quatre types :
   # les scripts d'initialisation (init), d'activation
   # individuelle (activate) et collective (common_activate)
   # et de terminaison (end).

   # script d'initialisation de la famille d'agents appelée toto
   init toto
   ...
   end_init

   # script d'initialisation de la famille d'agents appelée toto
   common_activate toto
   ...
   end_common_activate

   # script d'initialisation de la famille d'agents appelée toto
   activate toto
   ...
   end_activate

   # script de terminaison de la famille d'agents appelée toto
   activate toto
   ...
   end_activate

}
```

init nom_famille
...
end_init

☛ encadre la définition du script d'initialisation des agents de la famille **nom_famille**. Ce script est exécuté lors de la création de l'agent.

---

activate nom_famille
...
end_activate

☛ encadre la définition du script d'activation des agents de la famille **nom_famille**. Ce script est exécuté, pour chaque agent de la famille, à intervalles régulier, définis par la variable réservée **period**.

---

common_activate nom_famille
...
end_common_activate

☛ encadre la définition du script d'activation commun des agents de la famille **nom_famille**. Ce script est exécuté, une seule fois pour la famille, à chaque cycle de simulation. Initialement introduite pour prendre en compte la couleur identique de tous les agents de certaines famille, ce script pourra être utilisé dans l'avenir pour prendre en compte des variables quelconques, caractéristiques d'une famille et non d'un agent particulier de la famille.

```
end nom_famille
   ...
end_end
```

☞ encadre la définition du script de terminaison de la famille **`nom_famille`**. Ce script est exécuté lors de la suppression de l'agent.

✘ **`nom_famille`** = le nom d'une famille d'agents de simulation ou d'agents d'environnement

❢ Contrairement aux instructions décrites pour la procédure families, qui étaient exécutées au moment de l'interprétation du fichier, les instructions décrites ci-après sont converties en un tableau d'instructions dont l'agent déclenchera lui-même l'exécution, au moment de son initialisation, de son exécution ou de sa terminaison.

Instructions et variables réservées globales

Nous décrivons ici les instructions ainsi que les variables réservées qui ne concernent pas directement un agent particulier, donc sont manipulables par tous les agents

Variables réservées

Ces variables sont globales et accessibles à tous les agents.

- **day** (entier 0-365; lecture/écriture) = le jour de l'année (initialisé au jour courant);
- **hour** (entier 0-23; lecture/écriture) = l'heure courante (initialisée à l'heure courante);
- **min** (entier 0-1439; lecture/écriture) = l'heure courante en minutes (initialisée à l'heure courante);
- **sec** (entier 0-86399; lecture/écriture) = l'heure courante en secondes (initialisée à l'heure courante);
- **sec_reel** (entier 0-86399; lecture) = l'heure courante du système en secondes (non modifiable)

- **viscosity** (réel 0-1; lecture/écriture) = à chaque cycle, les agents sont freinés suivant la formule `speed_vec = speed_vec * viscosity`. Le freinage est nul lorsque la variable vaut 1, maximal lorsqu'elle vaut 0;

- **data** (tableau de réels à deux dimensions; lecture/écriture) = structure de données partagée utilisée par les agents d'information pour échanger de l'information avec les agents de simulation. Le nombre de canaux d'information est donné par la variable channels_nb; le nombre de données dans chaque canal est accessible à l'indice –1 du tableau;
- **channels_nb** (entier 0-n; lecture) = nombre de canaux d'information dans le tableau **data**;

Instructions générales

Les instructions décrites pour la procédure **families** sont exécutées au moment de l'interprétation du fichier. L'exécution des instructions qui suivent sont provoquées par l'agent lui-même, au cours de son initialisation, de son activation ou de sa terminaison. Ces instructions ne s'appliquent pas spécifiquement à un agent particulier;

load fichier_configuration

☛ charge un nouveau fichier de configuration à la place du fichier de configuration courant. Le système est réinitialisé avec le nouveau fichier de configuration;

✘ **fichier_configuration** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier de configuration à charger

➘ <u>Exemple:</u>

```
# charge le fichier correspondant à l'orchestre à la place du fichier courant
load "orchestre.ini"
```

quit
☞ termine l'exécution du programme

---

update
☞ provoque le réaffichage de tous les agents

---

set_cursor fich_curseur.xbm fich_masque.xbm pointeur_x pointeur_x
☞ change le curseur;
✘ **fich_curseur.xbm** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier contenant l'image du curseur (format XBitmap)
✘ **fich_masque.xbm** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier contenant le masque (format XBitmap); la taille du masque doit être la même que celle du curseur; Seuls les pixels du curseur correspondant à un pixel noir du masque seront affichés;
✘ **pointeur_x, pointeur_y** (entiers) = les coordonnées du point servant à pointer;

➘ Exemple:
charge le fichier correspondant à l'orchestre à la place du fichier courant
load ″orchestre.ini″

---

puts {message}
☞ écrit le texte **message** à l'écran
fputs nom_fichier message
☞ écrit le texte **message** dans le fichier **nom_fichier**

✘ **message** (chaîne de caractères) = le texte à écrire, construit selon les règles présentées plus loin
✘ **nom_fichier** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier dans lequel écrire le message

➘ Exemple:
affiche le texte "Hello world" à l'écran
puts {'Hello world'}
écrit dans le fichier **fichier.txt** le texte "je suis l'agent n° ", suivi du numéro
d'identification de l'agent
fputs ″fichier.txt″ {'je suis l'agent n° ' + $id}

---

push_data numero_canal {expression}
☞ place la valeur résultant de l'evaluation d'**expression** dans le canal de communication désigné par **numero_canal**
flush_data numero_canal indice nombre_de_donnees
☞ supprime **nombre_de_donnees** cellules dans le canal de communication **numero_canal** à partir de l'indice **indice**

✘ **numero_canal** (entier) = le numéro du canal de communication;
✘ **expression** = une expression construite selon les règles présentées par la suite;
✘ **indice** (entier) = l'indice de la première cellule à supprimer ;
✘ **nombre_de_données** (entier) = le nombre de cellules à supprimer dans le canal ;

❢ Les agents peuvent également accéder aux canaux de communication par l'intermédiaire de la variable data

➘ Exemple:
place son numéro d'identification dans le canal de communication n° 1
push_data 1 {$id}
supprime trois cellules du canal de communication n° 1 à partir de l'indice 0
flush_data 1 0 3

play_sound nom_fichier attend_audio_libre

☛ envoie le fichier son désigné par **nom_fichier** sur la sortie audio

✘ **nom_fichier** (nom de fichier Tcl) = le nom du fichier son (format Sun, extension .au);

✘ **attend_audio_libre** (booléen 0/1) = si la sortie audio est occupée au moment de jouer le son, le son est mis en attente si le paramètre vaut 1, sinon il est abandonné;

➘ Exemple:
joue le fichier **son.au**, en attendant éventuellement que la sortie audio soit libre
play_sound "son.au" 1

Instructions utilisables dans les comportements des agents

Les instructions décrites pour la procédure **families** sont exécutées au moment de l'interprétation du fichier. L'exécution des instructions qui suivent sont provoquées par l'agent lui-même, au cours de son initialisation, de son activation ou de sa terminaison. Ces instructions ne sont pas spécifiques d'un type d'agent particulier, sauf rgb et tsl qui ne sont utilisables que par les agents colorées (dérivant de la classe colored_agent).

---

set nom_variable {expression}

☛ affecte à la variable **nom_variable** le résultat de l'évaluation d'**expression** (voir plus loin la construction des expressions)

dset id_agent nom_variable {expression}

☛ affecte à la variable **nom_variable** de l'agent **id_agent**, le résultat de l'évaluation d'**expression** (voir plus loin la construction des expressions)

✘ **nom_variable** = un nom de variable (paramètre interne ou externe, variable locale, globale ou variable réservée);
✘ **expression** = une expression construite selon les règles présentées par la suite;
✘ **id_agent** (entier) = le numéro d'identification d'un agent

❢ pour l'instruction set, si **nom_variable** ne correspond pas au nom d'une variable existante, une nouvelle variable locale est créée pour l'agent;
❢ pour les paramètres externes, affecter une valeur positive au paramètre revient à modifier son intensité, affecter une valeur négative revient à modifier la distance de propagation du signal

➴ <u>Exemple:</u>

```
# affecte la valeur 10 à la variable réservée period
set period 10
# affecte à la variable réservée speed de l'agent dont le numéro d'identification est égal
# à la valeur de la variable locale no_agt, la valeur de la variable réservée speed
dset {$no_agt} speed {$speed}
```

---

reproduce

☛ l'agent produit un double de lui même

❢ Cette instruction devrait prochainement accepter comme paramètre le numéro d'identification d'un autre agent de manière à permettre une véritable reproduction entre deux agents. Elle devrait par ailleurs renvoyer le numéro d'identification de l'agent nouvellement créé.

---

die

☛ l'agent meurt et est supprimé de la liste des agents gérés par l'ordonnanceur

---

rgb red green blue
tsl teinte saturation luminance

☛ modifie la couleur de l'agent (voir caractérisation des agents colorés)

structures de contrôle pour les comportements des agents

L'exécution des instructions décrites précédemment est contrôlée par l'intermédiaire d'un certain nombre de structures de contrôle.

