



HAL
open science

**Contribution à la modélisation et à la prise en compte
informatique de niveaux de descriptions multiples.
Application aux écosystèmes aquatiques *Penicillo haere,*
*nam scalas aufero***

Pierrick Tranouez

► **To cite this version:**

Pierrick Tranouez. Contribution à la modélisation et à la prise en compte informatique de niveaux de descriptions multiples. Application aux écosystèmes aquatiques *Penicillo haere, nam scalas aufero*. Modélisation et simulation. Université du Havre, 2005. Français. NNT : . tel-00394623

HAL Id: tel-00394623

<https://theses.hal.science/tel-00394623>

Submitted on 12 Jun 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à la modélisation et à la prise en compte informatique de niveaux de descriptions multiples. Application aux écosystèmes aquatiques



Pierrick TRANOUEZ

Denicillo haerz, nam scalas aufero

Université du Havre
École doctorale SPMII
Laboratoire d'Informatique du Havre

Thèse de doctorat
Spécialité : Informatique

par

Pierrick TRANOUEZ

Contribution à la modélisation et à la prise en compte informatique de niveaux de descriptions multiples.

Application aux écosystèmes aquatiques

Soutenue le 21 mars 2005

Composition du jury

| | | | |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| <i>Rapporteurs</i> | G. Duchamp E. Perrier | Professeur DR | (LIPN Univ. Paris 13) (IRD) |
| <i>Examineurs</i> | T. Paquet E. Ramat | Professeur Professeur | (PSI Univ. Rouen) (LIL Univ. du Littoral) |
| <i>Directeurs</i> | A. Cardon C. Bertelle | Professeur MdC HDR | (LIH Univ. Le Havre) (LIH Univ. Le Havre) |

Penicillo haere, nam scalas aufero

Remerciements

Voilà, lecteur, si tu lis cette thèse dans l'ordre tu commences par cette page, mais moi c'est par celle-ci que ma rédaction se termine. Je l'ai repoussé jusqu'à ce que je ne puisse plus, mais voici venu l'exercice des remerciements, délicat s'il en est : ailleurs les maladroites agacent, ici elles fâchent. Mais assez procrastiné, en route.

Comme il est de coutume mais aussi parce que c'est très mérité, je commencerais par remercier pour ma croissance Alain Cardon pour le terreau dont je me suis nourri, récolté sur les nombreux chemins qu'il défriche, et Cyrille Bertelle pour m'y avoir régulièrement arrosé. Sans vous cette thèse serait au mieux très différente, et ne serait même possiblement pas.

Édith Perrier et Gérard Duchamp sont les rapporteurs de cette thèse. Cela signifie notamment qu'ils ont été les premiers spécialistes hors de mon groupe à lire en détail et commenter mon travail, ce qui fut pour l'auteur extrêmement intéressant, au sortir du tunnel qu'est la terminaison d'une thèse. D'autant plus que, bien que travaillant dans des domaines très différents l'un de l'autre, la force commune de leur analyse met en exergue le chemin qui sépare l'impétrant du chercheur d'expérience. Merci pour ce regard sur mon passé proche et cette perspective d'avenir.

Merci à Éric Ramat et Thierry Paquet, dont l'œuvre directe comme indirecte a nourri cette thèse, d'avoir accepté de l'examiner.

Merci donc directeurs, rapporteurs et examinateurs, sincèrement et pas (seulement) par flagornerie traditionnelle. Élargissons maintenant le champ de ce dithyrambe, chronologiquement par exemple.

Je remercierais alors mes parents, parce que je suis un bon garçon, puis mon instituteur, Robert Barré, dont le socle des connaissances qu'il m'a construites a assis ma scolarité pendant longtemps.

Avance rapide, je remercie ensuite mes deux premiers co-thésards, Stéphane Durand et Franck Lesage, pour m'avoir fait croire que faire une thèse c'était une bonne idée. Mordieux.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au conseil régional de Haute-Normandie, non seulement pour m'avoir donné des sous, mais également pour m'avoir soutenu contre la guerre et m'avoir ainsi évité d'être parmi les Derniers des Cons.

Merci ensuite notamment aux quadras¹ du labo et assimilés, Claude « Mulder » Duvallet, Frédéric Guinand, Jean-Luc « Gaymard » Ponty, Laurent « Pupu » Amanton, Stefan Balev et la très aimable Véronique Jay, ou au fabuleux docteur docteur Joël Colloc. Mention particulière à Damien Olivier, parce que quand même hein, mais aussi de nouveau à Cyrille « Tom Moore » Bertelle, parce qu'il le vaut bien.

Continuons avec des remerciements pour des encore plus jeunes, nommément les thésards du labo. Bises aux dames et poignée de main aux messieurs en général, mais affinons quand même un peu l'échelle. Saluons Guillaume, Antoine et Sylvain, sans qui l'équipe ne s'appellerait pas GASP, ce qui serait quand même dommage. Plus en détail, merci à Antoine parce que geek, c'est plus drôle à plusieurs, à Sylvain pour sa patience invincible et à

¹ Je me demande si dans vingt ans ce passage se relira la larme à l'œil.

Guillaume heu ... pour son calme et sa mesure. Un coucou également à Jérôme, qu'est pas trop mal pour un sgueubeude, et aux ptits jeunes Denis et Yoann, parce qu'ils racontent bien les bêtises.

Je salue les mailing listes de lutte contre les obscurantismes auxquelles je participe, comme celle du Cercle Zététique, de l'Observatoire Zététique, de l'AFIS et du Café Toutologue ex. Manoucratie. J'y ai rencontré des gens très brillants et des connards, certains d'une culture transversale colossale d'autres d'une ignorance abyssale, ce qui a été de multiples fois très enrichissant pour ma compréhension globale du processus scientifique.

Un grand merci à toutes les cafetières et machines à expresso sans qui je ne serais rien. Je tiens à distinguer tout particulièrement Maison du Café pour son Or si admirable.

A ma Famille pour l'ensemble de son œuvre

Aux Pierre Tranouez

A Catherine, ma Compagne, et à Aliénor, mon bébé

Table des matières

| | | |
|--------------------------|--|-----------|
| <u>CHAPITRE 0</u> | <u>UN MODÈLE À GRANDE ÉCHELLE DE CETTE THÈSE</u> | 15 |
| 0.1 | D’OÙ VENONS-NOUS ? | 17 |
| 0.2 | OÙ ALLONS-NOUS ? | 17 |
| <u>CHAPITRE 1</u> | <u>THÉORIES, MODÈLES ET SIMULATIONS</u> | 21 |
| 1.1 | THÉORIES | 23 |
| 1.2 | MODÈLES | 23 |
| 1.3 | MODÈLES THÉMATIQUES ET OPÉRATIONNELS | 25 |
| 1.4 | SIMULATIONS | 26 |
| 1.5 | DIFFÉRENTS PRINCIPES DANS LA CONSTRUCTION DE MODÈLES | 27 |
| 1.5.1 | MODÉLISATION À BASE DE LOIS ET MODÉLISATION À BASE DE RÈGLES | 27 |
| 1.5.2 | NOTIONS CONNEXES DANS D’AUTRES DISCIPLINES : INTERSECTIONS ET DISJONCTIONS | 27 |
| 1.5.3 | GESTION DU TEMPS : ÉVÉNEMENTS DISCRETS OU PAS DE TEMPS | 28 |
| 1.6 | APPROCHES PEU RÉDUCTIONNISTES | 28 |
| 1.6.1 | RÉDUCTIONNISME | 29 |
| 1.6.2 | CYBERNÉTIQUE | 31 |
| 1.6.3 | SYSTÈMES | 35 |
| 1.6.4 | HOLARCHIES | 37 |
| 1.7 | SIMULATION MULTIAGENT | 39 |
| 1.7.1 | INTELLIGENCE ARTIFICIELLE | 39 |
| 1.7.2 | SYSTÈMES MULTIAGENTS | 40 |
| 1.7.3 | SIMULATION PAR SMA | 42 |
| <u>CHAPITRE 2</u> | <u>CHANGEMENTS D’ÉCHELLES</u> | 43 |
| 2.1 | ÉCHELLES ET NIVEAUX DE DESCRIPTION | 45 |
| 2.2 | DIFFÉRENTES APPROCHES | 46 |
| 2.2.1 | NOTIONS D’ÉCHELLES EN MÉCANIQUE DES FLUIDES | 46 |
| 2.2.2 | NOTIONS D’ÉCHELLES EN HYDROGÉOLOGIE | 46 |
| 2.2.2.1 | Modèle multiéchelle de la porosité (IRD) | 46 |
| 2.2.2.2 | Modèle d’infiltration à base de loi | 48 |
| 2.2.3 | AUTOMATES CELLULAIRES | 48 |
| 2.2.4 | APPROCHES AGENTS | 50 |
| 2.2.4.1 | Une holarchie fixée a priori : GEAMAS | 50 |
| 2.2.4.2 | Rivage | 53 |
| 2.2.4.3 | Projet Copépode | 55 |
| 2.2.4.4 | ABIS | 57 |
| 2.3 | ANALYSE DES MÉTHODES DÉCRITES | 58 |
| 2.3.1 | RÈGLES ET LOIS | 58 |
| 2.3.1.1 | Changer d’échelle dans un modèle à base de lois | 58 |
| 2.3.1.2 | Changer d’échelle dans un modèle à base de règles | 58 |
| 2.3.1.3 | Changer d’échelle dans un modèle mixte | 59 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.3.1.4 | Conclusion | 60 |
| 2.3.2 | BUTS | 60 |
| 2.3.2.1 | Prendre en compte les aspects hiérarchiques des systèmes étudiés | 60 |
| 2.3.2.2 | Présenter plus clairement les réponses de la simulation | 60 |
| 2.3.2.3 | Faire les deux | 60 |
| 2.3.3 | QUAND CHANGER D'ÉCHELLE ? | 61 |
| 2.3.3.1 | A priori | 61 |
| 2.3.3.2 | A posteriori | 61 |
| 2.3.3.3 | In medias res | 61 |

CHAPITRE 3 CHANGEMENT D'ÉCHELLE AU SEIN DE LA COUCHE DE COMMUNICATION D'UN SIC **63**

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1 | SITUATIONS D'URGENCE ET PROBLÈMES DE COMMUNICATION | 65 |
| 3.1.1 | LES MESSAGES ET L'AMBIGUÏTÉ SUR LES INTENTIONS | 65 |
| 3.1.2 | SITUATIONS D'URGENCES ET DE CRISE | 65 |
| 3.1.3 | SICS | 66 |
| 3.1.4 | COMMUNIQUER DANS LE SIC ÉTUDIÉ | 66 |
| 3.1.5 | SPÉCIFICITÉS DE L'INTERPRÉTATION DES MESSAGES ÉCHANGÉS | 68 |
| 3.2 | AIDE À L'INTERPRÉTATION DES MESSAGES ÉCHANGÉS DANS ABIS | 69 |
| 3.2.1 | LES AGENTS ASPECTUELS | 70 |
| 3.2.2 | LA COUCHE MORPHOLOGIQUE | 72 |
| 3.2.2.1 | Notions locales | 72 |
| 3.2.2.2 | Agents de morphologie | 73 |
| 3.2.2.3 | Extractions des faits saillants : les chréodes | 74 |
| 3.3 | ÉTUDE DE CAS : COLLISION ENTRE UN CAMION CITERNE ET UN TRAIN DE VOYAGEURS | 77 |
| 3.3.1 | LE SCÉNARIO | 77 |
| 3.3.2 | LES MESSAGES EN DÉTAIL | 78 |
| 3.3.3 | DÉROULEMENT | 79 |
| 3.4 | CONCLUSION | 85 |

CHAPITRE 4 ECOSYSTÈME ESTUARIEN **87**

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.1 | NOTION D'ÉCOSYSTÈME | 89 |
| 4.1.1 | DE L'ÉCOLOGIE AUX ÉCOSYSTÈMES | 89 |
| 4.1.2 | DES ÉCOSYSTÈMES VUS COMME DES SYSTÈMES OUVERTS HOLARCHIQUES ET AUTO-ORGANISÉS | 91 |
| 4.1.3 | PROPRIÉTÉS SOHO DES ÉCOSYSTÈMES | 91 |
| 4.2 | SPÉCIFICITÉS DE L'ESTUAIRE | 93 |
| 4.2.1 | INCARNATION DES PROPRIÉTÉS | 93 |
| 4.2.2 | CHOIX D'ÉTUDE | 93 |
| 4.3 | PRINCIPALES MÉTHODES HYDRODYNAMIQUES | 93 |
| 4.3.1 | LES MODÈLES UTILISÉS EN MÉCANIQUE DES FLUIDES | 93 |
| 4.3.2 | MAILLAGES. | 94 |
| 4.3.3 | MÉTHODES PARTICULAIRES | 96 |
| 4.3.4 | MÉTHODES DES GAZ SUR RÉSEAUX | 97 |
| 4.3.5 | PHÉNOMÈNE DE TURBULENCE ET ÉCHELLES DE LONGUEUR | 99 |
| 4.3.6 | MÉTHODES DE TYPE LARGE EDDY SIMULATION (LES) | 103 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.3.7 | ÉCHELLES TEMPORELLES, CORRÉLATIONS SPATIO-TEMPORELLES ET MÉMOIRE DE LA TURBULENCE | 105 |
| 4.3.8 | LOIS D'HOMOGENÉISATION, DE TYPE DARCY | 105 |
| 4.4 | CONCLUSION. | 105 |

CHAPITRE 5 SIMULATION D'ÉCOULEMENT FLUIDE **107**

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.1 | PRÉSENTATION | 109 |
| 5.2 | COUCHE DES PARTICULES | 110 |
| 5.3 | DES PARTICULES AUX AGENTS VORTEX : DÉTECTION DES ORGANISATIONS | 112 |
| 5.3.1 | TRIANGULATION DE DELAUNAY | 113 |
| 5.3.2 | ARBRE DE RECOUVREMENT DE POIDS MINIMAL | 114 |
| 5.3.3 | DE L'ARBRE À LA FORÊT : PREMIERS CLUSTERS | 115 |
| 5.3.4 | CALCUL DES ENVELOPPES CONVEXES DES ARBRES DE LA FORÊT | 115 |
| 5.3.5 | CALCUL DES ELLIPSES LES PLUS PROCHES DE L'ENVELOPPE CONVEXE OBTENUE. | 117 |
| 5.4 | COUCHE DES STRUCTURES ET ORGANISATIONS RÉIFIÉES | 119 |
| 5.4.1 | UN SYSTÈME MULTIAGENT. | 119 |
| 5.4.2 | MADKIT | 120 |
| 5.4.3 | AUTRE IMPLÉMENTATION : DÉROULEMENT SYNCHRONISÉ DES AUTOMATES | 121 |
| 5.4.4 | VIE DES TOURBILLONS | 125 |
| 5.4.5 | DÉTAILS DES NOTIONS CONSTITUTIVES DE L'ÉCO-AGENT | 129 |
| 5.4.5.1 | Percevoir des gêneurs | 129 |
| 5.4.5.2 | Agresser d'autres structures | 130 |
| 5.4.5.3 | Fuir | 130 |
| 5.4.5.4 | Se satisfaire | 131 |
| 5.4.6 | DÉPLACEMENTS | 136 |
| 5.4.7 | OBSTACLES | 137 |
| 5.5 | PERCEPTION ET ENVIRONNEMENT | 138 |
| 5.5.1 | GESTION DYNAMIQUE PAR GRILLE :LES N-TREES. | 138 |
| 5.5.2 | EXEMPLE SIMPLE DE NTREE | 141 |
| 5.5.3 | UNE PERCEPTION HEURISTIQUE MAIS RAPIDE POUR LES ENTITÉS. | 142 |
| 5.6 | UTILISER LES N-TREES POUR DÉTECTER DES ORGANISATIONS DENSES : DOD | 143 |
| 5.7 | COMBINER DOD ET DSE | 148 |