```
if {expression_conditionnelle}
  # premier bloc d'instruction
  ...
else
  # deuxième bloc d'instruction
  ...
fi
```

☛ exécute le premier bloc d'instructions si l'expression est vérifiée, sinon exécute le deuxième bloc d'instructions (voir plus loin la construction des expressions conditionnelles;

✘ **expression_conditionnelle** = une expression construite selon les règles de syntaxe présentée par la suite;

➘ Exemple:

affiche un message différent en fonction de l'âge de l'agent

```
if {$age > 1000}
  puts {'je suis né depuis plus de 1000 cycles'}
else
  puts {'je suis né depuis moins de 1000 cycles'}
fi
```

```
switch
  case {expression_conditionnelle_1}
    # bloc d'instruction 1
    ...
  case {expression_conditionnelle_2}
    # bloc d'instruction 2
    ...
  # optionnel
  default
    # bloc d'instruction par défaut
    ...
end_switch
```

☛ parcourt les différentes expressions conditionnelles jusqu'à ce que l'une d'entre elles soit satisfaite. Dès que l'une des conditions est vérifiées, le bloc d'instruction correspondant est exécuté puis l'exécution sort du **switch**; si aucune des conditions n'est vérifiée et qu'il y a une instruction **default**, le bloc d'instruction correspondant est exécuté;

❢ correspond en fait à une suite de **if ... then ... else** imbriqués; devra sans doute être remplacé par une instruction **elseif**;

➘ Exemple:

affiche un message différent en fonction de l'âge de l'agent

```
switch
  case {$age < 10}
    puts {'je suis né depuis moins de 10 cycles'}
  case {$age < 100}
    puts {'je suis né depuis une période comprise entre 10 et 100 cycles'}
  default
    puts {'je suis né depuis plus de 100 cycles'}
end_switch
```

```
while {expression_conditionnelle}
  # bloc d'instructions
  ...
end_while
```

☚ exécute le bloc d'instructions tant que l'expression est vérifiée;

➘ Exemple:

compte jusqu'à 1000

```
while {$i < 1000}
  set i {$i + 1}
end_while
```

Construction des expressions

Il y a quatre types d'expressions en fonction du type des arguments : les expressions arithmétiques, vectorielles, textuelles et booléennes ;

Généralités

Le fichier étant interprété par l'interpréteur Tcl, il peut y avoir des interférences entre la syntaxe Tcl [Oustershout 1994] et la syntaxe de la plate-forme.

- l'usage des accolades permet d'en protéger le contenu et en empêcher l'interprétation par Tcl. L'expression entre accolades est transmise comme une chaîne de caractères à l'interprète de la plate-forme.
- les variables utilisées dans les expressions sont précédées du symbole **$**
- la fonction **value** permet de demander la valeur d'une variable d'un agent différent:
  - **value(no_id)(nom_variable)** = renvoie la valeur de la variable désignée par **nom_variable** de l'agent de numéro d'identification **no_id**;

Expressions arithmétiques

Les expressions arithmétiques utilisent les règles suivantes, qui reprennent pour l'essentiel la syntaxe du C;

- utilisation des quatre opérateurs arithmétiques **+**, **-**, *****, **/**;
- notation infixée (opérateur entre les deux opérandes);
- évaluation de gauche à droite;
- les opérateurs ***** et **/** ont une priorité plus importante que les opérateurs **+** et **-**;
- l'utilisation de parenthèses **()** permet de modifier l'ordre d'évaluation;
- les fonctions suivantes prennent et renvoient un argument réel (éventuellement entier):
  - **sqr(arg)** = élève son argument au carré;
  - **sqrt(arg)** = renvoie la racine carré de son argument;
  - **exp(arg)** = fonction exponentielle;
  - **log(arg)** = fonction logarithme à base 10;
  - **ln(arg)** = fonction logarithme népérien;
  - **sin(arg)** = fonction sinus (argument en degrés);
  - **cos(arg)** = fonction cosinus (argument en degrés);
  - **tan(arg)** = fonction tangente (argument en degrés);
  - **round(arg)** = arrondit son argument à l'entier le plus proche;
  - **floor(arg)** = arrondit son argument à l'entier inférieur le plus proche;
  - **ceil(arg)** = arrondit son argument à l'entier supérieur le plus proche;
  - **rand(arg)** = renvoie une valeur réelle aléatoire entre 0 et **arg** (non compris);
  - **irand(arg)** = renvoie une valeur entière aléatoire entre 0 et **arg** (non compris);
- les fonctions suivantes prennent en argument le nom d'un paramètre externe et renvoient un argument réel:
  - **intensity(arg)** = renvoie l'intensité du paramètre externe (signal propagé dans l'environnement) spécifié à l'endroit où se trouve l'agent; la plate-forme calcule d'abord la somme vectorielle des signaux du type spécifié émis par les différents agents, puis renvoie la norme du vecteur obtenu;
  - **max_intensity(arg)** = renvoie l'intensité du signal le plus intense parmi les signaux du type spécifié émis par les différents agents;

- **max_intensity_id(arg)** = renvoie le numéro d'identification de l'agent qui émet le signal perçu avec le plus d'intensité;

Expressions vectorielles

Les expressions vectorielles concernent pour l'essentiel la perception des signaux propagés dans l'environnement et le calcul des vecteurs vitesse (**speed_vec**) ou accélération (**accel_vec**);

- les vecteurs peuvent être additionés ou soustraits grâce aux opérateurs arithmétiques **+** et **–**;
- on peut diviser ou multiplier un vecteur par une valeur réelle;
- les fonctions suivantes prennent en argument le nom d'un paramètre externe et renvoient un vecteur:
  - **gradient(arg)** = renvoie le gradient du paramètre externe (signal propagé dans l'environnement) spécifié à l'endroit où se trouve l'agent; la plate-forme calcule la somme vectorielle des signaux du type spécifié émis par les différents agents;
  - **max_gradient(arg)** = renvoie le vecteur correspondant au signal le plus intense parmi les signaux du type spécifié émis par les différents agents;

Expressions textuelles

Les expressions textuelles concernent la production de chaînes de caractères, soit pour affichage à l'écran ou écriture dans un fichier, soit comme représentation externe de l'agent;

- les chaînes de caractères sont délimitées par deux apostrophes simples **'texte'**;
- des chaînes de caractères peuvent être concaténées grâce à l'opérateur **+**;
- si une chaîne de caractère est additionner avec une variable de type réel, le résultat est une chaîne de caractère dans laquelle la valeur de la variable est convertie en chaîne caractères puis concaténée avec l'autre chaîne;
  - Exemple:
    ```
    set text {'je suis l'agent n° ' + $id}
    ```
- les fonctions suivantes prennent en argument une valeur entière et renvoient une chaîne de caractères:
  - **format_date(arg)** = transforme un numéro de jour (entre 0 et 365) en une chaîne de caractère sous la forme **'jj mois'**;
  - **format_time(arg)** = transforme un numéro de seconde (entre 0 et 86399) en une chaîne de caractère sous la forme **'hh:mm:ss'**;

Expressions booléennes

Les expressions booléennes sont utilisées dans les structures de contrôle pour déterminer la suite à donner au calcul, ou pour calculer la valeur d'une variable réservée;

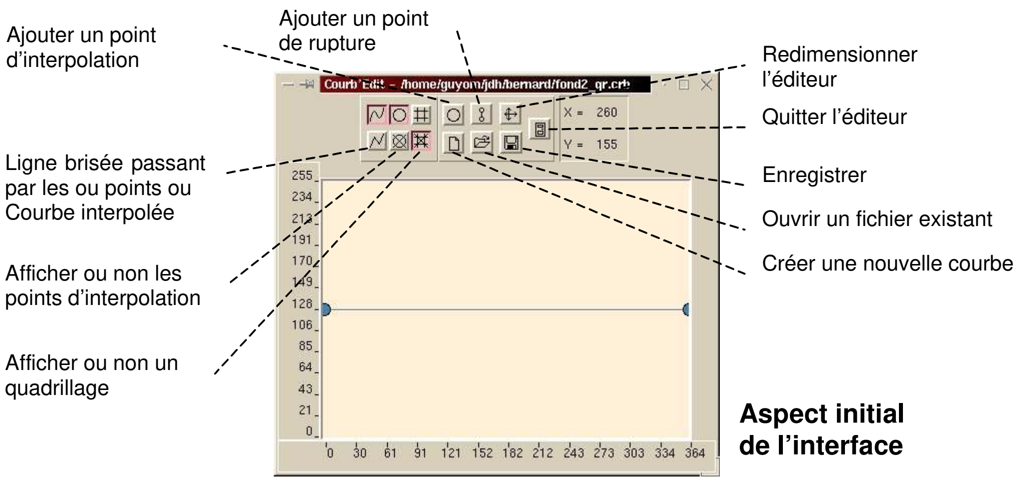
- utilisation des valeurs booléennes 0 et 1;
- par extension, toute valeur réelle différente de 0 est considérée comme la valeur 1;
- utilisation des opérateurs de comparaison **<** (strictement inférieur), **>** (strictement supérieur), **<=** (inférieur ou égal), **>=** (supérieur ou égal), **==** (égal), **!=** (différent);
- utilisation des opérateurs booléens **&&** (et logique), **||** (ou logique) **!** (non logique);
- évaluation de gauche à droite
- utilisation du parenthésage pour modifier l'ordre d'évaluation de l'expression;

ANNEXE B : INTERFACES D'EDITION DE COURBES ET DE TRAJECTOIRES

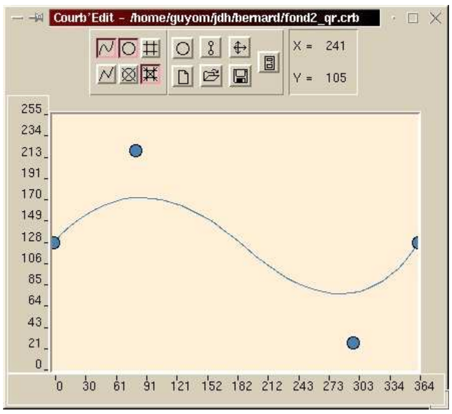
Deux interfaces particulières permettent d'aider à la création de tableaux de valeurs par l'intermédiaire de courbes (Courb'Edit), et à la création de trajectoires (Mov'Edit).

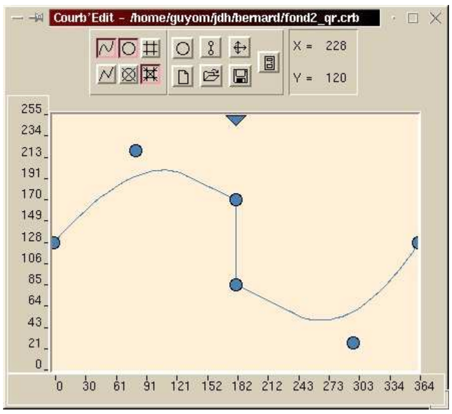
Courb'Edit

Cet éditeur permet de tracer des courbes et de les sauvegarder sous forme de fichiers de valeurs, qui peuvent être utilisés pour initialiser les valeurs d'un tableau ; le principe de tracé est d'interpoler une courbe entre des points positionnés par l'utilisateur.



Aspect initial de l'interface



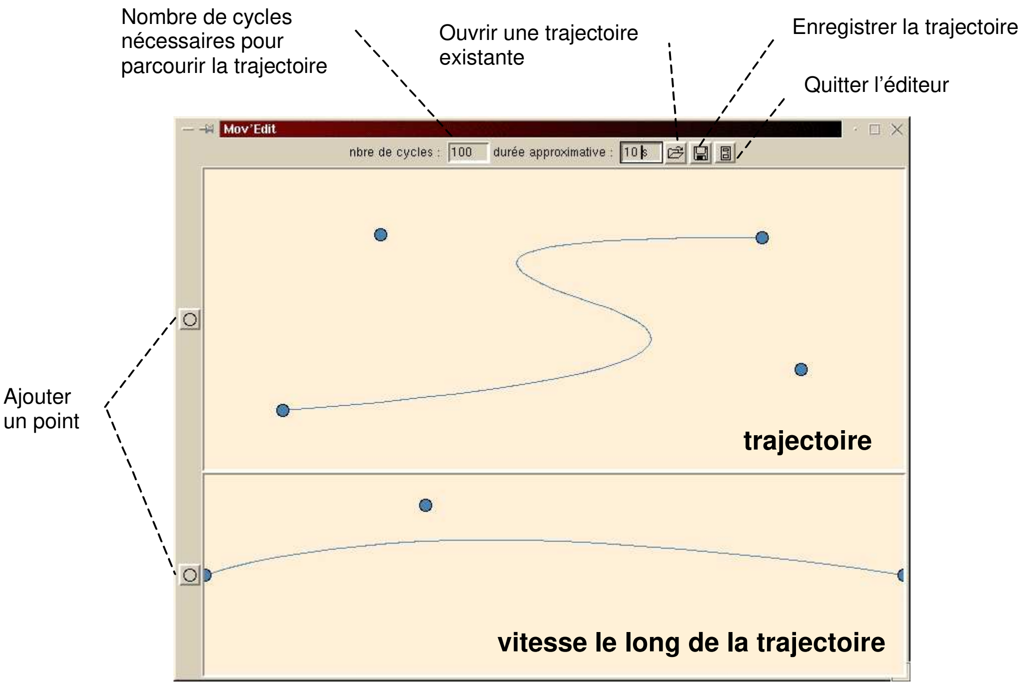


La courbe est interpolée entre un nombre arbitrairement grand de points positionnés par l'utilisateur ; les deux points extrêmes sont attachés aux bords et ne peuvent être déplacés qu'en hauteur ;

Des discontinuités peuvent être introduites dans la courbe par l'utilisation de points de rupture

Mov'Edit

Cet éditeur permet de tracer des courbes pouvant servir de trajectoires à des agents. Pour ce faire, la courbes est convertie en accélérations tangentes et normales à la trajectoire, qu'il faut appliquer au cours de cycles de simulation successifs pour garder l'agent sur la trajectoire. Les accélérations tangentielles et normales sont enregistrées dans deux fichiers distincts.



ANNEXE C : FICHIER DE CONFIGURATION DE L'ORCHESTRE