CHAPITRE 6 A MODELLING METHODOLOGY TO HANDLE ESTUARIAL ECOSYSTEM COMPLEXITY **149**

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.1 | ABSTRACT | 151 |
| 6.2 | ECOSYSTEM ARE COMPLEX MULTI-SCALE SYSTEM | 151 |
| 6.2.1 | STUDYING ECOSYSTEMS USING GENERAL SYSTEM THEORY CONCEPTS | 152 |
| 6.2.2 | LAW-BASED MODELS VS. RULE-BASED MODELS | 152 |
| 6.2.3 | MIXED MODELS FOR ECOLOGICAL PURPOSES | 153 |
| 6.2.4 | CHANGING THE SCALE: MEANS AND GOALS | 153 |
| 6.3 | METHODOLOGY AND META-MODELING | 154 |
| 6.3.1 | CONCEPTUAL BASIS : AN HOLARCHIC HYBRID MODEL FOR ECOSYSTEMS | 154 |
| 6.3.2 | META-ONTOLOGY TO DESCRIBE GENERAL ECOSYSTEM | 156 |
| 6.3.3 | APPLICATION TO AN EXAMPLE OF AN AQUATIC ECOSYSTEM | 156 |
| 6.3.3.1 | Using the Ecosystem part of meta-ontology | 157 |
| 6.3.3.2 | Using the Entities of meta-ontology (individual, compartment, ...) | 157 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 6.3.3.3 | Sum up | 158 |
| 6.4 | A THREE-PART FRAMEWORK FOR THE IMPLEMENTATION OF SIMULATIONS | 159 |
| 6.4.1 | THREE COMPARTMENTS AQUATIC ECOSYSTEM | 159 |
| 6.4.2 | SIMULATION OF A MULTI-SCALE FLUID FLOW MODEL | 160 |
| 6.4.2.1 | Fluid mechanic model | 160 |
| 6.4.2.2 | Multi-level description based on emergent structures detection | 161 |
| 6.4.3 | DYNAMICAL DISTRIBUTION | 161 |
| 6.5 | CONCLUSION | 162 |
| 6.6 | REFERENCES | 163 |

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES **173**

| | | |
|------------|--|------------|
| | Préambule | 175 |
| 7.1 | CE QUI A ÉTÉ FAIT AUJOURD’HUI | 175 |
| 7.1.1 | TRAJECTOIRE DU MÉMOIRE | 175 |
| 7.1.2 | FORCES ET FAIBLESSES DES DIFFÉRENTES MÉTHODES. | 175 |
| 7.1.2.1 | Structures et organisations | 176 |
| 7.1.2.2 | Nombre d’organisations statique vs dynamique | 177 |
| 7.1.2.3 | Prise en compte du temps | 177 |
| 7.1.2.4 | Détection ascendante ou descendante | 177 |
| 7.1.2.5 | Récapitulatif | 178 |
| 7.2 | CE QUI SERA FAIT DEMAIN | 178 |
| 7.2.1 | COUPLAGE VIVANT/FLUIDE | 178 |
| 7.2.2 | DISTRIBUTION DU CALCUL | 179 |
| 7.3 | APRÈS-DEMAIN ... | 179 |

CHAPITRE 8 PUBLICATIONS ET BIBLIOGRAPHIE **181**

| | | |
|------------|--|------------|
| 8.1 | PUBLICATIONS | 183 |
| 8.1.1 | ARTICLES EN CONFÉRENCES INTERNATIONALES FRANCOPHONES | 183 |
| 8.1.2 | ARTICLES EN CONFÉRENCES INTERNATIONALES | 183 |
| 8.1.3 | ARTICLE EN REVUE | 184 |
| 8.1.4 | PARTICIPATIONS À DES MANIFESTATIONS | 184 |
| 8.1.4.1 | Présentations lors de conférences | 184 |
| 8.1.4.2 | Divers | 184 |
| 8.2 | BIBLIOGRAPHIE | 185 |

Table des illustrations

| | |
|--|-----|
| Figure 1 : Cycle de modélisation par simulation | 26 |
| Figure 2 : Régulateur de la machine à vapeur de Watt | 31 |
| Figure 3 : Machine à vapeur de watt en entier | 32 |
| Figure 4 : Principe de fonctionnement du régulateur de Watt | 33 |
| Figure 5 : Système interagissant quelconque | 33 |
| Figure 6 : Système interagissant possédant une boucle de rétroaction | 34 |
| Figure 7 : Un système de la GST | 36 |
| Figure 8 : Systèmes ouverts / Systèmes fermés (inspiré de [Ros 75]) | 37 |
| Figure 9 : Exemple d'holararchie dans la description d'un être vivant | 38 |
| Figure 10 : Automate cellulaire auto-réplicateur de Friedkin (1960) | 49 |
| Figure 11 : Automate cellulaire auto-réplicateur de Langton (1985) | 50 |
| Figure 12 : Propriétés récursives de GEAMAS | 51 |
| Figure 13 : Schéma de l'architecture de base de GEAMAS | 52 |
| Figure 14 : Agents boule d'eau et hauteur d'eau correspondante. D'après [Ser 00] | 53 |
| Figure 15 : Comparaison entre le modèle hydrodynamique de Rivage et le modèle à base de loi de St-Venant (d'après [Ser 00]) | 54 |
| Figure 16 : Illustration des structures auxquelles Rivage s'intéresse | 54 |
| Figure 17 : Quelques copépodes adultes | 55 |
| Figure 18 : Principe du calcul d'une fonction émergente (d'après [Dub 04]) | 57 |
| Figure 19 : Schéma du système distribué | 69 |
| Figure 20: Les trois couches du système locales à chaque décideur | 70 |
| Figure 21 : Macro-automate de comportement d'un agent aspectuel | 71 |
| Figure 22 : Interprétation d'un trait sémantique par un agent | 71 |
| Figure 23 : Les agents de Morphologie se comportent comme des corps pesants | 73 |
| Figure 24: Représentation d'une organisation d'agents de morphologie | 74 |
| Figure 25 : Représentation de l'importance | 75 |
| Figure 26 : Illustration du calcul de la prégnance | 76 |
| Figure 27 : Acteurs du scénario de collision. | 77 |
| Figure 28 : Agent en perdition (suprématie nulle, vitesse négative) | 81 |
| Figure 29 : L'agent aspectuel est suprême | 82 |
| Figure 30 : Graphe morphologique de suprématie | 82 |
| Figure 31 : Graphe morphologique de vitesse | 83 |
| Figure 32 : Graphe morphologique de facilité | 83 |
| Figure 33 : Agent aspectuel reçu représentant l'implication d'un train dans une explosion. | 84 |
| Figure 34 : Agent aspectuel émis représentant l'implication d'un train dans une explosion. | 85 |
| Figure 35 : Exemple de biomes sur l'estuaire de la Seine (d'après Seine Aval [Gue 99]) | 92 |
| Figure 36 : Exemple de maillage | 95 |
| Figure 37 : Allées de Von Karman par maillage | 96 |
| Figure 38 : Exemple de modèle HPP | 98 |
| Figure 39 : Exemple de modèle FHP | 99 |
| Figure 40 : Allées tourbillonnaires dites de Von Karman de nuages s'étendant sur 300 kilomètres au sud de l'île de Jan Mayen | 101 |
| Figure 41 : Allées tourbillonnaires de Von Karman derrière un cylindre en laboratoire. | 102 |
| Figure 42 : Allées de Von Karman d'après Léonard de Vinci (circa 1510) | 103 |
| Figure 43 : La grande tache rouge de Jupiter, une des plus grandes structures hydrodynamiques stables connues. [Rob 01] | 106 |
| Figure 44 : Vortex élémentaires de différentes échelles (Léonard de Vinci circa 1510) | 109 |
| Figure 45 : Une capture d'écran de la simulation | 110 |
| Figure 46 : Les structures que nous souhaitons détecter (d'après [Rob 01]) | 112 |
| Figure 47 : Schéma récapitulatif de la détection d'agrégats | 113 |
| Figure 48 : Un pas de la triangulation de Delaunay | 114 |
| Figure 49 : ARPM (traits pleins) sur une triangulation de Delaunay (traits pointillés) | 115 |
| Figure 50 : Résultat du calcul des enveloppes convexes. | 116 |
| Figure 51 : Déroulement de l'algorithme d'élimination des concavités | 117 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figure 52 : Exemples de calcul d'identification d'une ellipse à partir d'un ensemble de points avec les deux méthodes (Gander (clair) et Fitzgibbon (foncé)).</i> | 118 |
| <i>Figure 53 : Ellipses correspondant mal au nuage de points</i> | 119 |
| <i>Figure 54 : Gestion de l'accès au calcul dans MadKit</i> | 121 |
| <i>Figure 55 : Graphe de dépendance (UML) des packages d'Aquasys</i> | 123 |
| <i>Figure 56 : Graphe de dépendance du package environment</i> | 125 |
| <i>Figure 57 : Transducteur codant le comportement d'un éco-agent</i> | 127 |
| <i>Figure 58 : Graphe de dépendance du package automaton</i> | 128 |
| <i>Figure 59 : Zone de perception d'une structure</i> | 129 |
| <i>Figure 60 : Différents cas de figure de la perception de gène</i> | 130 |
| <i>Figure 61 : Fuite d'un Tourbillon</i> | 130 |
| <i>Figure 62 : Particules considérées lors d'une satisfaction</i> | 132 |
| <i>Figure 63 : Particules présélectionnées pour l'assimilation</i> | 133 |
| <i>Figure 64 : Deux structures de même rotationnel en collision.</i> | 134 |
| <i>Figure 65 : Triangulation de Delaunay sur deux structures en collision.</i> | 135 |
| <i>Figure 66 : Rapport des aires</i> | 135 |
| <i>Figure 67 : Fusion réussie</i> | 136 |
| <i>Figure 68 : Gestion d'un obstacle plan</i> | 137 |
| <i>Figure 69 : Gestion d'un obstacle elliptique</i> | 138 |
| <i>Figure 70 : Exemple de N-Tree</i> | 140 |
| <i>Figure 71 : Représentation simplifiée d'un Ntree</i> | 141 |
| <i>Figure 72 : Ntree résultant</i> | 142 |
| <i>Figure 73 : Perception heuristique d'une entité</i> | 143 |
| <i>Figure 74 : Organisations détectées par DOD</i> | 144 |
| <i>Figure 75 : Extrait du code de clustering</i> | 145 |
| <i>Figure 76 : Diagramme UML de l'implémentation de mise au point des NTrees</i> | 147 |
| <i>Figure 77 : A methodology based on a cyclic development</i> | 164 |
| <i>Figure 78 : Producer - phytoplankton</i> | 165 |
| <i>Figure 79 : Consumer - food chain</i> | 165 |
| <i>Figure 80 : Decomposer - bacteria</i> | 166 |
| <i>Figure 81 : Ecosystem parts: producers</i> | 166 |
| <i>Figure 82 : Individuals in this meta-ontology</i> | 166 |
| <i>Figure 83 : localization in our meta-ontology</i> | 167 |
| <i>Figure 84 : Behaviors in our meta-ontology</i> | 167 |
| <i>Figure 85 : Compartments in our meta-ontology</i> | 167 |
| <i>Figure 86 : Space in our meta-ontology</i> | 167 |
| <i>Figure 87 : A holarchic ecosystem with three compartments</i> | 168 |
| <i>Figure 88 : The example simulated with three compartments</i> | 168 |
| <i>Figure 89 : Compartment Eco2 specializes in producing oxygen</i> | 169 |
| <i>Figure 90 : Compartment Eco0 reaches equilibrium</i> | 169 |
| <i>Figure 91 : Visualization of the simulation</i> | 170 |
| <i>Figure 92 : Coloration of the graph.</i> | 171 |

CHAPITRE 0

UN MODÈLE À GRANDE ÉCHELLE DE CETTE THÈSE

Résumé

Nous allons dans ce chapitre introductif décrire le sujet de cette thèse et l'angle d'attaque retenu. Nous expliquons tout d'abord pourquoi et comment l'informatique en tant que science peut être utile à d'autres sciences, et quelles sont les difficultés de communication impliquées. Nous expliquons ensuite le plan de cette thèse, la progression des chapitres, en l'occurrence une évolution somme toute classique de considérations épistémologiques aux différentes applications, et qui finit sur les futurs raccords et ouvertures possibles pour ces travaux.

0.1 D'où venons-nous ?

Les étudiants de première année d'IUT d'informatique au Havre utilisent Java comme langage d'application pour l'apprentissage de l'algorithmique. Les étudiants de Licence 1 attendent un trimestre avant d'être à leur tour initiés aux langages de programmation orientés objet. Décomposer un problème en entités autonomes communicant par messages/appels de méthode est donc très naturel pour les informaticiens qui perdurent dans cette voie.

Parallèlement à cela, les progrès de la puissance de calcul bon marché ont permis un essor énorme du marché des jeux vidéos. Dans ces mondes virtuels, des entités semblant autonomes, obéissant à des règles qui leur sont propres, agissent et interagissent, au prix d'un peu de prestidigitation.

Ces habitudes éducatives comme ludiques font que la simulation d'écosystèmes orientée agent est une approche naturelle pour beaucoup de jeunes informaticiens, au point de méjuger les approches habituellement adoptées par les écologues. Ceux-ci quand ils modélisent pensent plus naturellement en termes quantitatifs que phénoménologiques, en équation plus qu'en comportements². Prenons l'exemple d'une modélisation de la dynamique de populations de prédateurs et de proies. L'approche ordinaire en écologie est d'en écrire un système d'équations différentielles (Chapitre 4), dont les variables quantifient la taille des deux populations. L'intuition de l'informaticien aurait été de coder des prédateurs, des proies, et de laisser tout ce petit monde évoluer dans une simulation. Se poseraient soi dit en passant alors des problèmes de validation du réalisme du comportement des entités représentées. Parce qu'il y a bien sûr des problèmes dans l'approche naïve de l'informaticien : les modèles biologiques ne restent pas vagues par caprice, mais par prudence. Et, également, peut-être, par une connaissance incomplète de ce que l'informatique en général, et l'intelligence artificielle en particulier, pourraient apporter.

Pendant mon DEA et au début de ma thèse, j'ai travaillé au sein du LIH sur un système appelé ABIS, dont le but était d'aider à la communication entre gestionnaires de situations d'urgence (Chapitre 3). Ce système utilisait différentes organisations d'agents pour mettre en évidence des structures dynamiques des discours des différents protagonistes, abordant ainsi le discours à un autre niveau de description. Le sujet lié à ma bourse régionale portant sur les écosystèmes estuariens, nous décidâmes alors de nous intéresser également au changement dynamique d'échelle, c'est-à-dire de détecter les structures ou organisations « émergentes » au cours d'une simulation, et de créer des entités de la simulation les représentant, ce qui correspond bien à changer de niveau de description (Chapitre 4).

0.2 Où allons-nous ?

Ce mémoire débute donc par le présent chapitre, qui a pour but d'expliquer succinctement le thème général de la thèse, le parti pris retenu sur celui-ci, mais surtout de décrire l'articulation du mémoire, son plan et sa progression.

² Induisant au passage des clivages entre biologistes qui pourraient ne pas avoir lieu, mais c'est un autre débat, même si nous y ferons peut-être quelques allusions.

Chapitre 0

Un modèle à grande échelle de cette thèse

Le Chapitre 1 traite modestement d'épistémologie. Notre travail informatique porte sur la simulation informatique, outil de construction scientifique de nombreux domaines des sciences. Ces nombreux domaines ont des approches et un vocabulaire qui leur sont en partie propres. C'est pourquoi il nous a paru nécessaire de défricher un peu ce qu'on pouvait attacher comme sens aux mots du lexique épistémologique de différents domaines des sciences, et préciser aussi à quelles acceptions nous faisons références, afin d'éviter des querelles inutiles à base de quiproquos. Nous y parlerons également des grands duos asymptotiques de construction de la science, comme règles et lois, réductionnisme et systémique, ou pour les simulations temps constant ou événements discrets.

Ceci fixé, nous tâcherons alors de cerner dans le Chapitre 2 ce qu'échelles ou niveaux de description signifient. Nous présenterons ces notions tout d'abord dans différents domaines d'application, puis les sérierons suivant leurs méthodes et leurs buts, en s'appuyant notamment sur les distinctions décrites au Chapitre 1, mais également en distinguant niveaux de description multiples dans le modèle (a priori/ a posteriori) de ceux de la simulation (in medias res).

Nous présenterons alors au Chapitre 3 notre première application à un système d'aide à la communication intégré à un Système d'Information et de Communication. Ce système s'appuie sur plusieurs systèmes multiagents, un premier dit aspectuel s'efforçant de représenter sémantiquement ce qui a été dit, un deuxième dit morphologique travaillant sur le premier et destiné à représenter certaines caractéristiques de celui-ci, et induisant ce faisant un autre niveau de description de ce qui a été échangé, et enfin un troisième dit d'analyse qui synthétise ces différents aspects mettant en évidence certaines caractéristiques saillantes des communications ayant eu lieu.

Au Chapitre 4 sera décrit une deuxième application de notre travail de classification et d'élaboration sur le changement d'échelle, s'attaquant à la modélisation d'écosystèmes. Nous y présenterons sommairement une histoire de l'écologie suivant les axes des Chapitre 1 et Chapitre 2, expliquant notre intérêt pour débiter ce travail par la modélisation de flux de matière et d'énergie. Ceci nous amènera à présenter différents modèles d'hydrodynamique, avant de décrire ceux retenus.

C'est la description de ces méthodes qui débutera le Chapitre 5. Pour la couche sans agent, de description mécanique classique de l'écoulement, nous avons choisi une méthode dite particulière, qui présente des caractéristiques de localité intéressantes pour ce que nous voulons faire. Nous décrirons alors les différentes méthodes destinées à percevoir dynamiquement structures et organisations émergeant au cours de la simulation, puis comment nous créons des entités, des agents, qui représentent celles-ci, remplaçant dans la simulation les entités particulières qui les avaient créées. Nous expliquerons comment ces agents naissent, grandissent, se détériorent et meurent – même si cela ne se déroule pas nécessairement dans un ordre aussi linéaire que les termes choisis pourraient le laisser penser. Nous comparerons enfin différentes méthodes, les nôtres comme d'autres elles classiques, utilisées ou utilisables pour percevoir structures et auto-organisations, cernant leur forces et leur faiblesses dans différents domaines. Enfin, nous décrirons comment nous les combinons pour précisément qu'elles se complètent.

Au cours de ce travail sur le changement d'échelle, et notamment de son application aux écosystèmes estuariens, nous avons été rejoints par d'autres thésards, au sein d'une équipe appelée GASP, composée de quatre thésards et de leurs deux co-encadrants. Le Chapitre 6 décrit le travail réalisé par ce groupe, et sous la forme d'un article soumis à la revue *Hydrobiologia*, illustrant ainsi la manière dont mes travaux s'insèrent dans cette construction collective.

Le Chapitre 7 conclue cette thèse, rappelant ce qui a été fait hier et aujourd'hui, et ouvrant sur ce qui sera fait demain – transport de polluants et d'entités non fluides– et après-demain – application aux réseaux invariants d'échelle et automatisation de la réification d'organisations via la génétique d'automates.

Enfin, nous terminerons par la liste des présentations à la communauté qui ont été faits de ces travaux, ainsi que les références bibliographiques qui ont été nécessaires à ceux-ci.

CHAPITRE 1

THÉORIES, MODÈLES ET SIMULATIONS

« Tout ce qui est simple est faux, tout ce qui ne l'est pas est inutilisable »

Paul Valéry

Résumé

La problématique du changement d'échelle est riche, car elle a des applications dans de nombreux domaines. Le mauvais côté de cette trans-disciplinarité est qu'il va falloir nous doter de références épistémologiques également transversales, afin d'avoir un vocabulaire commun asseyant notre discours. Nous allons ici esquisser quelques définitions scientifiques de base, qui visent essentiellement à préciser ce dont on va parler. On expliquera ainsi ce qu'on entendra par théories, modèles ou simulations, qui sont des mots au cœur de notre travail. Nous tenterons ensuite de présenter quelques axes d'analyse des modèles en général, afin de distinguer en eux des propriétés qui nous serviront de discriminant dans leurs possibilités à inclure des échelles multiples voire des changements dynamiques d'échelles.

1.1 Théories

Le mot théorie vient du mot grec *theorein*³, qui signifie contempler, observer examiner. Dans le langage courant, une théorie est une idée ou une connaissance, spéculative souvent basée sur l'observation ou l'expérience, donnant une représentation idéale, éloignée des applications. Parfois le terme théorie est employé pour désigner quelque chose de temporaire ou pas tout à fait vrai⁴.

En mathématiques et en logique mathématique, une théorie est un ensemble d'affirmations dont certaines sont des axiomes et les autres des théorèmes démontrables à partir de ces axiomes et au moyen de règles de logique. Le théorème d'incomplétude de Gödel déclare qu'aucune théorie cohérente, ayant un nombre fini d'axiomes (dans un langage au moins aussi solide que celui de l'arithmétique), ne peut inclure toutes les affirmations vraies. Autrement dit, une telle théorie contiendra toujours des propositions indécidables.

En sciences, une théorie est un cadre de travail pour la compréhension. En physique, le terme de théorie désigne généralement le support mathématique, dérivé d'un petit ensemble de principes de base, permettant de produire des prévisions expérimentales pour une catégorie donnée de systèmes physiques. Un exemple pourrait être la « théorie électromagnétique » dont les résultats peuvent être calculés à partir des équations de Maxwell.

L'adjectif théorique adjoint à la description de certains phénomènes, indique souvent qu'un résultat particulier a été prédit par une théorie mais n'a pas été encore observé. Par exemple, jusqu'à récemment, des trous noirs étaient encore considérés comme des objets théoriques. Il n'est pas rare dans l'histoire de la physique, que des théories aient produit de telles prévisions et que plus tard ces dernières se soient confirmées par l'expérience.

Pour qu'une théorie d'une science expérimentale soit considérée comme faisant partie des connaissances établies, il est habituellement nécessaire que celle-ci produise une expérience critique, c'est à dire un résultat expérimental qui n'était prédictible par aucune théorie établie précédemment. Une théorie mathématique pourra quant à elle « simplement » être démontrée : construction mentale, sa cohérence logique est sa seule nécessité. Les propositions vraies indémontrables qu'elle contient telles que garanties par Gödel n'intéressent généralement pas les mathématiciens (voir [Del 99] pour une discussion plus poussée sur les rapports entretenus par la plupart des mathématiciens et le théorème de Gödel).

1.2 Modèles

Étymologie empruntée à l'italien *modello*, d'un latin populaire *modellus*, variante du classique *modullus*, diminutif de *modus* « mesure ». Le dictionnaire de l'académie française de 1762 ne

³ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie> au 21/01/05. La wikipedia est une encyclopédie en ligne à construction collective. Cela en fait une source par certains côtés moins stable (chaque article peut être modifié) par d'autres plus (le site a une importance qui garantit qu'il perdure à au moins moyen terme) qu'une référence web ordinaire. Nous y ferons référence lorsque l'article nous paraît intéressant et stable. Ce sera du reste notre politique générale pour les références web.

⁴ D'ailleurs, la première édition du dictionnaire de l'académie française (1694) définit la théorie comme ce qui s'oppose à la pratique : « Connoissance qui s'arreste à la simple speculation sans passer à la pratique ». La seule connotation scientifique est l'utilisation de « théorie des planettes (sic)» pour astronomie.

Chapitre 1

Théories, modèles et simulations

lui donne qu'une acception artistique, mais proche de la scientifique qu'elle inspirera : « Exemple, patron en relief, soit d'une statue, soit de quelque autre ouvrage de Sculpture, d'Architecture, d'après lequel on travaille ensuite pour exécuter ce qu'on s'est proposé ».

Les premiers modèles utilisés en sciences furent les modèles physiques. Ceux-ci assurent parfaitement la transition entre le sens initial connoté beaux-arts et le moderne plus abstrait. Ils sont en fait des maquettes de parties de la réalité. Ici la notion d'analogie est d'abord géométrique mais elle repose également sur de solides bases scientifiques, issues de l'analyse adimensionnelle développée en mécanique des fluides et en thermodynamique (nombre de Reynolds, cf. 4.3.1). Il existe entre les grandeurs mesurables dans la réalité et celles mesurables sur le modèle des rapports de similitude qui peuvent être calculés a priori et qui assurent la transposabilité en vraie grandeur des résultats obtenus sur le modèle. Les cartes, géographiques par exemple, sont un bon exemple de ce genre de modèle, un degré d'abstraction en plus.

La justification du modèle repose en définitive sur le fait que les mêmes équations régissent les phénomènes en vraie grandeur et en modèle réduit. C'est cette même raison qui justifie les nombreux modèles analogiques, physiques eux aussi, où un original hydraulique peut être transposé électriquement par exemple. La modélisation de l'écoulement des eaux souterraines par des réseaux électriques où résistance, capacité et potentiel électrique simulaient transmissivité, emmagasinement et charge hydraulique a eu son heure de gloire il y a une vingtaine d'années⁵.

L'acception abstraite de modèle, de nos jours la plus répandue en sciences, est probablement née avec la cybernétique, qui l'intègre au cœur de ses théories. Tentons d'en dégager une définition à peu près générale.

Un modèle est une représentation construite comme une simplification d'une partie de la réalité à laquelle le modélisateur s'intéresse. Il est construit en choisissant certaines données dans celle-ci et en faisant certaines hypothèses.

Un modèle doit présenter deux propriétés. La première est qu'il doit être *maniable* (Frontier dans [Coq 97]), sa description doit être plus appréhendable que la réalité à partir de laquelle il a été construit. La deuxième est qu'il doit être *juste* ou *pertinent*, c'est à dire grossièrement qu'il se comporte comme sa réalité se comporterait, relativement à l'observation que l'on en fait.

Dorénavant quand nous parlerons de modèles il faudra souvent entendre modèles abstraits.

Alain Cardon écrit dans [Car 03] :

« On dira que l'on *modélise* un phénomène si on peut lui associer un système formel permettant de le décrire, avec plus ou moins de finesse, pendant sa durée d'évolution (...) :

- On définit la notion *d'état*, qui exprime les caractères du phénomène à tout instant t donné, à un certain niveau de description. Cet état est représenté par différentes

⁵ <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICMODEL.HTM>

1.3 Modèles thématiques et opérationnels

entités ; comme des variables, des équations, des structures de données, (...) des processus ...

- On définit des règles de changement d'état, permettant de représenter le changement des caractères de l'instant t à l'instant suivant
- On décrit l'évolution du phénomène comme une succession de changements d'états. »

Un adjectif important de la définition précédente est *formel*. Voyons à présent ce que différents intervenants du processus de modélisation entendent par là.

1.3 Modèles thématiques et opérationnels

Lorsqu'un modèle est exprimé dans le langage du thématique [Meu 01], le spécialiste de la réalité étudiée qui l'a construit, on le qualifie de thématique. Le langage en question ne se prête pas nécessairement facilement à la simulation. En effet, par exemple, il pourra être d'un formalisme insuffisant pour calculer le déroulement dans le temps du modèle, non seulement dans le cadre d'un calcul formel exact, mais même également par une approche numérique directe.

Il nous faut dans ce cas construire un modèle opérationnel, qui sera alors lui-même un modèle du modèle thématique, mais possédant de plus la propriété d'être calculable, c'est-à-dire qu'on peut en faire une simulation. Ce modèle opérationnel peut simplement n'être qu'un complément de la description thématique, ou bien aller jusqu'à une reformulation complète.

Bien entendu, un modèle peut être à la fois thématique et opérationnel. C'est d'ailleurs de plus en plus le cas : la simulation se révélant un outil de mise au point du modèle très utile, les modélisateurs thématiques envisagent à la base l'aspect calculable de leurs modèles. La simulation permet alors une véritable boucle de rétroaction Observation – Modélisation – Expérimentation/Simulation (cf. Figure 1).

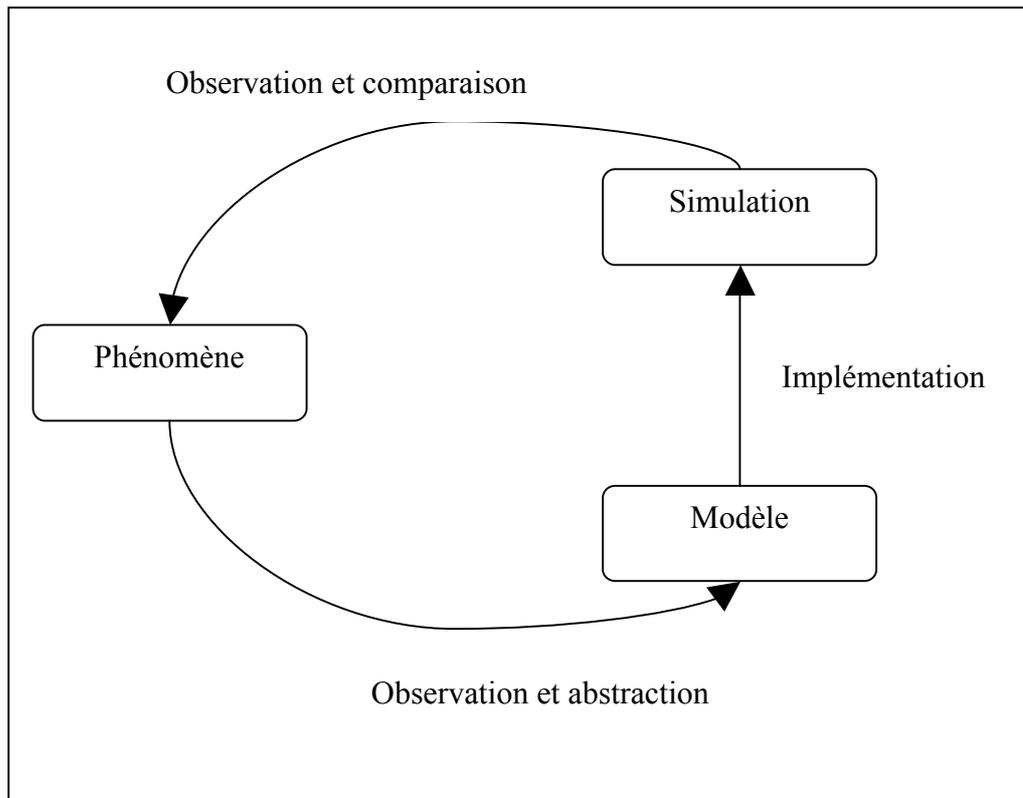


Figure 1 : Cycle de modélisation par simulation

En revanche, il existe des modèles thématiques s'appuyant sur des systèmes d'équations non solubles analytiquement. Une solution est alors de construire un modèle opérationnel en constituant une approximation numérique du système précédent admettant un ensemble de solutions numériques. Une autre possibilité est de créer un modèle opérationnel à base de règles à partir du modèle initialement décrit par des lois, (cf. 1.5.1).

Enfin, les modèles thématiques à base de règles (1.5.1) sont souvent directement opérationnels.

1.4 Simulations

Une simulation est le calcul d'une partie de la trajectoire d'un modèle. On appellera trace ou trajectoire le résultat de ce calcul. Celle-ci peut être calculée en itérant la variable représentant le temps, puis en calculant les nouvelles valeurs des fonctions décrivant le système, d'abord les fonctions du temps, puis les fonctions des fonctions du temps etc. Une autre possibilité est la simulation à événements discrets, comme nous le verrons au 1.5.3.

Dans tous les cas, les simulations sont les outils de validation fondamentaux des modèles opérationnels dont l'expérimentation est difficile : on peut difficilement par exemple faire des expériences au niveau d'un écosystème entier, une alternative est alors la simulation. On comparera ensuite ce qu'on peut mesurer dans la simulation à ce qu'on peut mesurer dans l'écosystème réel (cf. Figure 1). Une autre possibilité, trop fréquemment utilisée, est bien sûr de ne pas valider le modèle, mais on sort alors du domaine scientifique (ou du moins de la partie qui nous intéresse).

1.5 Différents principes dans la construction de modèles

Nous allons esquisser ici une typologie des modèles. Les axes utilisés dans cette partie (lois/règles, local/global, déterministe/stochastique, temps/événements), s'ils génèrent métaphoriquement peu ou prou l'espace des modèles, ne sont pas suffisamment indépendants pour en faire une base : les modèles sont des constructions pragmatiques, ils ne rentrent pas tous bien dans des cases théoriques.

1.5.1 Modélisation à base de lois et modélisation à base de règles

Suivant en cela [Mat 97] on distinguera ici deux catégories de modèles : les modèles à base de lois et les modèles à base de règles. Cette dichotomie est bien sûr trop brutale et n'a pas d'ambition épistémologique excessive, mais constitue un outil de discrimination qui s'est avéré utile.