```
#########################################################
# déclaration des différentes familles d'agents
# déclaration de leur géométrie, de leurs paramètres
#########################################################
proc families {} {

  # fixe la taille de l'environnement simulé
  geometry 800 600 0 0 1 1

  #######################################################
  # déclaration des différentes familles d'agents
  #######################################################
  # agent d'information de type midi_agent
  family MidiPlayer midi_agent 1
  end_family

  # fond de l'écran
  family global rectangle 1
    largeur 8 8 8
    hauteur 6 6 6
    taille 100 100 100
    position 400 300
    private_color
    couleur_rgb 65535 65535 65535
  end_family

# agents notes
  family MidiNote starpoly 160
    bras 10 10 1.0 1.0 1 0
    passage 0.49 0.51 1.0 1.0
    visee 0.49 0.51 1.0 1.0
    taille 2 0 100
    orient 0
  end_family

  #######################################################
  # declaration des paramètres
  #######################################################
  # numéro du premier canal de communication alloué à
  # l'agent MidiPlayer
  globalParam midi_channel 0 0 100
  # variables destinées à la répartition des agents sur
  # les différents canaux instrumentaux
  globalParam noChn 0 0 15
  globalParam noAgt 0 0 10
}

#########################################################
# declaration des lois
#########################################################
proc laws {} {

# script d'initialisation de l'agent MidiPlayer
init MidiPlayer
  # initialise le nom du fichier à jouer
  set file {'./sounds/5thsymph.mid'}
  # indique le premier canal de communication utilisé
  set midi_channel {$chn}
  # initialement, le programme Playmidi est arrêté
  set playing 0
end_init

# script d'activation de l'agent MidiPlayer
activate MidiPlayer
  # un clic de souris démarre ou arrête le fichier MIDI
  if {$button_pressed}
    set playing {1 - $playing}
  fi
end_activate

# script d'initialisation de l'agent MidiPlayer
init MidiNote
  # répartit les agents suivant les différents canaux
  # instrumentaux (10 par canal)
  set chn {$noChn}
  set no {$noAgt}
  set noAgt {$noAgt + 1}
  if {$noAgt == 10}
    set noAgt 0
    set noChn {$noChn + 1}
  fi

  #initialisations diverses
  couleur_rgb 0 0 0
  set size 0
  set note -1
  set vel -1
  set pos_x {$chn * 50 + 25}
  set pos_y -10
end_init

# script d'activation des agents MidiNote
activate MidiNote
  # regarde le nombre d'événements MIDI dans le canal
  set nb {$data[$chn][-1]}

  # si il y en a
  if {$nb}
    # si l'agent ne représente pas une note en cours
    if {$note < 0}
      # recherche un événement de début de note
      set i 0
      while {($i < $nb) && ($data[$chn][$i+1]==0)}
        set i {$i + 2}
      end_while
      # si il en a trouvé un
      if {$i < $nb}
        # ajuste son aspect visuel
        set pos_y {580 - $data[$chn][$i] * 4}
        set size {$data[$chn][$i+1]/10}
        set note {$data[$chn][$i]}
        set vel {$data[$chn][$i+1]}
        # supprime l'événement du canal
        flush_data {$chn} {$i} 2
      fi
    # l'agent représente déjà une note
    else
      # recherche un événement concernant cette note
      set i 0
      while {($i < $nb) && ($note != $data[$chn][$i])}
        set i {$i + 2}
      end_while
      # si il y en a
      if {$i < $nb}
        # si c'est un événement de fin de note
        if {$data[$chn][$i+1] == 0}
          # remet ses paramètres à zéro
          set size 0
          set pos_y -10
          set note -1
          set vel -1
          couleur_rgb 0 0 0
        # sinon ajuste son affichage
        else
          set vel {$data[$chn][$i+1]}
          set size {$data[$chn][$i+1]/10}
        fi
        # supprime l'événement du canal
        flush_data {$chn} {$i} 2
      fi
    fi
  fi

  # si l'agent représente une note en cours
  if {$note >= 0}
    # vire progressivement du noir au blanc
    if {$red < 60000}
      couleur_rgb {$red + 1000} {$red + 1000} {$red +
1000}
    # si l'agent est devenu blanc
    else
      set size 0
      set pos_y -10
      couleur_rgb 0 0 0
    fi
  fi
end_activate
}

# initialise un certain nombre de variables
source $env(JDHRC)

# appelle la procédure de déclaration des familles
families
# appelle la procédure de déclaration des lois
laws
```

ANNEXE D : FICHIER DE CONFIGURATION DU *JARDIN DES HASARDS*

```
#########################################################
# déclaration des différentes familles d'agents
# déclaration de leur géométrie, de leurs paramètres
#########################################################
proc families {} {

  # fixe la taille de l'environnement simulé
  geometry 800 490 0 50 1 1

  #######################################################
  # déclaration des différentes familles d'agents
  #######################################################
  # l'agent d'information météo
  family meteo meteo_agent 1
  end_family

  # l'agent "chat"
  family chat local 1
    # signaux correspondant à la bombe et à l'arrosoir
    externalParam bombe linear 5 0 50 5 0 50
    externalParam arrosoir linear 5 0 50 5 0 50
  end_family