Les modèles à base de loi sont les plus utilisés actuellement, notamment en physique. Le principe en est de considérer le domaine étudié et d'en isoler des grandeurs bien perceptibles et de préférence quantifiables, appelées variables, qui semblent intéressantes au modélisateur. Celui-ci étudie alors les relations qu'entretiennent ces grandeurs, écrivant ainsi des équations fonctionnelles. Il reliera aussi possiblement la manière dont ces grandeurs se modifient, écrivant alors des équations différentielles ordinaires ou aux dérivées partielles. Ces équations constituent les lois du modèle.

Les lois sont en général continues, particulièrement dans leur gestion du temps et de l'espace, et s'appuient sur une formulation différentielle dont la résolution, idéalement analytique mais le plus souvent approchée numériquement, renseigne les valeurs de ces variables d'état qui décrivent le système étudié. On qualifie parfois ces méthodes de *globales* ou d'*analytiques*.

Dans les modèles à base de règles, le domaine étudié est discrétisé en un certain nombre d'entités dont les variations sont commandées par des règles. On n'a plus là de description globale du domaine, ni de continuité *a priori*. Les automates cellulaires font partie de cette catégorie par exemple, mais aussi les objets/acteurs/agents. Dans un autre genre, les systèmes experts sont typiquement des systèmes à bases de règles.

1.5.2 Notions connexes dans d'autres disciplines : intersections et disjonctions

Les modèles à base de règles ont été très largement utilisés en théorie des jeux qui a elle-même fortement influencée directement les modèles sociaux, puis indirectement d'autres domaines via l'informatique notamment. Ces modèles trouvent différentes dénominations suivant leur domaine d'utilisation ; on les appelle parfois *individus-centrés*, en biologie ou en éthologie notamment, *micro-analytique* en sciences sociales, ou simplement *locaux* en informatique par exemple. Le recouvrement n'est jamais parfait entre ces notions issues de corpus scientifiques différents. Des abstractions méthodologiques apparaissent bien sûr entre les différentes sciences, mais avec une adaptation ontologique qui empêche une totale assimilation des unes aux autres. Notamment, les modèles d'IA symbolique tels que des systèmes experts sont des systèmes à base de règles, mais ne sont pas rattachés aux approches individus-centrées car il leur manque des nuances informatiques de localité, ils sont décrits comme globaux.

Chapitre 1

Théories, modèles et simulations

Ensuite modèles à base de règles comme à base de lois peuvent être déterministes ou stochastiques (ie. L'incertain ou le mal connu y sont modélisés par des probabilités d'embranchement). Bien souvent, les modèles globaux incorporent des sous-modèles appartenant aux deux genres, notamment en écosystémique. L'approche compartimentale est un moyen d'atteindre ce but [Che 83].

1.5.3 Gestion du temps : événements discrets ou pas de temps

Une simulation est donc la plongée d'un modèle dans le temps ; mais quel temps ?

On distingue en général en simulation deux catégories. Commençons par les simulations à pas de temps. Elles se divisent elles-mêmes en première approche en deux parties, temps discret et temps continu. En temps continu, à chaque réel t compris entre les dates de début et fin de la simulation correspond un état du modèle. En temps discret par contre, on calcule les états du modèle à certains moments séparés par un pas de temps éventuellement variable. Dans certains domaines en effet les pas de temps peuvent faire sens ; on peut penser par exemple aux périodes de gestation en dynamique de population. La trajectoire est alors constante par morceaux. En temps continu, on ne peut se référer qu'à une résolution analytique (ou symbolique dans le cas de l'utilisation d'un système de calcul algébrique). Une approche numérique d'un modèle continu nécessite aussi une discrétisation temporelle où les pas de temps sont aussi petits que possibles pour assurer sa stabilité numérique [Dem 96]

Les simulations à événements discrets elles, supposent qu'on sait exactement dans la simulation quelles sont ses parties qui doivent agir et comment. On ordonne alors temporellement les actions de ces entités et les exécute dans l'ordre approprié, événement de simulation après événement, sautant les intervalles où rien n'est sensé se passer. On peut alors rencontrer des problèmes d'ordonnancement au moins compliqué (existence et définition d'une relation d'ordre totale ou même partielle).

1.6 Approches peu réductionnistes

« Ne confondez pas Recherche et Science. La première est un processus dialectique : elle avance, recule, se contredit, dit tout et son contraire. La seconde est le résultat du filtrage et de la sédimentation de recherches passées. »

Alexis Drogoul, introduction au cours de DEA IARFA sur les SMA

Comme cela arrive de manière peu exceptionnelle en science, lorsque l'évolution du monde de la recherche est dans un certain état, on voit apparaître de mêmes notions simultanément et sans consultation. On peut penser au syndrome d'Asperger et à l'autisme, à la théorie algorithmique de l'information par Solomonoff, Kolmogorov et Chaitin, ou ce qui nous intéresse ici, aux théories cybernétique de Wiener, du système général de Von Bertalanffy et holarchique de Koestler.

On peut en sciences percevoir un axe épistémologique entre deux grandes tendances, le réductionnisme et le holisme. Dans cette partie nous nous intéresserons à des approches plutôt holistes, après avoir défini généralement le réductionnisme. Nous nous intéresserons à une taxinomie ordinaire de ces approches, même si en réalité ces méthodes sont à intersection non vide, et c'est une litote. Née au même moment pour tenter de palier de même limites, inter-

fertiles, à présent relativement fusionnées, nous parlerons donc de cybernétique et de la Théorie Générale du Système, ainsi que de l'axe hiérarchique de celle-ci constitué des holarchies de Koestler.

1.6.1 Réductionnisme

« ...Diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre »

René Descartes, 1637

Le réductionnisme est un paradigme épistémologique peut-être aussi ancienne que la science, mais dont le baptême récent date en fait d'apparition de méthodes alternatives de construction scientifique. Auparavant, suivant en cela *Le Discours de la méthode* de Descartes, c'était simplement la méthode scientifique. De nos jours encore, pour qui est mal au fait des paradigmes cybernétiques ou systémiques, c'est encore le cas. Citons Per Bak [Bak 96] : “ Our strategy is to strip the problem of all the flesh until we are left with the naked backbone and no further reduction is possible. We try to discard variables that we deem irrelevant. (...). Once we have identified the basic mechanisms from the simple models, we leave it to others to put more meat on the skeleton, to add more specific details, if one so wishes, to check whether or not more details modify the results.” That's reductionism in a nutshell.

On caricature parfois les réductionnistes comme si épris de localité qu'ils perdent de vue le réassemblage ultérieur du résultat de leurs analyses. C'est faire peu de cas de la nécessité de pertinence d'un modèle. On découpe le problème en autant de parcelles qu'il serait requis pour les résoudre, pas pour juste les comprendre et s'arrêter là. Ce réductionnisme excessif, que Dennett qualifie de « glouton » ([Den 95]) est en réalité une position asymptotique utilisée à des fins didactiques par les auteurs aux sensibilités plus holistes.

L'opposé du réductionnisme extrême est le holisme [Smu 26]. L'un comme l'autre sont peu fertiles en modèles scientifiques⁶ : les positions efficaces sont intermédiaires. Rappelons que Pascal, en 1670, disait déjà : « Je tiens pour impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties ». Dans cette gradation entre réductionnisme et holisme, on pourrait placer la physique plus près du réductionnisme, et les sciences de la vie plus près du holisme, entre autres parce que la physique s'intéresse plutôt à des entités homogènes dont les découpages sont recombinaisons ne serait-ce que statistiquement, lorsque les sciences de la vie s'intéressent à des entités hétérogènes, constituées de nombreuses échelles spatiales non homothétiques. Les biologistes sont d'ailleurs nombreux dans les fondateurs des épistémologies plutôt holistes que nous allons présenter dans cette partie.

Nous concluons avec cette reproduction d'un tableau comparatif du Macroscopie [Ros 75] :

⁶ Le holisme étant notamment l'approche de la plupart des religions, l'approche initiale de Smuts, bien que plus philosophique que mystique, a été initialement peu suivie dans les milieux scientifiques. Pire peut-être pour être entendu, Smuts parlait dans *Holism and evolution* de biologie alors que s'il était un avocat, un soldat et un politicien exceptionnel, il n'était pas « scientifique ».

Chapitre 1
Théories, modèles et simulations

| Approche analytique | Approche systémique |
|---|---|
| Isole : se concentre sur les éléments | Relie : se concentre sur les interactions entre les éléments. |
| Considère la nature des interactions. | Considère les effets des interactions |
| S'appuie sur la précision des détails. | S'appuie sur la perception globale. |
| Modifie une variable à la fois. | Modifie des groupes de variables simultanément. |
| Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles. | Intègre la durée et l'irréversibilité. |
| La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie. | La validation des faits se réalise par comparaison du fonctionnement du modèle avec la réalité. |
| Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action (exemple : modèles économétriques). | Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base de connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action (exemple : modèles du Club de Rome). |
| Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles. | Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes. |
| Conduit à un enseignement par discipline (juxta-disciplinaire). | Conduit à un enseignement pluridisciplinaire. |
| Conduit à une action programmée dans son détail. | Conduit à une action par objectifs. |
| Connaissance des détails, buts mal définis. | Connaissance des buts, détails flous. |

Bien que comparant initialement approche réductionniste et systémique (au sens de 1.6.3), cette comparaison se généralise aux approches « plus holistes » en général.

1.6.2 Cybernétique

Le verbe grec *kubernân* (piloter un navire ou un char) fut utilisé pour la première fois de façon métaphorique par Platon pour désigner le fait de gouverner les hommes. Il a donné naissance au verbe latin *gubernare*, d'où nous viennent les mots de la famille de gouverner. Mais il a également donné le mot *cybernétique*, créé par Ampère pour désigner ce qu'on appellerait aujourd'hui la gouvernance⁷. Si la science cybernétique n'est pas la science de gouverner, on retrouve entre ces deux descendants de *kubernân* des propriétés communes, comme la nécessité de prendre en compte un tout insécable ainsi qu'une approche pragmatique ou du moins constructive et guidée par des buts (ce qu'on appelle téléologique).

Le concept de rétroaction (ou feed-back) est d'origine biologique. Il est introduit dans la science vers les années 30, grâce aux travaux théoriques de Cannon sur l'homéostasie [Can 32]. Celle-ci est l'ensemble des processus organiques qui agissent pour maintenir l'état stationnaire de l'organisme, dans sa morphologie et dans ses conditions intérieures, en dépit de perturbations extérieures. Cette théorisation a comme c'est souvent le cas suivi l'utilisation pratique du phénomène, utilisé par exemple au XVIII^{ème} dans le régulateur de la machine à vapeur de Watt (Figure 2). Développons cet exemple, typique de l'idée de rétroaction et de régulation cybernétique⁸.

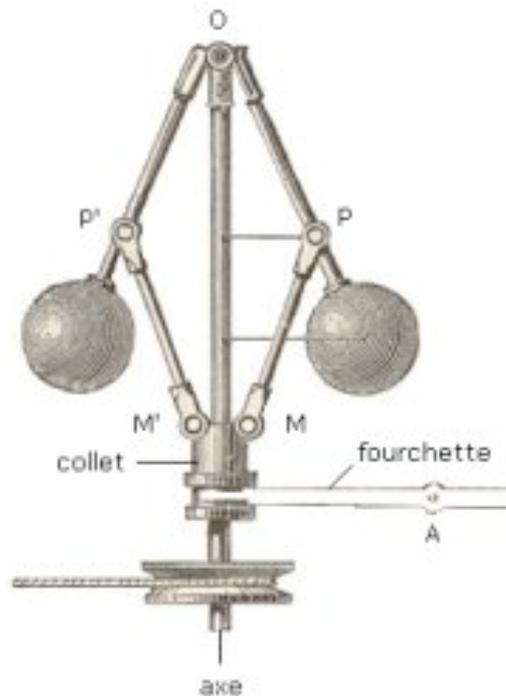


Figure 2 : Régulateur de la machine à vapeur de Watt

Le régulateur, "flyball governor" en anglais, est un dispositif permettant à la machine de régler elle-même sa vitesse de rotation. Cet appareil se compose de deux boules métalliques soutenues par deux tiges articulées autour d'un point fixe O au sommet de l'appareil. Deux

⁷ Gouvernance existait jusqu'au XV^{ème} siècle, avant de tomber en désuétude. Ampère inventa donc le mot cybernétique, dans une acception aujourd'hui elle aussi (souvent) oubliée, et gouvernance a fait récemment son grand retour, après un passage par l'anglais ...

⁸ Pour une fois qu'on ne prend pas le thermostat d'un radiateur comme exemple...

Chapitre 1 Théories, modèles et simulations

autres tiges PM et P'M' reliées aux points P et P' sont fixées au collet en M et M'. Ce collet peut s'élever ou s'abaisser le long de l'axe vertical. Quand la machine fonctionne au bon régime la fourchette reste horizontale. Si la vitesse est trop élevée, la fourchette tourne autour de l'axe A, s'élève et la force centrifuge éloigne les boules de l'axe. Si la vitesse de fonctionnement est trop faible, la fourchette s'abaisse et les boules se rapprochent de l'axe. La fourchette est reliée à une valve d'admission de la vapeur provenant de la chaudière. Ainsi quand la machine tourne trop vite la quantité de vapeur diminue et inversement dans le cas contraire (cf. Figure 4).⁹

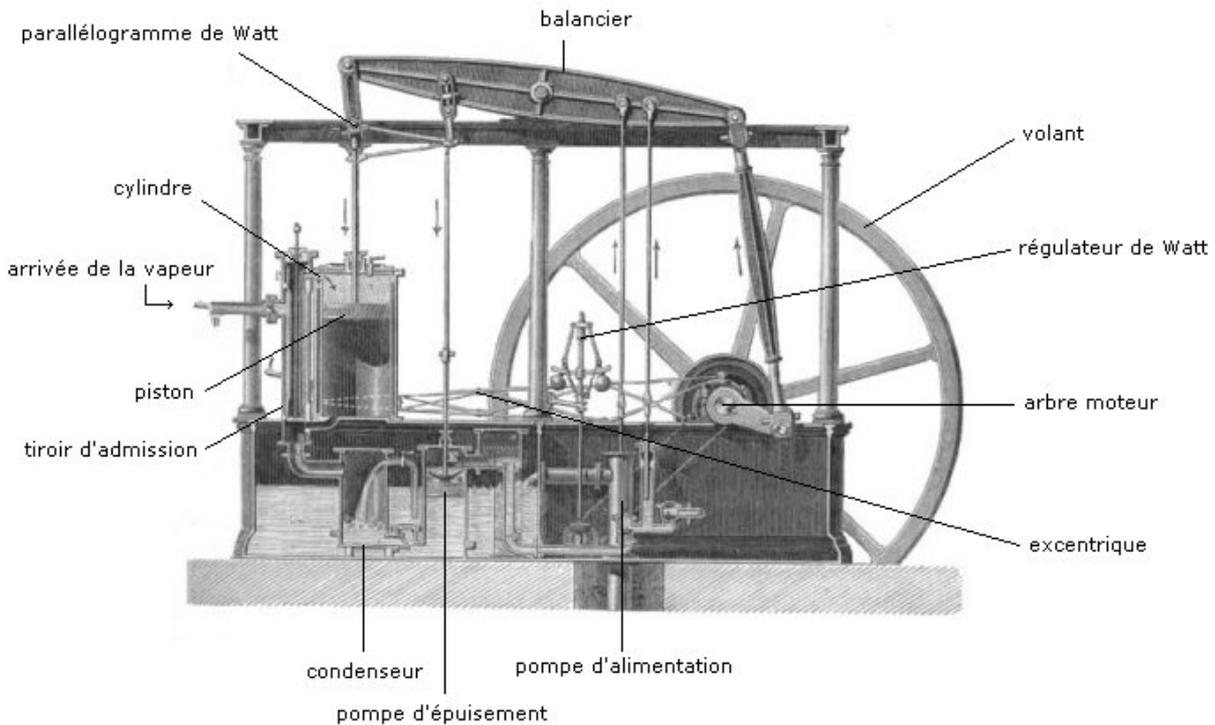


Figure 3 : Machine à vapeur de watt en entier

⁹ <http://visite.artsetmetiers.free.fr/watt.html>

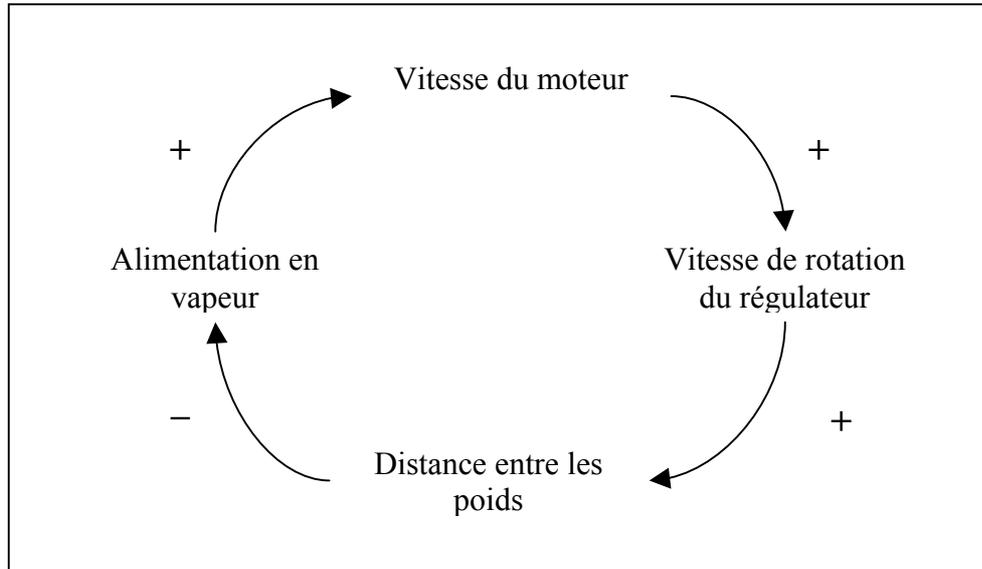


Figure 4 : Principe de fonctionnement du régulateur de Watt

D'une manière plus générale, considérons un système qui reçoit des choses de son environnement et qui y en émet d'autres, et notamment dont des sorties peuvent être vues comme des *conséquences* dont des entrées serait la *cause*¹⁰ :

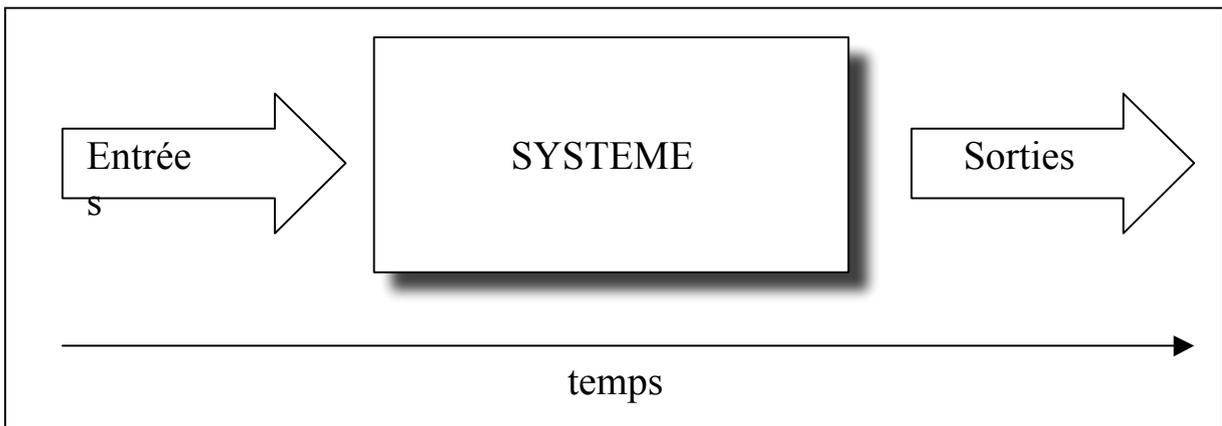


Figure 5 : Système interagissant quelconque

On a une *rétroaction* lorsqu'au moins une des conséquences du système influence une future cause de celui-ci :

¹⁰ Schémas inspirés du Macroscopie [Ros 75]

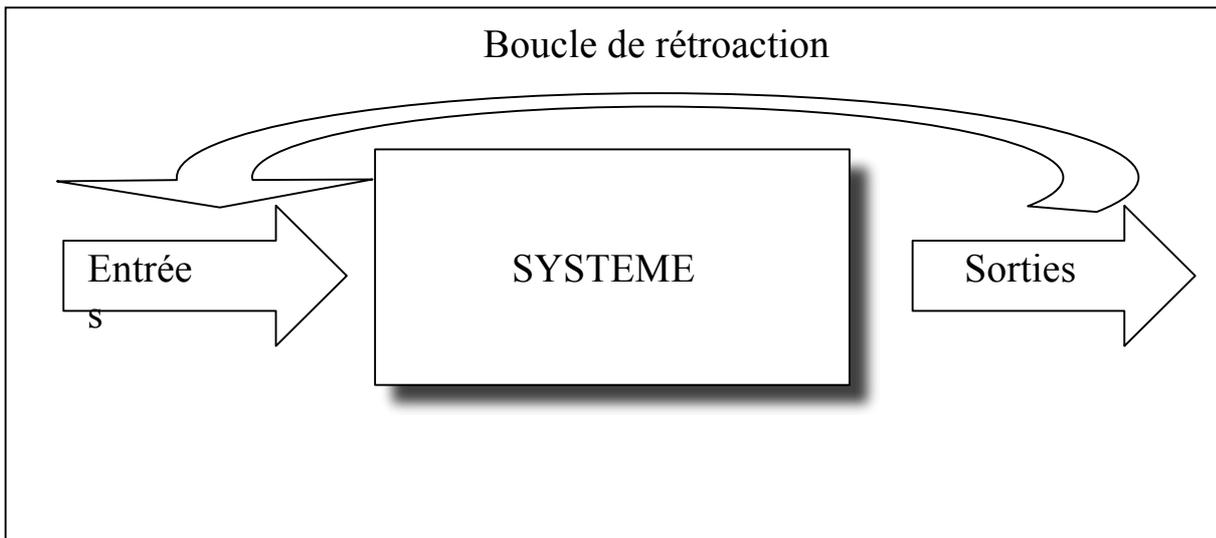


Figure 6 : Système interagissant possédant une boucle de rétroaction

En cybernétique quand on parle de rétroactions, les conséquences en question sont souvent mesurables, d'une manière quelconque. Lorsque leur rétroaction sur les causes tend à faire augmenter cette mesure des conséquences, on parle de *rétroaction positive*. Lorsqu'au contraire une augmentation des conséquences tend par rétroaction à faire baisser la production de conséquence, on parle de *rétroaction négative*. La rétroaction positive tend à faire croître les divergences, la négative à stabiliser les processus. Le régulateur donné en exemple illustre une rétroaction négative, destinée à stabiliser la quantité de vapeur.

Ce concept de rétroaction sera néanmoins développé par Norbert Wiener, mathématicien inventeur de cette nouvelle acception du mot cybernétique, la plus utilisée de nos jours, et un des pères de cette discipline avec le neurophysiologiste McCulloch [McC 65] et l'économiste Forrester [For 61] notamment. Le processus de rétroaction tel que développé par Wiener est un mécanisme qui contrôle les opérations de fonctionnement d'une machine (d'origine humaine ou non, biologique par exemple). Il est avant tout un processus de pilotage. Il émerge d'abord dans le domaine de l'aviation et de l'armement avant de s'étendre aux autres domaines (automobile, etc.). Son but sera d'étudier les phénomènes de rétroaction dans les machines et les organismes vivants

Les recherches qui sont à l'origine du concept de rétroaction dans son acception actuelle relèvent essentiellement du domaine de l'informatique. En effet, la description assez linéaire du fonctionnement de la boucle de rétroaction s'adapte bien au fonctionnement séquentiel d'un ordinateur ordinaire. Pourtant, en sus de ses travaux sur les machines automatiques, Wiener développa le concept de rétroaction bien au-delà du domaine de la technologie. Ses études comparatives sur les machines et la neurologie, aidé par Rosenblueth¹¹, l'amènèrent à généraliser la rétroaction aux domaines biologique et social. Son ouvrage s'intitule d'ailleurs : "*Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*" [Wie 65].

La cybernétique marque ainsi une tendance forte de ces approches plutôt holiste, la transdisciplinarité.

¹¹ Neurophysiologiste, ancien élève de Cannon.

1.6.3 Systèmes

" Tous les objets clés de la physique, de la biologie, de la sociologie, de l'astronomie, atomes, molécules, cellules, organismes, sociétés, astres, galaxies constituent des systèmes. Hors systèmes, il n'y a que la dispersion particulaire. Notre monde organisé est un archipel des systèmes dans l'océan du désordre. Tout ce qui était objet est devenu système. Tout ce qui était même unité élémentaire, y compris surtout l'atome, est devenue système"

Edgar Morin

D'après l'Encyclopedia Universalis, un système est un ensemble de phénomènes et d'événements interdépendants que l'on extrait du monde extérieur par une démarche intellectuelle arbitraire, en vue de traiter cet ensemble comme un tout.

Si « système » est un mot couramment employé en sciences, son sens précis varie d'un domaine à l'autre (voire au pire d'un auteur à l'autre). Nous allons donc définir à quelles acceptions de « système » nous nous intéressons ici, tout d'abord en systémique puis en thermodynamique.

La systémique est un ensemble de principes de modélisation plutôt à base de règles très utilisé en sciences. Elle est née notamment des travaux de Von Bertalanffy exposés dans son ouvrage *General System Theory* [Von 68]. Ce titre est d'ailleurs le nom anglais de la systémique. Edgar Morin également est un des grands auteurs francophones du domaine¹². Un système de la GST est un ensemble d'éléments interactifs (i.e. le fonctionnement voire l'existence de chacun est conditionné par celui des autres, voir Figure 7) répondant à trois principes :

Principe de dépendance interactive : Les structures et les dynamiques des éléments du système dépendent les uns des autres. Par conséquent, 1/ si on isole un élément on le modifie et 2/ si on agit sur certains cela a des conséquences sur d'autres.

Principe d'émergence d'une entité globale interagissant avec son environnement : De l'ensemble des unités fonctionnelles et de l'ensemble de leurs interaction émerge une entité nouvelle montrant une structure, des propriétés et une dynamique nouvelles par rapport à celles de ses composantes.

Principe d'un effet de retour de cette entité sur ses composants : l'ensemble agit sur les parties le constituant en ce sens qu'un élément ne montrera pas le même comportement, la même dynamique ni la même évolution s'il est isolé ou s'il est intégré dans un système.

On peut voir dans ce troisième point une subsumption de la rétroaction cybernétique.

Plus généralement, pour insister sur cette enchevêtrement possible des éléments d'un système, on pourra citer de nouveau Morin et notamment son « principe holographique » : *« Non seulement la partie est dans le tout, mais aussi le tout en tant que tout se trouve dans la*

¹² Néanmoins, peut être parce qu'il est issu du cénacle de sciences plus molles (sociologie, anthropologie puis philosophie), les travaux de celui-ci ont suscité une exégèse hagiographique confuse, motivée parfois par un relativisme à la mode. On a alors tout intérêt à se reporter à ses écrits directs ou du moins à prêter attention au contexte des commentaires qu'ils ont générés.

partie. Ainsi, chaque cellule singulière d'un organisme polycellulaire, comme le nôtre, contient en elle la totalité de l'information génétique de l'organisme. Dans chaque individu d'une société, la société en tant que tout est présente dans l'individu (par son langage, sa culture, ses normes et prohibitions fondamentales) ».

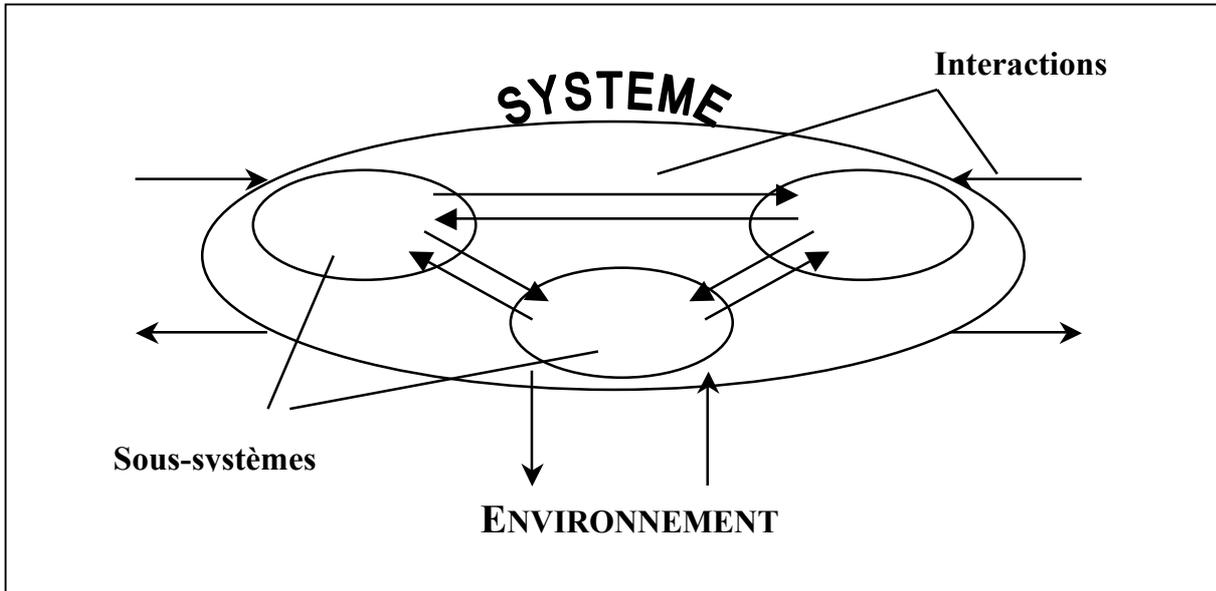


Figure 7 : Un système de la GST

Les systèmes de la thermodynamique possèdent beaucoup de points communs avec ceux de la systémique, et peuvent être vus comme une version simple de ces derniers. En effet au début du siècle les sciences qui étudiaient des domaines très hétérogènes, comme l'écologie ou les sciences sociales, s'efforçaient de calquer leur démarche sur celles des sciences nobles comme l'astronomie ou les sciences physiques en général. Or la systémique est issue de cette recherche de rigueur, tout comme la thermodynamique, notamment par les travaux de Boltzmann.

En thermodynamique, un système est défini comme une partie de matière délimitée par rapport au milieu extérieur. Le milieu extérieur est le reste de l'espace entourant le système. Les systèmes matériels de la systémique sont donc des systèmes thermodynamiques (ils ne sont pas que cela mais ils sont entre autres cela).

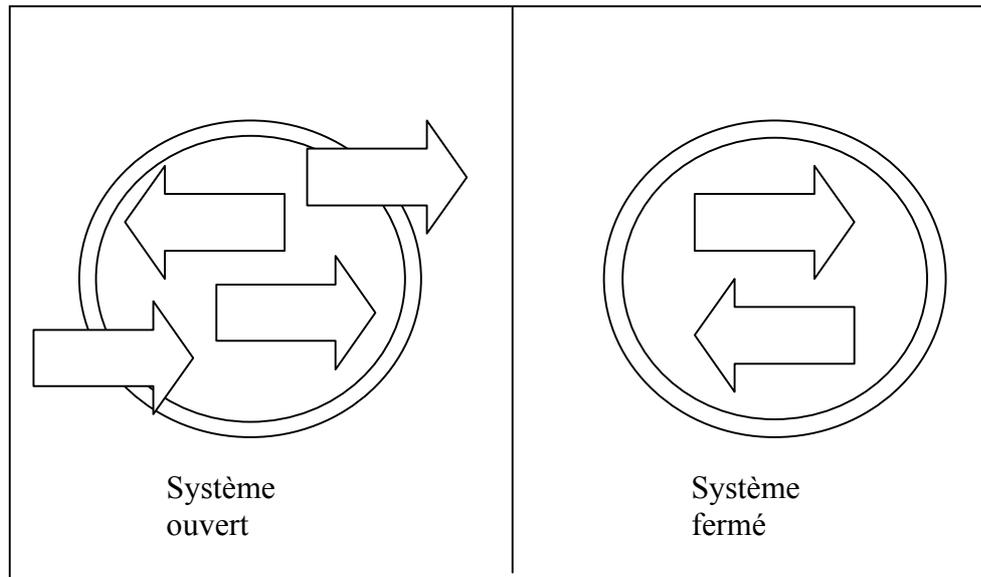


Figure 8 : Systèmes ouverts / Systèmes fermés (inspiré de [Ros 75])

Néanmoins, les systèmes thermodynamiques sont généralement fermés (pas d'échanges de matière avec l'extérieur) voire isolés (pas d'échanges d'énergie non plus). Les travaux initiaux de Bertalanffy visaient d'ailleurs à écrire une thermodynamique des systèmes ouverts¹³ (cf. Figure 8). Les entités biologiques ne respectent en effet pas la seconde loi de la thermodynamique des systèmes fermés¹⁴, comme l'a souligné Shrödinger [Shr 44]. La loi est bien sûr juste : ce sont les systèmes biologiques, comme les êtres vivants ou les écosystèmes qui sont des systèmes ouverts.