  #############################
  # familles du jardin lui-meme
  #############################
  # famille global
  family global rectangle 1
    # géométrie
    largeur 8 8 8
    hauteur 4.9 4.9 4.9
    taille 100 100 100
    position 400 295
    private_color
    # tableaux pour les couleurs
    tableau fond1_at 365 -f "fond1_at.crb"
    tableau fond1_as 365 -f "fond1_as.crb"
    tableau fond1_al 365 -f "fond1_al.crb"
    tableau fond2_qs 1440 -f "fond2_qs.crb"
    tableau fond2_ql 1440 -f "fond2_ql.crb"
    tableau cadre_nebul 9 -f "cadre_nebul.crb"
    tableau temperature 25 -f "temperature.crb"
  end_family

  # famille nuage
  family nuage starpoly 10
    # géométrie
    bras 2 2 0.5 1.0 1 1
    passage 0.3 0.7 0.3 0.4
    visee 0.4 0.6 0.1 0.2
    taille 150 100 200
    common_color
    # tableaux pour les couleurs
    tableau fond1_at 365 -f "fond1_at.crb"
    tableau fond1_as 365 -f "fond1_as.crb"
    tableau fond1_al 365 -f "fond1_al.crb"
    tableau fond2_qs 1440 -f "fond2_qs.crb"
    tableau fond2_ql 1440 -f "fond2_ql.crb"
    tableau nuage_nebul 9 -f "cadre_nebul.crb"
    tableau temperature 25 -f "temperature.crb"
  end_family

  # famille fond
  family fond starpoly 10
    # géométrie
    bras 2 2 0.5 1.0 1 1
    passage 0.2 0.8 0.3 0.5
    visee 0.4 0.6 0.1 0.2
    taille 125 100 150
    common_color
    # tableaux pour les couleurs
    tableau fond2_at 365 -f "fond2_at.crb"
    tableau fond2_as 365 -f "fond2_as.crb"
    tableau fond2_al 365 -f "fond2_al.crb"
    tableau fond2_qs 1440 -f "fond2_qs.crb"
    tableau fond2_ql 1440 -f "fond2_ql.crb"
    tableau fond_nebul 9 -f "fond_nebul.crb"
    tableau temperature 25 -f "temperature.crb"
  end_family

  # famille des carnivores
  family carni starpoly 5
    # géométrie
    bras 5 5 0.5 1.0 1 1
    passage 0.49 0.51 0.4 0.45
    visee 0.4 0.6 0.2 0.3
    taille 25 1 50
    common_color
    rgb 0 0 0
    # paramètres
    internalParam energy 50 0 100
    externalParam carni_presence linear 10 0 100 50 0 400
    externalParam presence linear 10 0 100 100 0 400
    # trajectoire
    trajec "carni.act" "carni.acn" 100 100 500 1000
  end_family

  # famille feuille
  family feuille starpoly 40
    # géométrie
    bras 2 2 0.5 1.0 1 1
    passage 0.2 0.8 0.3 0.5
    visee 0.4 0.6 0.1 0.2
    taille 100 1 100
    common_color
    # paramètres
    internalParam energy 50 0 100
    externalParam fe_presence linear 10 0 200 50 0 400
    externalParam fe_body linear 10 0 100 5 0 400
    externalParam presence linear 10 0 100 100 0 400
    # tableaux pour les couleurs
    tableau feui1_qs 1440 -f "feui1_qs.crb"
    tableau feui1_ql 1440 -f "feui1_ql.crb"
    tableau feui2_at 365 -f "feui2_at.crb"
    tableau feui2_as 365 -f "feui2_as.crb"
    tableau feui2_al 365 -f "feui2_al.crb"
    tableau feuille_nebul 9 -f "feuille_nebul.crb"
    tableau temperature 25 -f "temperature.crb"
    # trajectoire
    trajec "feuille.act" "feuille.acn" 100 100 500 1000
  end_family

  # famille des herbivores
  family herbi starpoly 30
    # géométrie
    bras 3 3 1.0 1.0 1 1
    passage 0.49 0.51 0.6 0.6
    visee 0.49 0.51 0.5 0.5
    taille 10 1 15
    common_color
    # paramères
    internalParam energy 50 0 100
    externalParam herbi_presence linear 10 0 150 50 0 400
    externalParam herbi_body linear 10 0 100 5 0 400
    externalParam herbi_dead linear 0 0 100 0 0 400
    externalParam presence linear 10 0 100 100 0 400
    # tableaux pour les couleurs
    tableau trian_at 365 -f "trian_at.crb"
    tableau trian_as 365 -f "trian_as.crb"
    tableau trian_al 365 -f "trian_al.crb"
    tableau trian_qs 1440 -f "trian_qs.crb"
    tableau trian_ql 1440 -f "trian_ql.crb"
    # trajectoire
    trajec "herbi.act" "herbi.acn" 100 100 500 1000
  end_family

  # famille point
  family point starpoly 50
    # géométrie
    bras 5 5 1.0 1.0 1 0
    passage 0.49 0.51 1.0 1.0
    visee 0.49 0.51 1.0 1.0
    taille 2 1 5
    common_color
    # tableaux pour les couleurs
    tableau point_at 365 -f "point_at.crb"
    tableau point_as 365 -f "point_as.crb"
    tableau point_al 365 -f "point_al.crb"
    tableau point_qs 1440 -f "point_qs.crb"
    tableau point_ql 1440 -f "point_ql.crb"
  end_family

  # bandeau noir en haut de l'écran
  family bord_haut rectangle 1
    largeur 8 8 8
    hauteur 0.5 0.5 0.5
    taille 100 100 100
    position 400 25
    rgb 0 0 0
  end_family

  # bandeau noir en haut de l'écran
  family bord_bas rectangle 1
    largeur 8 8 8
    hauteur 0.6 0.6 0.6
    taille 100 100 100
    position 400 570
    rgb 0 0 0
```

```
  end_family

  # titre (sans les majuscules)
  family jdh text 1
    texte " E    A R D I N     E S     A S A R D S"
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-14-*-*-*-*-*-*-
*"
    position 259 36
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # majuscules du titre
  family maj text 1
    texte "L    J              D       H          "
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-18-*-*-*-*-*-*-
*"
    position 250 36
    rgb 65535 0 0
  end_family

  # barre de boutons
  family barre_boutons rectangle 1
    largeur 8 8 8
    hauteur 0.3 0.3 0.3
    taille 100 100 100
    position 400 586
    rgb 16384 16384 16384
  end_family

  # bouton pour voir l'évolution au cours de l'année
  family bouton1 rectangle 1
    largeur 9 9 9
    hauteur 2 2 2
    taille 10 10 10
    position 50 586
    rgb 32768 32768 32768
  end_family

  # texte correspondant à bouton1
  family texte_bouton1 text 1
    texte " Leçon de choses"
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    position 10 589
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # bouton pour voir l'évolution au cours de la journée
  family bouton2 rectangle 1
    largeur 9 9 9
    hauteur 2 2 2
    taille 10 10 10
    position 146 586
    rgb 32768 32768 32768
  end_family

  # texte correspondant à bouton2
  family texte_bouton2 text 1
    texte " 1 an = 1 minute"
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    position 106 589
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # bouton par un diaporama d'explication
  family bouton3 rectangle 1
    largeur 9 9 9
    hauteur 2 2 2
    taille 10 10 10
    position 242 586
    rgb 32768 32768 32768
  end_family

  # texte correspondant à bouton3
  family texte_bouton3 text 1
    texte "1 jour = 1 minute"
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    position 202 589
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # bouton pour l'affichage de la date et de l'heure
  family bouton_date rectangle 1
    largeur 15 15 15
    hauteur 2 2 2
    taille 10 10 10
    position 529 586
  end_family

  # texte correspondant à bouton_date
  family texte_date text 1
    position 463 589
    rgb 65535 65535 65535
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
  end_family

  family copyright text 1
    # texte de copyright
    texte "(c) B. Gortais - Univ. Paris 6, 97-99"
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    position 615 589
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # légende pour les données météorologiques
  family donnees text 1
    texte "Nébulosité :       (de 0 = dégagé à 8 =
couvert)          Pluie :       mm/h
Température :         °C         Dir. du vent :
Vit. du vent :        km/h"
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    position 40 558
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # texte de la valeur de température
  family t2 text 1
    position 455 558
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # texte de la valeur de nébulosité
  family n2 text 1
    position 100 558
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # texte de la valeur de direction du vent
  family dv2 text 1
    position 590 558
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # texte de la valeur de vitesse du vent
  family vv2 text 1
    position 743 558
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    rgb 65535 65535 65535
  end_family

  # texte de la valeur de pluviométrie
  family p2 text 1
    position 311 558
    fonte "-adobe-helvetica-medium-r-*-*-10-*-*-*-*-*-*-
*"
    rgb p2 65535 65535 65535
  end_family

  # des pastilles rouges pour les valeurs météo
  family pastille starpoly 5
    bras 5 5 1.0 1.0 1 0
    passage 0.49 0.51 1.0 1.0
    visee 0.49 0.51 1.0 1.0
    taille 4 4 4
    position 32 554
    position 270 554
    position 380 554
    position 510 554
    position 670 554
    rgb 65535 0 0
  end_family

  ########################
  # les outils du jardinier
  ########################
  # le bouton de sélection de la main
  family main image 1
    image "main.ppm"
    position 310 586
  end_family

  # le bouton de sélection de la main
  family ciseaux image 1
    image "ciseaux.ppm"
    position 340 586
  end_family

  # le bouton de sélection de la main
  family clone image 1
    image "clone.ppm"
    position 370 586
  end_family

  # le bouton de sélection de la main
  family bombe image 1
    image "bombe.ppm"
    position 400 586
  end_family

  # le bouton de sélection de la main
  family arrosoir image 1
    image "arrosoir.ppm"
    position 430 586
```

```
  end_family

  ####################
  # parametres globaux
  ####################
  # canal de communication de l'agent d'info. météo.
  globalParam meteo_chn 0 0 10
  # n° d'identification du chat
  globalParam chatID 0 0 10000