Si cybernétique et systémique sont deux aspects d'une même approche, on peut tout de même distinguer au moins deux nuances. Tout d'abord, pour des raisons assez mystérieuses, possiblement communautaires, la systémique a beaucoup mieux pris dans la francophonie que la cybernétique, hors peut-être de la communauté automatique. Ensuite, plus intéressant, il paraît juste de dire que la systémique s'intéresse plus à la structure des systèmes alors que la cybernétique s'intéresse plus à leur fonction, elle est plus téléologique. Néanmoins, comme fonction et structure d'un système complexe sont difficilement dissociables, elles sont bien deux faces d'une même pièce. Certains chercheurs comme Maturana [Mat 87] sont très clairement des novateurs importants dans ces deux approches. D'ailleurs de nos jours de nombreux colloques et conférences traitent des deux tendances à la fois.

1.6.4 Holarchies

Les principes de base des systèmes holoniques furent introduits en 1967 par Arthur Koestler dans un livre intitulé "The Ghost in the Machine" [KOE 67]. Koestler introduisit l'idée qu'un petit nombre de principes essentiels suffit pour expliquer la capacité qu'ont les systèmes

¹³ Ce qui montre encore une fois le lien entre systèmes de la GST et systèmes thermodynamiques, justifiant leur traitement dans une même partie.

¹⁴ Dans toute transformation au sein d'un système fermé, il y a une entropie interne au système considéré qui se crée. Elle s'ajoute à l'entropie apportée par l'extérieur. Cela veut dire qu'il y a toujours des phénomènes de frottement, de diffusion, que l'on considère comme des pertes d'énergie. En fait, conformément au premier principe, l'énergie se conserve. Par contre l'entropie totale augmente toujours.

sociaux et biologiques à s'autoréguler. Il proposa le terme holon pour décrire l'élément de base de ces systèmes. Ce mot combine la racine grecque holos qui veut dire "entier", avec le suffixe -on qui veut dire "partie", comme dans proton ou neutron. En effet, les holons agissent comme des entités individuelles autonomes, qui pourtant coopèrent pour former des hiérarchies complexes et spontanées de sous-systèmes telles que la hiérarchie cellule/ tissu/ organe/ système en biologie. Koestler utilisait le terme holarchie pour décrire ces hiérarchies holoniques.

Les holons sont décrits par Koestler comme possédant deux visages, comme Janus [Koe 78]. Un de ces visages est considéré comme un système autonome, qui regarde en bas vers des holons qui le composent, et leur transmet des contraintes et des consignes. L'autre visage regarde en haut, vers le holon dont il est une partie (cf. Figure 9), et l'influence comme il est influencé par celui-ci. Les recherches de Koestler s'inscrivent dans le cadre de la GST, s'intéressant plus particulièrement à l'aspect hiérarchique des systèmes.

L'approche holarchique n'est pas qu'un essai philosophique : une application des concepts de Koestler à large échelle industrielle est en cours de développement sous l'égide du Holonic Manufacturing System¹⁵.

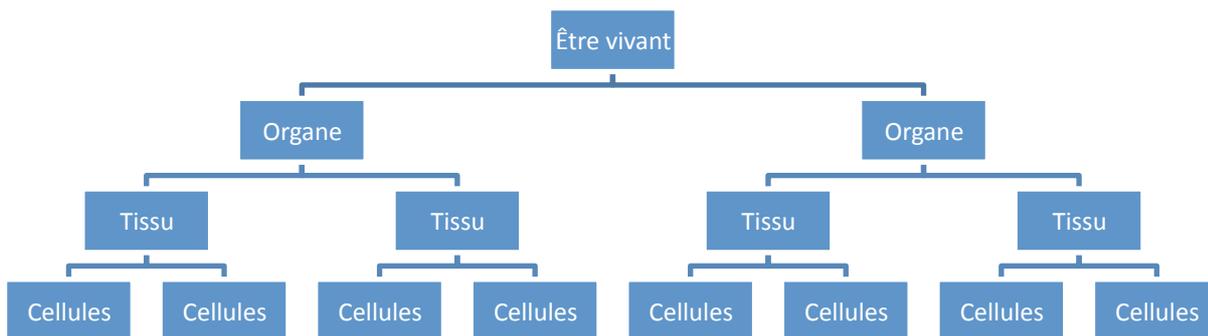


Figure 9 : Exemple d'holarchie dans la description d'un être vivant

Plus proche de nos préoccupations, James Kay ([Kay 00] mais plus généralement <http://www.jameskay.ca/>) a bâti ses travaux sur la notion Koestlerienne de SOHO, Self Organized Holarchic Open systems, et les conséquences liées à la seconde loi de la thermodynamique, rejoignant en cela les préoccupations initiales de Von Bertalanffy.

Nous utiliserons « holarchie » car ce mot a l'avantage d'être un relatif néologisme, contrairement à « système », très ancien aux multiples acceptions et déclinaisons. Nous utiliserons également à l'occasion « holon » pour les mêmes raisons.

¹⁵ <http://hms.ifw.uni-hannover.de/>

1.7 Simulation multiagent

Il existe un certain nombre de techniques pour changer d'échelles en général dans les simulations. Ce qui nous a intéressé ici c'est de chercher comment l'intelligence artificielle pouvait suppléer ce travail déjà réalisé dans les domaines scientifiques étudiés. Plus particulièrement, comment une approche agent peut aider à changer d'échelle en simulation. Nous allons donc présenter succinctement ce qu'est l'intelligence artificielle, puis plus particulièrement les Systèmes MultiAgents (SMA), et enfin leur utilisation en simulation.

1.7.1 Intelligence artificielle

Mr. Jabez Wilson laughed heavily. "Well, I never!" said he. "I thought at first that you had done something clever, but I see that there was nothing in it, after all?" "I began to think, Watson," said Holmes, "that I made a mistake in explaining. 'Omne ignotum pro magnifico,' you know, and my poor little reputation, such as it is, will suffer shipwreck if I am so candid."

Sir Arthur Conan Doyle, The Complete Sherlock Holmes

C'est vers la fin de la première moitié du XX^{ème} siècle qu'on s'est de nouveau intéressé en pratique à l'aspect symbolique des calculs des calculateurs. Comme pour beaucoup de choses en informatique, il n'est pas exagéré de faire partir les recherches d'une machine « intelligente » d'Alan Turing. Il est bien sûr difficile de s'entendre sur le sens d'« intelligence », et on se satisfait généralement en IA d'une intuition anthropomorphique. Turing proposait une approche comportementaliste, où une machine serait considérée comme intelligente si elle était difficilement distinguable d'un humain lors d'une conversation écrite[Tur 50]. Ce très célèbre test de Turing est néanmoins trop ambitieux pour être utilisable en pratique : on a besoin de buts à plus courts termes pour qu'ils puissent servir de guide. Une définition souvent utilisée dit que l'intelligence artificielle est l'art de faire exercer à une machine une activité qu'on qualifierait d'intelligente chez un humain.

Cette définition est d'une part peu utile car passablement circulaire mais également parce qu'un certain nombre de machines exercent des activités humaines compliquées comme les échecs ou le calcul formel, et pourtant ces programmes ne sont pas considérés de nos jours comme des problèmes d'IA. Et pourtant, ils le furent, ils étaient même les problèmes principaux lorsque l'expression « intelligence artificielle » fut proposée pour la première fois en 1956 lors du colloque fondateur de Dartmouth College. C'est dans cette nuance que nous allons trouver notre définition à frontière mobile. Retrouvons Turing:

The extent to which we regard something as behaving in an intelligent manner is determined as much by our own state of mind and training as by the properties of the object under consideration. If we are able to explain and predict its behavior or if there seems to be little underlying plan, we have little temptation to imagine intelligence. With the same object, therefore, it is possible that one man would consider it as intelligent and another would not; the second man would have found out the rules of its behavior.

L'intelligence artificielle consiste en l'étude des problèmes informatiques qui n'ont pas encore été résolus. C'est la définition boutade que défend par exemple Marvin Minsky.

Chapitre 1

Théories, modèles et simulations

On pouvait distinguer à la fin des années 50 en IA trois branches principales : logique, symbolique et connexionniste. La branche logique s'efforce de formuler les problèmes qu'elle veut résoudre en prédicats du premier ordre qu'elle tente alors de prouver. On peut penser au Logic Theorist de Newell et Simon (1956) ou au Geometry Theorem Prover de Gelernter (1959). La symbolique tente de séparer procédure de traitements de « connaissances », symboles de parties du monde. Une de ses réalisations célèbres est le General Problem Solver, qui a lui aussi été créé par Newell et Simon. Le connexionnisme, issu de la cybernétique, s'inspire du substrat neuronal de l'intelligence humaine. On pourra pour une histoire moins horriblement compressée de l'IA se référer au chapitre 1 de [Rus 03].

On peut voir dans ces trois branches trois niveaux d'attaques de la description de l'intelligence humaine, du plus bas, le connexionnisme, au plus haut, l'approche logique.

Ces différentes approches ont évoluées au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, avec des hauts et des bas dans les enthousiasmes à leur égard, avec des périodes de nettoyage et stabilisation des avancées précédentes, puis d'innovations pragmatiques faisant soubresauter le domaine.¹⁶

On peut parler notablement d'une nouvelle voie dans l'IAD, dans les années 80. On a commencé par s'apercevoir que les humains n'étaient pas seuls à faire preuve de ce qu'un humain perçoit comme intelligent. Par exemple, les groupes d'humains font preuve d'une intelligence différente que les humains seuls. Ainsi sont nés les blackboards, méthodes faisant coopérer des systèmes experts (machines issues de l'approche symbolique) pour résoudre des problèmes. Puis, la métaphore se fit éthologique : on remarqua par exemple que les colonies de fourmi faisait preuve d'intelligence pour s'approvisionner en ressources.

Il n'est pas exagéré de voir dans ces deux dernières approches les parents des systèmes multiagents, que nous allons à présent décrire.

1.7.2 Systèmes multiagents

« On se croit libre quand on donne plus d'ordres qu'on en reçoit. »

Marcel Jullian

« Agent » est un terme utilisé dans des acceptions différentes dans différents domaines des sciences. Au sein même de la communauté SMA, il est difficile de trouver des définitions consensuelles¹⁷. Nous allons donc en évoquer quelques unes.

Un des premiers ouvrages francophones sur le sujet est « Les Systèmes multi-agents » de Jacques Ferber [Fer 95]. Voyons ce qu'il en dit :

" Un agent est une entité physique ou virtuelle :

¹⁶ On parle de la lutte des neats contre les scruffies

¹⁷ On pourra au passage remarquer que l'orthographe de ce qui suit « système » est variable dans la littérature : parfois multi-agent, à d'autres moment multiagent, et parfois l'un ou l'autre au pluriel systématique. Nous avons opté pour « multiagent ». Le trait d'union entre le préfixe et le radical indique un néologisme : nous estimons le domaine maintenant suffisamment établi pour avoir droit à un vrai mot. Ensuite plus d'hésitation : on a un adjectif, si système est singulier il sera singulier. Une plante multicaule a plusieurs tiges, un système multiagent plusieurs agents.

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

Selon les réalisations, nous retrouvons chez les agents l'ensemble de ces caractéristiques ou seulement une partie. On peut ainsi classer de façon sommaire les types d'agents selon leurs caractéristiques. La distinction entre différents types d'agent la plus fréquente est la distinction entre agents réactifs et agents cognitifs [Fer 95]. La notion d'agents réactifs et cognitifs est controversée dans le sens où la plupart des agents cognitifs ont des comportements que l'on peut considérer comme réactifs et que les agents dits réactifs ont souvent une connaissance innée de leur environnement qui peut être considérée comme une caractéristique cognitive. La séparation Réactif/Cognitif pour un agent n'est donc pas dichotomique mais graduelle : beaucoup d'agents sont hybrides. Certaines personnes préfèrent le terme " faiblement cognitif " à celui de réactif.

Plus récents mais aussi fondamentaux que ceux de Jacques Ferber, dans les écrits de N.R. Jennings, K. Sycara et M. Wooldridge, un agent est une entité située, autonome et flexible [WSJ 98]. « *There are the three key concepts in our definition: situatedness, autonomy and flexibility.* »

Par situé, ils entendent que l'agent reçoit des informations de son environnement par ses senseurs et qu'il peut agir sur ce dernier afin de le modifier. L'environnement n'est pas nécessairement spatialisé, il peut être plus abstrait.

L'autonomie d'un agent signifie qu'il peut agir sans avoir besoin de l'intervention d'un humain ou d'un autre agent et qu'il a le contrôle de ses actions et de ses états internes. Cette autonomie est toute relative, a fortiori quand on la met en parallèle aux impératifs sociaux de l'agent (si ceux-ci sont des impératifs, c'est que l'autonomie n'est pas absolue). Cette autonomie relative est à rattacher à la pro-activité de l'agent : il n'est pas qu'esclave de stimuli extérieur, il a des « buts ».

Enfin, un agent est flexible signifie [WJ 95] :

Chapitre 1

Théories, modèles et simulations

- qu'il est capable de percevoir des changements dans son environnement et d'y répondre en temps limité (répondant),
- que ses actions ne se limitent pas aux réponses à des modifications d'environnement, mais qu'il doit faire preuve d'opportunisme, de comportements dirigés par des buts et qu'il doit pouvoir prendre des initiatives aux moments opportuns (pro-actif),
- qu'il peut interagir avec des humains ou d'autres agents artificiels si nécessaire afin de résoudre ses propres problèmes et qu'il doit être capable d'aider les autres dans leurs activités (social).

M. Wooldrige et N.R. Jennings définissent aussi la notion forte et la notion faible d'agent [WJ95]. La notion faible d'agent correspond simplement à une entité située, autonome et flexible. La notion forte d'agent ajoute à la notion faible, les concepts de croyance, de désirs et d'intentions (BDI). Les agents que nous présentons dans nos travaux, d'aide à la communication comme de simulation d'écosystèmes, appartiennent à la catégorie faible.

Plus récemment encore, dans « Principes et architecture des systèmes multi-agents », Jean-Pierre Briot et Yves Demazeau proposent pour agent un générique « entité logicielle ou physique à laquelle est attribuée une certaine mission qu'elle est capable d'accomplir de manière autonome et en coopération avec d'autres agents ». On retrouve somme toute beaucoup de choses communes dans ces définitions, leurs différentes formulations servant peut-être à une meilleure compréhension d'une même chose.

Il faut tout de même remarquer que ces définitions ne sont pas parfaitement consensuelles : certains tenants notamment des agents BDI proposent par exemple que seuls ceux-ci soient qualifiés d'agent, comme certains auteurs d'autres chapitres de « Principes et architecture des systèmes multi-agents » par exemple. Néanmoins, nous ne souscrivons pas à ce choix. En effet, il faudrait alors trouver d'autres noms pour les agents plus légers, qui sont historiquement les premiers à avoir été le plus développés en France, ce qui serait une confusion et un appauvrissement dialectique.

1.7.3 Simulation par SMA

Comme sa discipline mère l'IA, les SMA ont été utilisés initialement pour résoudre des problèmes : on a un problème dont on cherche la solution, on écrit un SMA qui va bien, l'exécute, et au bout d'un certain temps certains aspects du SMA sont retenus comme solution au problème initial. On peut penser par exemple au problème jouet du taquin ou aux problèmes de fourragement [Dro 93].

Puis, assez naturellement, on s'est mis à utiliser les SMA pour simuler des modèles « individus centrés » (cf. 1.5), où les agents correspondaient aux individus du modèle. Les SMA sont en effet un outil très intuitif pour construire des holons d'un système. Qu'on prenne en effet les propriétés constituantes d'un holon, d'un agent informatique ou d'un élément d'un système de la GST, on retrouve les notions d'autonomie relative, d'interactions sociales, de collectif, d'environnement et d'action.

2.2.2 et 2.2.4 contiennent un certain nombre d'exemples d'utilisation de SMA en simulation, en écologie notamment.

CHAPITRE 2

CHANGEMENTS D'ÉCHELLES

Résumé

Dans ce chapitre nous essayons de cerner ce qu'on peut bien vouloir dire par « échelle » ou « niveau de description ». Nous commencerons pour cela par quelques définitions et explications, avant de faire un tour de ce que la littérature scientifique orientée simulation compte comme traitement de ces notions. Nous essayerons alors de classer ces gestions selon différents axes de réponses à « Pourquoi ? » et « Comment ? ».

Nous allons dans ce chapitre nous intéresser aux modèles à échelles multiples dans une partie de la littérature scientifique.

Nous présenterons tout d'abord un certain nombre de modèles, soit par domaine d'application (hydrodynamique et écologie) soit par techniques de modélisation. C'est en effet parfois la chose étudiée qui pousse le modélisateur à inclure des échelles multiples dans son modèle, et c'est parfois de disposer de bons outils pour le changement d'échelle qui fait que le modélisateur, souvent alors informaticien, cherche un domaine d'application à sa technique. Les deux motivations sont également parfois mêlées.

Enfin, nous essayerons de dégager des principes généraux sur les types de changements d'échelles, et sur les buts et les moyens qu'ils impliquent.

2.1 Échelles et niveaux de description

Nous disions en 1.2 que les cartes étaient un bon exemple de modèle physique abstrait. Une bonne carte décrit en effet une partie de la réalité à laquelle s'intéresse le cartographe puis ses utilisateurs, elle doit être aussi juste que possible (une carte inexacte est rarement utile), et elle doit être maniable (une carte à l'échelle 1 est perturbante).

La maniabilité passe par le choix d'une *échelle* d'espace, c'est d'ailleurs de la géographie que vient cette notion. La précision que tentera d'atteindre la carte dépend des objectifs de ses utilisateurs. Une fois cette échelle choisie, la pertinence dépendra également du temps : une carte sera valable pour un laps de temps, long pour une carte géologique par exemple, plus courte pour une carte de ressources halieutiques. Le choix d'une échelle d'espace-temps est donc un facteur de la maniabilité et de la justesse d'une carte.

Il en va généralement de même dans les modèles abstraits : ils doivent choisir un niveau d'espace-temps, une échelle donc, préalable à leur édification. Elle servira à trancher ce qui est un détail et ce qui est essentiel.

Néanmoins si de nombreux domaines d'étude ont des caractéristiques spatiales et temporelles, ce n'est pas le cas de tous, ou du moins elles ne sont pas toujours pertinentes. On peut alors abstraire d'échelle un concept de *niveau de description*, qui participe à délimiter le domaine d'étude.

En biologie par exemple, on délimitera le champ d'investigation d'un phénomène quelconque en choisissant de l'attaquer au niveau moléculaire, cellulaire, organique, ou de l'organisme tout entier (le niveau de description est dans cet exemple en bijection avec l'échelle spatio-temporelle). Dans l'étude d'un signal électromagnétique, on pourra choisir une plage d'intensité ou de fréquences en dehors desquelles ce qui est reçu sera ignoré comme du bruit (cette plage n'est par contre pas directement spatio-temporelle).

Ce niveau de description peut être décomposé en entités appartenant à des niveaux de description inférieurs, les interactions desquelles président à son fonctionnement (ceci est suffisamment général pour rester vrai que l'approche retenue soit plutôt réductionniste ou plutôt globalisante). Un ensemble d'entités ayant une caractéristique spatiale prend généralement plus de place que chaque entité. La résultante d'actions d'entités prend plus de temps que les actions élémentaires en question, par simple linéarité. C'est pourquoi niveaux de description et échelles sont souvent isomorphes, mais d'une part dans la modélisation de

Chapitre 2 Changements d'échelles

phénomènes abstraits¹⁸ ce n'est plus le cas, d'autre part la notion de niveau de description subsume souvent celle d'échelle en soulignant les notions pertinentes, relatives au modèle, qui ont présidé à l'isolement du niveau, l'échelle alors impliquée n'étant qu'une conséquence : le niveau est mieux intelligible.

Si la plupart des modèles se satisfont d'un seul niveau de description, la justesse de certains impose de considérer plusieurs niveaux à la fois. Un modèle de dynamique des populations [Lok 26] non individu-centré considère un seul niveau de description, celui de la population, alors qu'un individu-centré en aura deux (l'individu et la population). Mais c'est alors un choix de modélisation, l'objet étudié peut de « lui-même » imposer plusieurs niveaux. Par exemple une mutation qui se répand (modification moléculaire) peut finir par altérer un écosystème entier : la modélisation en écologie se doit alors parfois de prendre ces très différents niveaux en compte.

C'est à ce genre de modèles incorporant différents niveaux de description que nous nous intéressons. Plus précisément, nous cherchons à cerner les rapports qu'entretiennent les différents niveaux, afin possiblement de les automatiser. Voyons quelques modèles multiéchelles, et selon quels axes on pourrait les analyser.

2.2 Différentes approches

2.2.1 Notions d'échelles en mécanique des fluides

De nombreux problèmes physiques, notamment concernant des comportements de fluides annoncent des phénomènes multiéchelles¹⁹. Néanmoins, étant donné le rôle important de l'hydrodynamique dans notre travail de thèse, ces notions sont développées en détail au 4.3 après une présentation générale de l'hydrodynamique.

2.2.2 Notions d'échelles en hydrogéologie

2.2.2.1 Modèle multiéchelle de la porosité (IRD)

Edith Perrier et Christian Mullon de l'IRD ont beaucoup travaillé depuis 1990 sur la prise en compte de différents niveaux de description lors de la modélisation d'un phénomène.

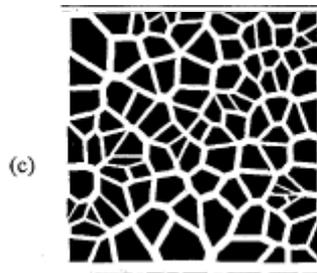
Dans [Per 95], avec Michel Rieu et Ghislain de Marsily, ils proposent un modèle fractal de description de sols aux fins de simuler la porosité de ceux-ci. Le processus récursif de description partitionne un sol représenté initialement par un secteur de plan par un ensemble de polygones. Une homothétie les rétrécit alors, créant entre eux des espaces. Ces espaces représenteront des canaux dans lesquels circulera l'eau.

Décrivons ce modèle plus en détail, à l'aide notamment de schémas issus de l'article :

¹⁸ Abstraits d'espace, plus rarement de temps. ...

¹⁹ 32nd Computational Fluids Dynamics - Multiscale methods 2002 - Von Karman Institute, Bruxelles

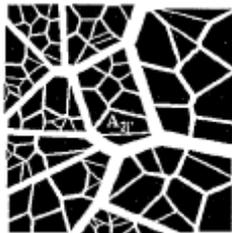
2.2 Différentes approches



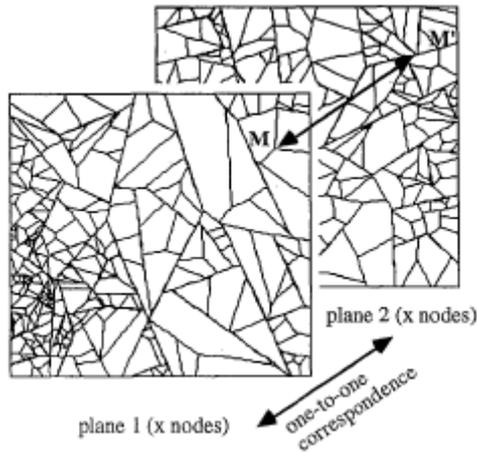
On commence par créer un certain nombre de « grains » (100 dans cet exemple). Ces grains sont distribuées aléatoirement dans l'espace disponible suivant une loi de Poisson.

On crée une tessellation de Voronoï autour de ces points. On définit ainsi autant de polygones et de secteurs de plan.

On applique à chaque secteur de plan ainsi défini une homothétie de centre l'isobarycentre du secteur et de rapport fixe positif inférieur à 1 (dans l'exemple 0.8). Les secteurs noirs sur le schéma représentent les structures solides, les traits blancs les séparant représentant les pores.



On itère alors ce procédé : les structures solides obtenues précédemment sont subdivisées comme le plan de départ. Le rapport d'homothétie peut changer d'une itération à l'autre. On itère un nombre n de fois cet algorithme. Les structures solides du rang n correspondent réellement à des morceaux de sol supposés monolithiques.



La représentation du sol ainsi décrite est plane. Pour rendre par la suite ce modèle plus volumique, on utilise une approximation multi-planaire de l'espace, où les points d'un plan sont mis en relation avec d'autres d'un autre plan, le liquide infiltré cascading entre ces plans.

Une deuxième complexification consiste en remplacer les transformations homothétiques en affines. L'axe choisi pour la translation est celui des ordonnées. On obtient ainsi des canaux d'infiltration pour les liquides de largeur différente à une même échelle.

2.2.2.2 Modèle d'infiltration à base de loi

A. Bourgeat [BOU 97] par exemple décrit des modèles d'écoulement de fluides dans des milieux poreux où d'une description de type Navier-Stokes dans le milieu microscopique, on passe par intégration et par introduction de paramètres complémentaires, à une loi de Darcy, plus globalisante.

Ces changements de description équationnelle d'un niveau d'échelle à l'autre modifient parfois de manière fondamentale les propriétés de linéarité des modèles et on peut être amené à introduire des *termes sources* « gardant la mémoire » de la petite échelle dans le modèle global.

2.2.3 Automates cellulaires

Les premières structures informatiques individu-centrées à avoir été développées sont les automates cellulaires. Si ces structures sont issues de travaux de Stanislas Ulam, ce sont les automates auto-réplicateurs de Von Neumann [VON 66] qui ont été leurs premières applications marquantes. Dans les années 50 John Von Neumann voulait construire une machine capable de s'auto-reproduire. A la même période Stanislaw Ulam [Ula 62] travaillait sur la réalisation par ordinateur d'objets géométriques définis récursivement. Ulam suggéra à Von Neumann de construire un monde abstrait, régi par des règles bien déterminées, pour analyser les principes logiques de l'autoreproduction : furent alors établis les premiers automates cellulaires.

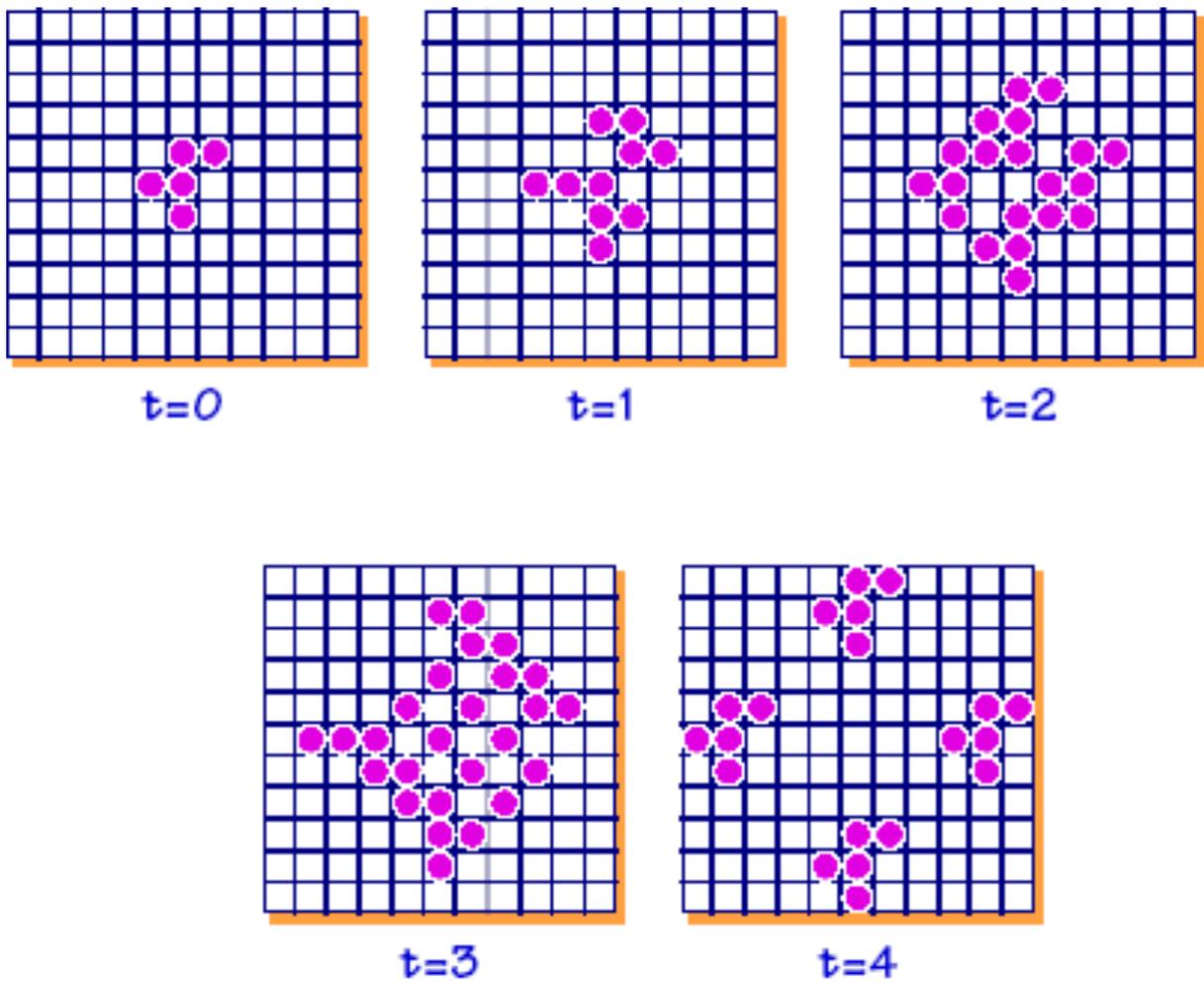


Figure 10 : Automate cellulaire auto-réplicateur de Friedkin (1960)²⁰

Von Neumann, Friedkin puis Langton [Lan 86] notamment ont développé ce principe dans des automates auto-réplicateurs.