  # variables météorologiques
  globalParam neb 0 0 8
  globalParam pluie 0 0 60
  globalParam dirVent 0 0 360
  globalParam vitVent 0 0 150
  globalParam temper 0 -10 40
  globalParam t 0 0 24
  # pour désactiver les agents boutons
  globalParam boutonsActifs 1 0 1
  # pour savoir si l'agent
  globalParam timeAgentActif 1 0 1
  # pour savoir si les couleurs doivent être mises à jour
  globalParam updateTime 1 0 4

  # fichiers sons correspondant aux naissances d'agents
  sound [file join $jdh sounds nais_carni.au]
  sound [file join $jdh sounds nais_herbi.au]
  sound [file join $jdh sounds nais_feuille.au]

  # fichiers sons correspondant aux morts d'agents
  sound [file join $jdh sounds mort_feuille.au]
  sound [file join $jdh sounds mort_carni.au]
  sound [file join $jdh sounds mort_herbi.au]

  # fichiers son associés à la nébulosité
  sound [file join $jdh sounds nebul_00.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_01.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_02.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_03.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_04.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_05.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_06.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_07.au]
  sound [file join $jdh sounds nebul_08.au]

}

#########################################################
# declaration des lois
#########################################################
proc laws {} {

# initialisation de l'agent meteo
init meteo
  # l'agent météo indique le canal utilisé
  set meteo_chn {$channel}
  set code_aeroport "LFRB"
end_init

# initialisation de l'agent chat
init chat
  # spécifie l'outil en cours d'utilisation
  set tool 0
  # l'agent chat donne son numéro d'identification
  set chatID {$id}
end_init

# script d'activation de l'agent chat
activate chat
  # ajuste sa position en fonction de celle du curseur
  set pos_x {$curseur_x}
  set pos_y {$curseur_y}

  # si l'agent clique avec le bouton gauche dans la zone
  # du jardin
  if {$button_pressed && ($button == 1) && ($pos_y > 50)
&& ($pos_y < 540)}
    # récupère le n° de l'agent le plus proche
    set agt {max_intensity_id($presence)}
    switch
      # si l'outil courant est les ciseaux
      case {$tool == 1}
        # dit à l'agent qu'il est mort
        dset {$agt} "killed" 1
      # si c'est l'outil de clonage
      case {$tool == 2}
        # demande à l'agent de se cloner
        dset {$agt} "cloned" 1
    end_switch
    # désactive les signaux de la bombe et de l'arrosoir
    set arrosoir 0
    set bombe 0
  fi

  # si le bouton gauche est maintenu enfoncé
  if {$button_down && ($button == 1) && ($pos_y > 50) &&
($pos_y < 540)}
    switch
      # si l'outil courant est la main
      case {$tool == 0}
        # oblige l'agent sélectionné à le suivre
        dset {$agt} "pos_x" {$pos_x}
        dset {$agt} "pos_y" {$pos_y}
      # si c'est la bombe
      case {$tool == 3}
        # désactive le signal de l'arrosoir
        set arrosoir 0
        # active le signal de la bombe
        set bombe 5
        set bombe {-30}
      # si c'est l'arrosoir
      case {$tool == 4}
        # désactive le signal de la bombe
        set bombe 0
        # active le signal de l'arrosoir
        set arrosoir 5
        set arrosoir {-30}
    end_switch
  fi
end_activate

# script d'activation du bouton correspondant à la main
activate main
  if {$mouse_over && $button_pressed && ($button == 1)}
    # change le curseur
    setCursor "hand.xbm" "hand_mask.xbm" 4 3
    # indique à l'agent chat l'outil à utiliser
    dset {$chatID} "tool" 0
  fi
  # si le bouton droit est enfoncé, l'outil courant est
  # remplacé par la main
  if {$button_pressed && ($button == 3)}
    setCursor "hand.xbm" "hand_mask.xbm" 4 3
    dset {$chatID} "tool" 0
  fi
end_activate

# script d'activation du bouton des ciseaux
activate ciseaux
  if {$mouse_over && $button_pressed}
    dset {$chatID} "tool" 1
    setCursor "ciseaux.xbm" "ciseaux_mask.xbm" 1 3
  fi
end_activate

# script d'activation du bouton de l'outil de clonage
activate clone
  if {$mouse_over && $button_pressed}
    dset {$chatID} "tool" 2
    setCursor "clone.xbm" "clone_mask.xbm" 15 9
  fi
end_activate

# script d'activation du bouton de la bombe
activate bombe
  if {$mouse_over && $button_pressed}
    dset {$chatID} "tool" 3
    setCursor "bombe.xbm" "bombe_mask.xbm" 2 5
  fi
end_activate

# script d'activation du bouton de l'arrosoir
activate arrosoir
  if {$mouse_over && $button_pressed}
    dset {$chatID} "tool" 4
    setCursor "arrosoir.xbm" "arrosoir_mask.xbm" 3 15
  fi
end_activate

# script d'initialisation de l'agent global
init global
  # initialise les variables météo
  set neb {$data[$meteo_chn][0]}
  set pluie {$data[$meteo_chn][1]}
  set dirVent {$data[$meteo_chn][2]}
  set vitVent {$data[$meteo_chn][3]}
  set temper {$data[$meteo_chn][4]}

  # initialisations diverses
  set viscosity 0.05
  set curseur_visible 1
  setCursor "hand.xbm" "hand_mask.xbm" 4 3
  set updateTime 1
end_init

# script d'activation de l'agent global
activate global
  # raccourcis clavier pour modifier les variables météo
  if {$key_down}
    switch
      case {$control_key == 0}
        switch
          case {$key == 100}
            set curseur_x {$curseur_x - 50}
          case {$key == 102}
            set curseur_x {$curseur_x + 50}
          case {$key == 98}
            set curseur_y {$curseur_y - 50}
          case {$key == 104}
            set curseur_y {$curseur_y + 50}
        end_switch
      case {$control_key == 4}
        switch
          case {$key == 44}
            set day {$day - 1}
            if {$day < 0}
```

```
            set day 364
          fi
          set updateTime 1
        case {$key == 43}
          set min {$min - 5}
          if {$min < 0}
            set min {$min + 1440}
          fi
          set updateTime 1
        case {$key == 55}
          set vitVent {$vitVent - 1}
          set updateTime 3
        case {$key == 32}
          if {$dirVent == 0}
            set dirVent 359
          else
            set dirVent {$dirVent - 1}
          fi
          set updateTime 3
        case {$key == 57}
          set neb {$neb - 1}
          set updateTime 3
        case {$key == 28}
          set temper {$temper - 1}
          set updateTime 3
        case {$key == 33}
          set pluie {$pluie - 1}
          set updateTime 3
      end_switch
    case {$control_key == 8}
      switch
        case {$key == 44}
          set day {$day + 1}
          if {$day == 365}
            set day 0
          fi
          set updateTime 1
        case {$key == 43}
          set min {$min + 5}
          if {$min >= 1440}
            set min {$min - 1440}
          fi
          set updateTime 1
        case {$key == 55}
          set vitVent {$vitVent + 1}
          set updateTime 3
        case {$key == 32}
          if {$dirVent == 359}
            set dirVent 0
          else
            set dirVent {$dirVent + 1}
          fi
          set updateTime 3
        case {$key == 57}
          set neb {$neb + 1}
          set updateTime 3
        case {$key == 28}
          set temper {$temper + 1}
          set updateTime 3
        case {$key == 33}
          set pluie {$pluie + 1}
          set updateTime 3
      end_switch
  end_switch
fi

# si le canal météo contient des données
if {$data[$meteo_chn][0] != -1}
  # l'agent lit dans le canal les valeurs des variables
  set neb {$data[$meteo_chn][0]}
  set pluie {$data[$meteo_chn][1]}
  set dirVent {$data[$meteo_chn][2]}
  set vitVent {$data[$meteo_chn][3]}
  set temper {$data[$meteo_chn][4]}
  flush_data {$meteo_chn} 0 5
  set t {$temper}
  if {$t > 24}
    set t 24
  else
    if {$t < 0}
      set t 0
    fi
  fi
fi

switch
  # si l'heure a changé, met à jour les couleurs du
  # fond
  case {$updateTime == 1}
    # met à jour les couleurs du fond
    tsl {$fond1_at[$day]} \
        {$fond1_as[$day] * $fond2_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000} \
        {$fond1_al[$day] * $fond2_ql[$min] *
$cadre_nebul[$neb] / 10000}

    set updateTime 2
  case {($updateTime == 2) || ($updateTime == 4)}
    set updateTime 0
  # si les données météo ont été modifiées
  case {$updateTime == 3}
    set t {$temper}
    if {$t > 24}
      set t 24
    else
      if {$t < 0}
        set t 0
      fi
    fi

    # met à jour les couleurs du fond
    tsl {$fond1_at[$day]} \
        {$fond1_as[$day] * $fond2_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000} \
        {$fond1_al[$day] * $fond2_ql[$min] *
$cadre_nebul[$neb] / 10000}

    set updateTime 4
  end_switch

  # de temps en temps, modifie la valeur de nébulosité
  if {rand(300) < 1}
    set n {($neb - 1) + irand(3)}
    switch
      case {$n < 0}
        set n 0
      case {$n > 8}
        set n 8
    end_switch
    # suivant la valeur de nébulosité, joue un fichier
    # son
    switch
      case {$n == 0}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_00.au] 1
      case {$n == 1}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_01.au] 1
      case {$n == 2}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_02.au] 1
      case {$n == 3}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_03.au] 1
      case {$n == 4}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_04.au] 1
      case {$n == 5}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_05.au] 1
      case {$n == 6}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_06.au] 1
      case {$n == 7}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_07.au] 1
      case {$n == 8}
        playSound [file join $jdh sounds nebul_08.au] 1
    end_switch
  fi
end_activate

# script d'initialisation commun de la famille nuage
common_init nuage
  # met à jour la couleur des agents de la famille
  tsl {$fond1_at[$day]} \
      {$fond1_as[$day] * $fond2_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000} \
      {$fond1_al[$day] * $fond2_ql[$min] *
$nuage_nebul[$neb] / 10000}
end_common_init

# script d'activation commun de la famille nuage
common_activate nuage
  if {$updateTime}
    # met à jour la couleur des agents de la famille
    tsl {$fond1_at[$day]} \
        {$fond1_as[$day] * $fond2_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000} \
        {$fond1_al[$day] * $fond2_ql[$min] *
$nuage_nebul[$neb] / 10000}
  fi
end_common_activate

# script d'initialisation de la famille nuage
init nuage
  # fixe une vitesse limite
  set max_speed 120
end_init

# script d'activation de la famille nuage
activate nuage
  # de temps en temps, fixe le vecteur vitesse de l'agent
  # en fonction de la direction et de la vitesse du vent
  if {irand(100) == 0}
    set speed_x {$vitVent * cos($dirVent+90)}
    set speed_y {$vitVent * sin($dirVent+90)}
  fi
end_activate

# script d'initialisation commun de la famille fond
common_init fond
  # met à jour la couleur des agents de la famille
  tsl {$fond2_at[$day]} \
      {$fond2_as[$day] * $fond2_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000} \
      {$fond2_al[$day] * $fond2_ql[$min] *
$fond_nebul[$neb] / 10000}
end_common_init

# script d'activation commun de la famille fond
common_activate fond
  if {$updateTime}
    # met à jour la couleur des agents de la famille
```

```
    tsl {$fond2_at[$day]} \
        {$fond2_as[$day] * $fond2_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000} \
        {$fond2_al[$day] * $fond2_ql[$min] *
$fond_nebul[$neb] / 10000}
  fi
end_common_activate

# script d'initialisation de la famille fond
init fond
  set max_speed 20
end_init

# script d'activation de la famille fond
activate fond
  # se déplace de temps en temps
  if {irand(200) == 0}
    set speed_vec {$speed_vec +
gradient($carni_presence)/2}
  fi
end_activate

# script d'initialisation de la famille carni
init carni
  # initialisations diverses
  set max_speed 100
  set energy {20+rand(20)}
  set cpt {5000+irand(5000)}
  set killed 0
  set cloned 0
  set herbi_id -1
  set herbi 0
end_init

# script d'activation de la famille carni
activate carni
  # ajuste son énergie en fonction des outils
  if {$button_down}
    set energy {$energy + intensity($arrosoir) -
intensity($bombe)}
  fi
  # si l'agent est tué ou s'il n'a plus d'énergie
  if {$killed || ($energy < 1)}
    # émet un son
    playSound [file join $jdh sounds mort_carni.au] 0
    # meurt
    die
  fi

  # si l'agent est cloné ou qu'il est en période de
  # reproduction avec suffisamment d'énergi
  if {$cloned || (($cpt == 0) && ($energy > 50))}
    # émet un son
    playSound [file join $jdh sounds nais_carni.au] 0
    # se reproduit
    reproduce
    # ajuste son énergie
    set energy {$energy - 25}
    # planifie la prochaine reproduction
    set cpt {5000 + irand(5000)}
    set cloned 0
  fi

  # si d'autres agents sont présents, cela retarde la
  # prochaine période de reproduction
  if {intensity($carni_presence)}
    set cpt {$cpt + 2}
  else
    if {$cpt > 0}
      set cpt {$cpt - 1}
    fi
  fi

  # regarde s'il y a des herbivores morts ou présents
  set dead {intensity($herbi_dead)}
  set pres {intensity($herbi_presence)}

  # prise de décision
  switch
    # si l'agent est proche d'un herbivore mort
    case {$dead > 3}
      # l'agent s'arrête...
      set speed_x 0
      set speed_y 0
      # ... et mange un peu de l'herbivore
      set herbi_id {max_intensity_id($herbi_dead)}
      set herbi {value($herbi_id)('energy')}
      if {$herbi > 1}
        set energy {$energy + 0.3}
        dset {$herbi_id} "energy" {$herbi - 0.1}
      fi

    # si l'agent perçoit un herbivore mort
    case {$dead > 0}
      # il se dirige vers lui
      set accel_vec {gradient($herbi_dead) * (-0.01)}

    # si l'agent est proche d'un herbivore vivant
    case {max_intensity($herbi_body) > 1}
      # il le tue
      set herbi_id {max_intensity_id($herbi_body)}
      dset {$herbi_id} "killed" 1

    # si l'agent perçoit un herbivore et qu'il a faim
    case {($pres > 5) || (($pres > 0) && ($energy < 30))}
      # il le pourchasse
      set speed_vec {gradient($herbi_presence) * ($energy
/ intensity($herbi_presence)) * (-0.1)}

    # sinon il se déplace aléatoirement
    case {irand(10) == 0}
      set accel_x {rand(10)-5}
      set accel_y {rand(10)-5}
  end_switch

  # l'agent est déformé par la présence des herbivores
  set magnet {-(2 * gradient($herbi_presence) +
$speed_vec)}

  # ajuste son énergie et sa taille
  set energy {$energy - (sqrt($speed) + 1) * 0.005}
  set size {$energy/4}
end_activate

# script d'initialisation commun de la famille feuille
common_init feuille
  # met à jour la couleur des agents de la famille
  tsl {$feui2_at[$day]} \
      {$feui2_as[$day] * $feui1_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000} \
      {$feui2_al[$day] * $feui1_ql[$min] *
$feuille_nebul[$neb] / 10000}
end_common_init

# script d'activation commun de la famille feuille
common_activate feuille
  if {$updateTime}
    # met à jour la couleur des agents de la famille
    tsl {$feui2_at[$day]} \
        {$feui2_as[$day] * $feui1_qs[$min] *
$temperature[$t] / 10000}
        {$feui2_al[$day] * $feui1_ql[$min] *
$feuille_nebul[$neb] / 10000}
  fi
end_common_activate

# script d'initialisation de la famille feuille
init feuille
  # initialisations diverses
  set max_speed 100
  set energy {10 + rand(10)}
  set cpt {1000+irand(1000)}
  set angle {irand(360)}
  set speed_x {cos($angle)*10}
  set speed_y {sin($angle)*10}
  set size {$energy}
  set killed 0
  set cloned 0
end_init
# script d'activation de la famille feuille
activate feuille
  # met à jour l'énergie en fonction des outils
  if {$button_down}
    set energy {$energy + intensity($arrosoir) -
intensity($bombe)}
  fi

  # la période de reproduction se rapproche
  if {$cpt > 0}
    set cpt {$cpt - 1}
  fi

  # met à jour l'énergie en fonction de la météo
  set energy {$energy + ((9-$neb) + ($temper+16.25)/6.25
+ ($pluie+7.5)/7.5) * 0.01 - intensity($fe_presence)}
  # met à our la taille et le signal de présence en
  # fonction de l'énergie
  set size {$energy}
  set fe_presence {0.05 * $energy}
  set fe_presence {-($energy*0.5)}

  # si l'agent est cloné ou qu'il est en période de
  # reproduction avec suffisamment d'énergie
  if {$cloned || (($energy>50) && ($cpt==0))}
    # émet un son
    playSound [file join $jdh sounds nais_feuille.au] 0
    # se reproduit
    reproduce
    # prépare la prochaine période de reproduction
    set cpt {1000 + irand(1000)}
    set cloned 0
  fi

  # si l'agent est tué ou que son énergie est trop faible
  if {$killed || ($energy<1)}
    # émet un son
    playSound [file join $jdh sounds mort_feuille.au] 0
    # et meurt
    die
  fi
end_activate

# script d'initialisation commun de la famille herbivore
common_init herbi
  # met à jour la couleur des agents de la famille
  tsl {$trian_at[$day]} \
```

```
      {$trian_as[$day] * $trian_qs[$min] / 100} \
      {$trian_al[$day]}
end_common_init

# script d'activation commun de la famille herbivore
common_activate herbi
  if {$updateTime}
    # met à jour la couleur des agents de la famille
    tsl {$trian_at[$day]} \
        {$trian_as[$day] * $trian_qs[$min] / 100} \
        {$trian_al[$day]}
  fi
end_common_activate

# script d'initialisation de la famille herbivore
init herbi
  # initialisations diverses
  set max_speed 100
  set energy {20+rand(20)}
  set cpt {1000+irand(1000)}
  set herbi_presence 10
  set herbi_presence -50
  set alive 1
  set feuille_id -1
  set feuille 0
  set killed 0
  set cloned 0
end_init

# script d'activation de la famille herbivore
activate herbi
  # met à jour son énergie en fonction des outils
  if {$button_down}
    set energy {$energy + intensity($arrosoir) -
intensity($bombe)}
  fi

  # si l'agent est vivant
  if {$alive}
    # si il est tué ou que son énergie est trop faible
    if {($energy < 1) || $killed}
      # il s'immobilise et signale sa présence en tant
      # que herbivore mort
      set speed_x 0
      set speed_y 0
      set alive 0
      set herbi_presence 10
      set herbi_presence {-100}
      set herbi_dead 10
      set herbi_dead {-10}
      set energy {$energy+20}
      playSound [file join $jdh sounds mort_herbi.au] 0
    # l'herbivore n'est pas mort
    else
      # la présence d'autres herbivores repousse la
      # prochaine période de reproduction
      if {intensity($herbi_presence)}
        set cpt {$cpt + 2}
      else
        if {$cpt > 0}
          set cpt {$cpt - 1}
        fi
      fi

      # prise de décision
      switch
        # si il perçoit un carnivore
        case {intensity($carni_presence) > 3}
          # il fuit
          set speed_vec {gradient($carni_presence) *
$energy * 0.01}

        # si il est sur une feuille et qu'il a faim
        case {(intensity($fe_body) > 1) && ($energy <
50)}
          # s'écarte de ses congénères
          if {intensity($herbi_body) > 3}
            set accel_vec {gradient($herbi_body) *
$energy * 0.01}
          fi
          # mange la feuille
          set feuille_id {max_intensity_id($fe_body)}
          set feuille {value($feuille_id)('energy')}
          if {$feuille > 1}
            set energy {$energy + 0.2}
            dset {$feuille_id} "energy" {$feuille - 0.6}
          fi

        # si il perçoit une feuille et qu'il a faim
        case {(intensity($fe_presence) > 0) && ($energy <
50)}
          # il se dirige vers elle
          set accel_vec {gradient($fe_presence) * (-0.1)}

        # sinon
        default
          # il se déplace aléatoirement
          if {irand(10) == 0}
            set accel_x {rand(10)-5}
            set accel_y {rand(10)-5}
          fi
      end_switch
```

```
      # met à jour son paramètre d'énergie et sa taille
      set energy {$energy- ((sqrt($speed) + 1) *0.01)}
      set size {$energy/5}

      # si il est cloné ou qu'il est en période de
      # reproduction avec suffisamment d'énergie
      if {$cloned || (($cpt == 0) && ($energy > 50))}
        # émet un son
        playSound [file join $jdh sounds nais_herbi.au] 0
        # se reproduit
        reproduce
        # met à jour son énergie
        set energy {$energy - 25}
        # prépare la prochaine période de reproduction
        set cpt {1000 + irand(1000)}
        set cloned 0
      fi
    fi
  else  # l'agent est mort
    # si il est entièrement mangé
    if {$energy < 1}
      # il est supprimé pour de bon
      die
    else
      # sinon il adapte sa taille à sa quantité d'énergie
      set size {$energy/5}
    fi
  fi
end_activate

# script d'initialisation commun de la famille point
common_init point
  # met à jour la couleur des agents de la famille
  tsl {$point_at[$day]} \
      {$point_as[$day] * $point_qs[$min] / 100} \
      {$point_al[$day]}
end_common_init

# script d'activation commun de la famille point
common_activate point
  if {$updateTime}
    # met à jour la couleur des agents de la famille
    tsl {$point_at[$day]} \
        {$point_as[$day] * $point_qs[$min] / 100} \
        {$point_al[$day]}
  fi
end_common_activate

# script d'initialisation de la famille point
init point
  set max_speed 800
end_init

# script d'activation de la famille point
activate point
  # chaque agent a une probabilité d'autant plus grande
  # de s'afficher que la valeur de pluie est importante
  if {rand(60) < $pluie}
    set size {2 + irand($pluie/15)}
    set pos_x {rand(800)}
    set pos_y {50 + rand(490)}
  else
    set pos_x -10
    set pos_y -10
  fi
end_activate

# script d'activation du rectangle où s'affiche la date
activate bouton_date
  # si le système fait un parcours rapide de l'année ou
  # de la journée
  if {$timeAgentActif == 0}
    # s'affiche en rouge
    rgb 65535 0 0
  else
    # sinon s'affiche en gris
    rgb 32768 32768 32768
  fi
end_activate

# initialisation de l'agent de l'affichage de la date
init texte_date
  set secs 60
  set cur_sec {$sec}
  set text {'le ' + format_date($day) + ' à ' +
format_time($cur_sec)}
end_init

# activation de l'agent de l'affichage de la date
activate texte_date
  if {$timeAgentActif}
    set old_sec {$cur_sec}
    set cur_sec {$sec}
    if {$old_sec != $cur_sec}
      set text {'le ' + format_date($day) + ' à ' +
format_time($cur_sec)}
      set secs {$secs - 1}
      if {$secs == 0}
        set updateTime 1
        set secs 60
      fi
    fi
  else
```

```
    if {$updateTime}
      set text {'le ' + format_date($day) + ' à ' +
format_time($cur_sec)}
    fi
  fi
end_activate

# initialisation de l'agent chargé de l'affichage de la
# température
init t2
  set cur_t {$temper}
  set text {$cur_t}
end_init

# activation de l'agent chargé de l'affichage de la
# température
activate t2
  if {($updateTime == 1) || ($updateTime == 2)}
    set old_t {$cur_t}
    set cur_t {$data[$meteo_chn][4]}
    if {$old_t != $cur_t}
      set text {$cur_t}
    fi
  else
    if {$updateTime == 4}
      set old_t {$cur_t}
      set cur_t {$temper}
      set text {$cur_t}
    fi
  fi
end_activate

# initialisation de l'agent chargé de l'affichage de la
# nébulosité
init n2
  set cur_n {$neb}
  set text {$cur_n}
end_init

# activation de l'agent chargé de l'affichage de la
# nébulosité
activate n2
  if {($updateTime == 1) || ($updateTime == 2)}
    set old_n {$cur_n}
    set cur_n {$data[$meteo_chn][0]}
    if {$old_n != $cur_n}
      set text {$cur_n}
    fi
  else
    if {$updateTime == 4}
      set old_n {$cur_n}
      set cur_n {$neb}
      set text {$cur_n}
    fi
  fi
end_activate

# initialisation de l'agent chargé de l'affichage de la
# pluviométrie
init p2
  set cur_p {$pluie}
  set text {$cur_p}
end_init

# activation de l'agent chargé de l'affichage de la
# pluviométrie
activate p2
  if {($updateTime == 1) || ($updateTime == 2)}
    set old_p {$cur_p}
    set cur_p {$data[$meteo_chn][1]}
    if {$old_p != $cur_p}
      set text {$cur_p}
    fi
  else
    if {$updateTime == 4}
      set old_p {$cur_p}
      set cur_p {$pluie}
      set text {$cur_p}
    fi
  fi
end_activate

# initialisation de l'agent chargé de l'affichage de la
# vitesse du vent
init vv2
  set cur_vv {$vitVent}
  set text {$cur_vv}
end_init

# activation de l'agent chargé de l'affichage de la
# vitesse du vent
activate vv2
  if {($updateTime == 1) || ($updateTime == 2)}
    set old_vv {$cur_vv}
    set cur_vv {$data[$meteo_chn][3]}
    if {$old_vv != $cur_vv}
      set text {$cur_vv}
    fi
  else
    if {$updateTime == 4}
      set old_vv {$cur_vv}
      set cur_vv {$vitVent}
      set text {$cur_vv}
```

```
    fi
  fi
end_activate

# initialisation de l'agent chargé de l'affichage de la
# direction du vent
init dv2
  set cur_dv {$dirVent}
  set text {$cur_dv}
end_init

# activation de l'agent chargé de l'affichage de la
# direction du vent
activate dv2
  if {($updateTime == 1) || ($updateTime == 2)}
    set old_dv {$cur_dv}
    set cur_dv {$data[$meteo_chn][2]}
  else
    if {$updateTime == 4}
      set old_dv {$cur_dv}
      set cur_dv {$dirVent}
    fi
  fi

  if {$old_dv != $cur_dv}
    switch
      case {($cur_dv >= 23) && ($cur_dv < 68)}
        set text {'Nord-Est  '}
      case {($cur_dv >= 68) && ($cur_dv < 113)}
        set text {'Est       '}
      case {($cur_dv >= 113) && ($cur_dv < 158)}
        set text {'Sud-Est   '}
      case {($cur_dv >= 158) && ($cur_dv < 203)}
        set text {'Sud       '}
      case {($cur_dv >= 203) && ($cur_dv < 248)}
        set text {'Sud-Ouest '}
      case {($cur_dv >= 248) && ($cur_dv < 293)}
        set text {'Ouest     '}
      case {($cur_dv >= 293) && ($cur_dv < 338)}
        set text {'Nord-Ouest'}
      default
        set text {'Nord      '}
    end_switch
  fi
end_activate

# script d'activation du bouton chargé de lancer un
# diaporama de présentation
activate bouton1
  if {$boutonsActifs}
    if {$mouse_over}
      rgb 65535 0 0

      if {$button_pressed}
        load "$jdh/ini/diapo.ini"
      fi
    else
      rgb 32768 32768 32768
    fi
  fi
end_activate

# script d'activation du bouton chargé de lancer un
# parcours rapide d'une année entière
activate bouton2
  switch
    case {$boutonsActifs}
      if {$mouse_over}
        rgb 65535 0 0

        if {$button_pressed}
          set boutonsActifs 0
          set timeAgentActif 0
          set bouton2Actif 1
          set premierJour {$day}
          set day {$day + 1}
          if {$day == 365}
            set day 0
          fi
          set updateTime 1
        fi
      else
        rgb 32768 32768 32768
      fi
    case {$bouton2Actif}
      if {$premierJour == $day}
        set boutonsActifs 1
        set bouton2Actif 0
        set updateTime 0
        set timeAgentActif 1
      else
        set updateTime 1
        set day {$day + 1}
        if {$day == 365}
          set day 0
        fi
      fi
  end_switch
end_activate

# script d'activation du bouton chargé de lancer un
# parcours rapide d'une journée entière
activate bouton3
```

```
switch
  case {$boutonsActifs}
    if {$mouse_over}
      rgb 65535 0 0

      if {$button_pressed}
        set boutonsActifs 0
        set timeAgentActif 0
        set bouton3Actif 1
        set premiereMin {$min}
        set min {$min + 5}
        if {$min >= 1440}
          set min {$min - 1440}
        fi
        set updateTime 1
      fi
    else
      rgb 32768 32768 32768
    fi
  case {$bouton3Actif}
    if {$premiereMin == $min}
      set boutonsActifs 1
        set bouton3Actif 0
        set updateTime 0
        set timeAgentActif 1
      else
        set updateTime 1
        set min {$min + 5}
        if {$min >= 1440}
          set min {$min - 1440}
        fi
      fi
  end_switch
end_activate
}

# initialise un certain nombre de variables
source $env(JDHRC)

# appelle la procédure de déclaration des familles
families
# appelle la procédure de déclaration des lois
laws
```

ANNEXE E : FICHIER DE CONFIGURATION DES PROIES ET DES PRÉDATEURS

```
########################################################
# déclaration des familles d'agents
########################################################
proc families {} {
  geometry 400 600 400 0 1 1

  # parcelles d'herbe
  patch_family local rectangle 8 12
    largeur 1 1 1
    hauteur 1 1 1
    taille 50 50 50
    private_color
    # quantité d'herbe d'une parcelle
    internalParam herbe 0 0 100
    # quantité de proies mortes sur la parcelle
    internalParam cadavre 0 0 100
  end_family

  # proies
  family proie starpoly 5
    # géométrie
    bras 10 10 1.0 1.0 1 0
    passage 0.49 0.51 1.0 1.0
    visee 0.49 0.51 1.0 1.0
    taille 10 0 100
    # paramètres internes des proies
    internalParam mort 0 0 1
    internalParam energy 0 0 100
    internalParam cpt 0 0 1000
    # paramètres externes des proies
    externalParam proie_presence linear 10 0 100 50 0 400
    externalParam cadav linear 0 0 10000 0 0 400
  end_family

  # prédateurs
  family predateur starpoly 5
    bras 3 3 0.5 1.0 1 1
    passage 0.49 0.51 0.6 0.6
    visee 0.49 0.51 0.5 0.5
    taille 10 0 100
    # paramètres internes des prédateurs
    internalParam mort 0 0 1
    internalParam energy 0 0 100
    internalParam cpt 0 0 1000
    # paramètres externes des prédateurs
    externalParam pred_presence linear 10 0 100 50 0 400
    externalParam cadav linear 0 0 10000 0 0 400
    externalParam kill linear 0 0 10000 0 0 400
    externalParam coop linear 0 0 10000 0 0 400
  end_family

  # légende des formes et des couleurs
  family legende image 1
    image "legende.ppm"
    position 200 300
  end_family

  ####################
  # paramètres globaux
  ####################
  # paramétrage des caractéristiques des proies et des
  # prédateurs
  globalParam dist_perc_pred 100 0 300
  globalParam dist_perc_proie 100 0 300
  globalParam vit_pred 1 1 20
  globalParam vit_proie 1 1 20
  globalParam fertil_pred 0 0 10
  globalParam fertil_proie 0 0 10
  globalParam metabo_pred 1 1 10
  globalParam metabo_proie 1 1 10
  # vitesse de régénération des parcelles d'herbe
  globalParam regen 10 0 100
}

########################################################
# définition des lois
########################################################
proc laws {} {
# script d'initialisation des parcelles d'herbe
init local
  set herbe {irand(100)}
  set cadavre 0
end_init

# script d'activation des parcelles d'herbe
activate local
  # régénération de la quantité d'herbe
  set herbe {$herbe + (0.001 * $regen)}
  # mise à jour de la couleur de la parcelle
  tsl 120 {$herbe / 5} 100
end_activate

# script d'initialisation des proies
init proie
  set energy 50
  set max_speed 5
  set speed_x {rand(2*$max_speed)-$max_speed}
  set speed_y {rand(2*$max_speed)-$max_speed}
  set mort 0
  set cadav 0
  set proie_presence 10
  set proie_presence {-$dist_perc_pred}
  set fertil 3000
  set cpt {$fertil + irand($fertil)}
  rgb 0 0 0
  set size 10

  if {$dist_perc_pred == 0}
    set proie_presence 0
  else
    set proie_presence 10
    set proie_presence {-$dist_perc_pred}
  fi
end_init

# script d'activation des proies
activate proie
  if {$mort == 1}
    if {$cadavre == 0}
      die
    else
      set speed_x 0
      set speed_y 0
      set proie_presence 0
      rgb 0 0 0
      set cadav 10
      set cadav {-($dist_perc_pred*2)}
      set size {$cadavre / 10}
    fi
  else
    set size {($energy/10)+2}
    if {$cpt > 0}
      set cpt {$cpt - 1}
    fi
    if {($cpt == 0) && ($energy >= 75)}
      reproduce
      set cpt {$fertil + irand($fertil)}
      set energy {$energy - 50}
    fi
    if {$energy == 0}
      set cadavre {$cadavre + 25}
      set mort 1
      set speed_x 0
      set speed_y 0
      set proie_presence 0
    else
      switch
        case {intensity($kill) > 10}
          set cadavre {($cadavre + 25) + $energy}
          set energy 0
          set speed_x 0
          set speed_y 0
          set proie_presence 0
          set mort 1
        case {intensity($pred_presence) > 1}
          set accel_vec {gradient($pred_presence) * 0.3}
          rgb 65535 0 0
        case {($energy < 75) && ($herbe > 0.2)}
          set speed 0
          set energy {$energy + 0.1}
          set herbe {$herbe - 0.2}
          rgb 0 65535 0
        default
          set accel_x {rand(4)-2}
          set accel_y {rand(4)-2}
          rgb 0 0 65535
       end_switch

      set energy {$energy - ((0.005 + ($speed * 0.01))*($metabo_proie/5))}
    fi
  fi
end_activate

init predateur
  set energy 50
  set max_speed 6
  set dist_perc_pred 100
```

```
  set speed_x {rand(2*$max_speed)-$max_speed}
  set speed_y {rand(2*$max_speed)-$max_speed}
  set fertil 3000
  set cpt {$fertil + irand($fertil)}
  set mort 0
  set cadav 0
  set boss 0
  set os 0
  set coop 0

  set kill 10
  set kill {-10}
  rgb 0 0 0
  set size 10
  set metabo_pred 2
end_init

activate predateur
  if {$dist_perc_proie == 0}
    set pred_presence 0
  else
    set pred_presence 10
    set pred_presence {-$dist_perc_proie}
  fi

  if {$mort == 1}
    if {$cadavre == 0}
      die
    else
      set speed_x 0
      set speed_y 0
      set size {($cadavre *3)/ 20}
      set cadav 10
      set cadav {-($dist_perc_pred*2)}
      rgb 0 0 0
    fi
  else
    set size {(($energy*3)/20)+3}
    if {$cpt > 0}
      set cpt {$cpt - 1}
    fi
    if {($cpt == 0) && ($energy >= 75)}
      reproduce
      set cpt {$fertil + irand($fertil)}
      set energy {$energy - 50}
    fi
    switch

      case {$energy == 0}
        set cadavre {$cadavre + 25}
        set mort 1
        set pred_presence 0
        set speed_x 0
        set speed_y 0

      case {$boss == 1}
        switch
          case {intensity($proie_presence) <= 1}
            set boss 0
            set coop 0
          case {($energy < 25) && ($cadavre > 0)}
            set boss 0
            set coop 0
            set accel 0
            set energy {$energy + 0.2}
            set cadavre {$cadavre - 0.4}
            rgb 50000 50000 50000
          case  {($energy  <  25)  &&  (intensity($cadav)  >
1)}
            set boss 0
            set coop 0
            set accel_vec {gradient($cadav) * (-0.1)}
            rgb 50000 50000 50000
          default
            set accel_vec {gradient($proie_presence) * (-
0.5)}
            rgb 65535 0 0
        end_switch

      case {$os == 1}
        switch
          case {intensity($coop) <= 1}
            set os 0
          case {($energy < 25) && ($cadavre > 0)}
            set os 0
            set accel 0
            set energy {$energy + 0.2}
            set cadavre {$cadavre - 0.4}
            rgb 50000 50000 50000
          case  {($energy  <  25)  &&  (intensity($cadav)  >
1)}
            set os 0
            set accel_vec {gradient($cadav) * (-0.1)}
            rgb 50000 50000 50000
          default
            set accel_vec {gradient($coop) * (-0.5)}
            rgb 65535 32768 32768
        end_switch

      default
        switch
          case {$cadavre > 0}
            set accel 0
            set energy {$energy + 0.2}
            set cadavre {$cadavre - 0.4}
            rgb 50000 50000 50000
          case {intensity($cadav) > 1}
            set accel_vec {gradient($cadav) * (-0.1)}
            rgb 50000 50000 50000
          case {intensity($coop) > 1}
            set os 1
            set accel_vec {gradient($coop) * (-0.5)}
            rgb 65535 0 0
          case {intensity($proie_presence) > 1}
            set boss 1
            set coop 10
            set coop -200
            set accel_vec {gradient($proie_presence) * (-
0.4)}
            rgb 65535 0 0
          default
            set accel_x {rand(4)-2}
            set accel_y {rand(4)-2}
            rgb 0 0 65535
        end_switch
    end_switch
    set   energy   {$energy   -   ((0.005   +   ($speed   *
0.01))*($metabo_pred/5))}
  fi
end_activate
}

source $env(JDHRC)
set rep [file join $jdh bernard]

families
laws
```