²⁰ D'après lslsun.epfl.ch/pages/staff/sanchez/VidaArtificial.pdf

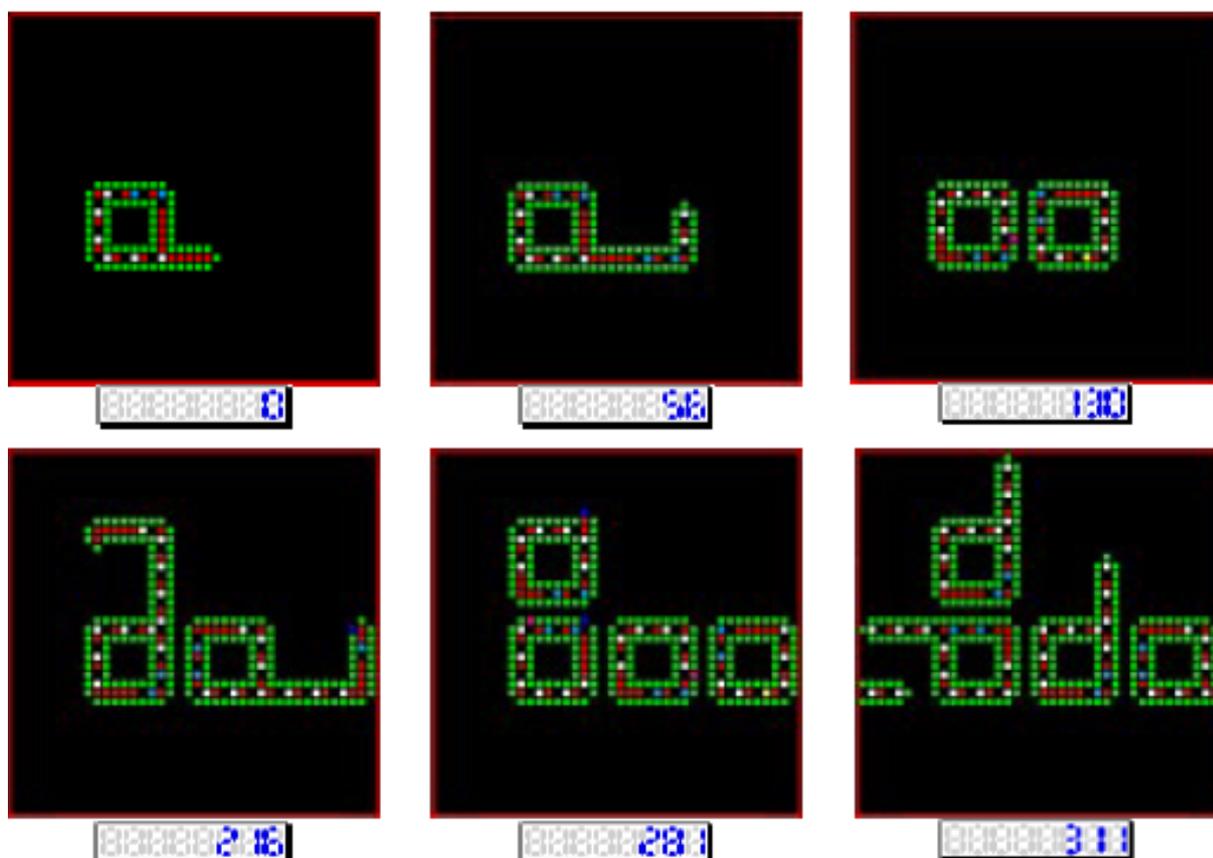


Figure 11 : Automate cellulaire auto-réplicateur de Langton (1985)²¹

Mais dans ces travaux, les structures n'étaient pas réellement perçues par le programme. D'autres travaux, comme par exemple ceux de J.P. Crutchfield [Cru92], visent l'automatisation de la détection de structures dans des automates cellulaires

Il faut souligner que dans ces travaux, si on va jusqu'à la détection de structures, leur implémentation ou au moins une action directe de ces structures sur les éléments qui la compose, n'existe pas : la géométrie contrainte et l'isotropie structurelle des automates cellulaires pourrait bien être leur limitation.

2.2.4 Approches agents

2.2.4.1 Une holarchie fixée a priori : GEAMAS

Pierre Marcenac et son équipe ont développé une architecture multiéchelle de système multiagents appelée GEAMAS. Dans [Mar 97], Marcenac explique pourquoi selon lui il est nécessaire de passer par des modèles décentralisés à base de règles pour réifier des systèmes complexes. S'appuyant sur [Fer 95], il explique que les modèles « centralisés » ne peuvent prendre en compte que des relations « simples » (probablement au sens de linéaire) entre les variables d'état du système, alors que l'approche décentralisée, notamment multiagent, peut gérer des relations plus fines entre les différentes parties du modèle, celles-ci ne se réduisant plus simplement à des variables.

²¹ Ibid.

Les systèmes étudiés possèdent souvent une hiérarchie intuitive. Il paraît donc adapté de construire un modèle lui-même hiérarchique, avec des échelles correspondant à celles perçues dans l'objet de l'étude. C'est un principe qui a guidé la conception de GEAMAS.

Le principe du changement d'échelle y est récursif. Les agents d'un niveau de description correspondent aux organisations d'agents du niveau inférieur. Ces relations sont définies a priori, elles ne sont pas calculées au cours de la simulation.

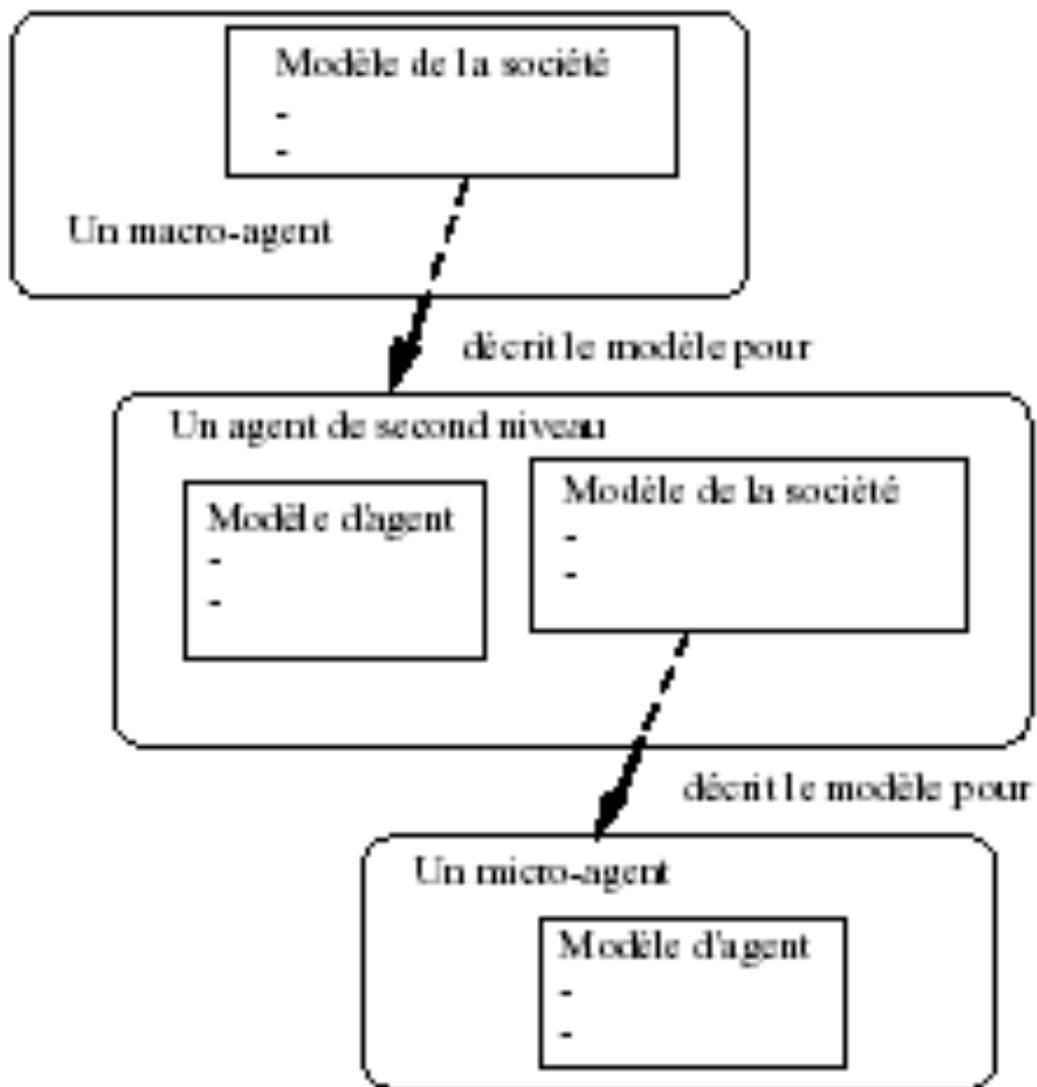


Figure 12 : Propriétés récursives de GEAMAS

Les agents d'un même niveau communiquent par échanges de messages asynchrones. Les agents de niveaux différents communiquent par des messages spéciaux dits de décomposition et de recomposition.

GEAMAS a été conçue pour construire une simulation de l'activité éruptive d'un volcan, appelée GEOMAS. Ainsi la recomposition désigne-t-elle les messages allant d'agents de grain plus fin vers un agent de grain plus gros pour lui signifier que, certaines valeurs critiques étant atteintes, il doit se réorganiser. La décomposition quant à elle désigne les

communications dans le sens opposé. Elle concerne par exemple le filtrage des lois et données extérieures à un agent d'un niveau vers les plus petits agents du groupe qu'il représente.

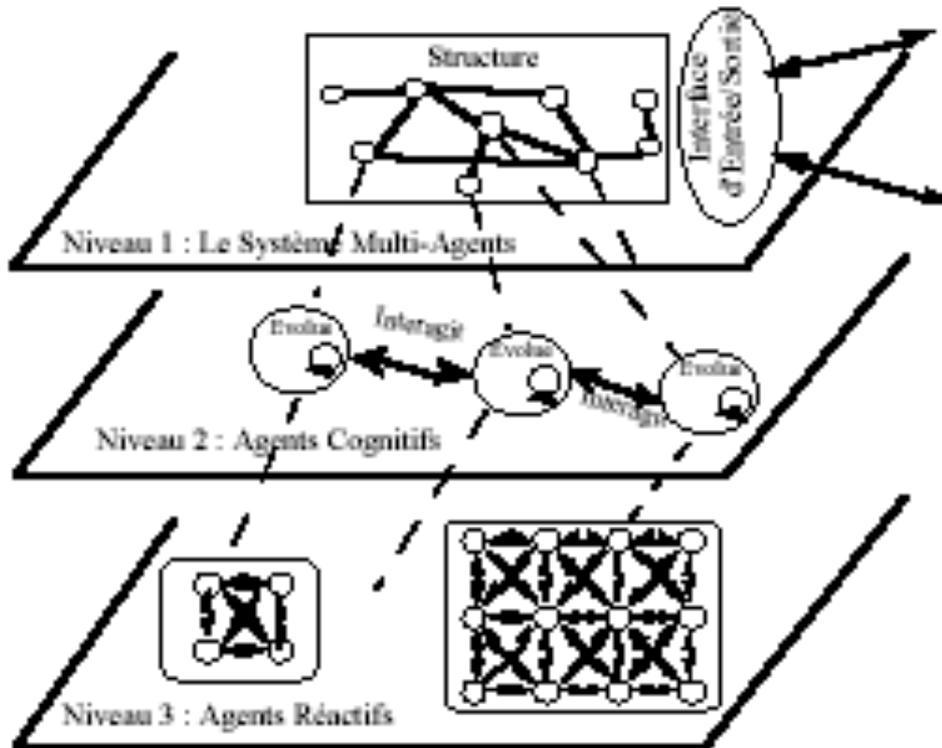


Figure 13 : Schéma de l'architecture de base de GEAMAS

Comme l'indique le schéma précédent, trois niveaux de description ont été retenus pour GEAMAS. La complexité des agents va décroissant en fonction du numéro du niveau (ici plus le numéro est grand et plus on est à bas niveau). L'approche retenue est descendante : le modélisateur part du haut niveau et le subdivise ensuite. En effet, dans l'optique de GEOMAS, les données globales connues sont sur le volcan en entier. On commence donc par le décrire lui puis on le découpe en différentes sous-parties. On augmente alors le numéro du niveau. On arrête la subdivision quand les agents atteignent une simplicité telle que les re-subdiviser n'aurait plus grand sens. Bien que cette notion ne soit pas citée, GEAMAS est un très bon exemple d'holarchies (1.6.4).

Marcenac explique également que selon lui cette limitation à 3-4 niveaux de description est généralisable à la plupart des modèles multiéchelles, qui n'en comptent « intrinsèquement » pas plus. Cette remarque est peut-être plausible d'un point de vue ingénieur, lorsque toutes les échelles sont très différentes de structure et qu'on doit alors les décrire individuellement, ainsi que les rapports qu'elles entretiennent. Mais par exemple lorsque les niveaux d'échelles sont construits automatiquement cette limitation paraît un peu arbitraire. Un autre exemple pourrait être un modèle d'organisme multicellulaire évolué comme par exemple un mammifère, pour lequel, de la chimie à l'insertion dans un groupe social, on pourrait s'intéresser à bien plus de niveaux : la difficulté de la conception n'empêcherait pas la nécessité de la prise en compte de tous les « détails » non négligeables.

2.2.4.2 Rivage

Dans le prolongement des travaux de Perrier et al., on trouve, toujours à l'IRD, Rivage, application de la thèse de David Servat. [Ser 00]

Rivage est un travail centré sur un modèle multiagent de ruissellement. Un ruissellement est un écoulement fluide sur une surface solide. Dans le modèle retenu, le système est notamment composé d'agents boule d'eau qui se déplacent en fonction d'équations dérivées de celles de Navier Stokes et des indications d'un agent topographie.

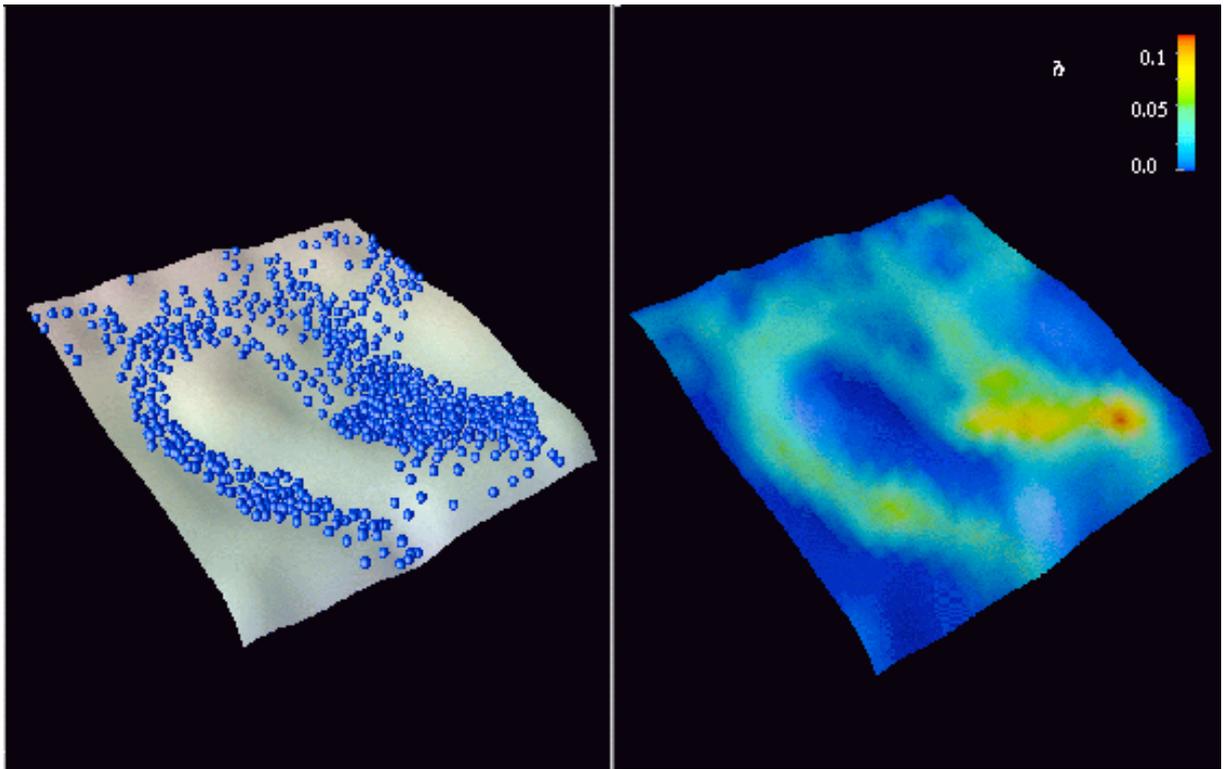


Figure 14 : Agents boule d'eau et hauteur d'eau correspondante. D'après [Ser 00]

Plus précisément à chaque pas de temps un agent boule d'eau :

- cherche l'ensemble des agents boules d'eau avec lesquels il est en interaction (suffisamment proches)
- obtient de l'agent topographie la pente locale
- calcule la hauteur d'eau et le gradient de hauteur d'eau en fonction de ses voisins.
- Calcule sa vitesse et sa nouvelle position après Δt .

Le modèle ainsi obtenu semble se comporter comme le modèle à base de loi plus habituel (équations de Saint Venant, qui sont une forme réduite bidimensionnelle des équations de Navier Stokes pour les faibles épaisseurs d'eau pour lesquelles on résume la dynamique verticale à la hauteur d'eau, et aux gradients de pression induits).

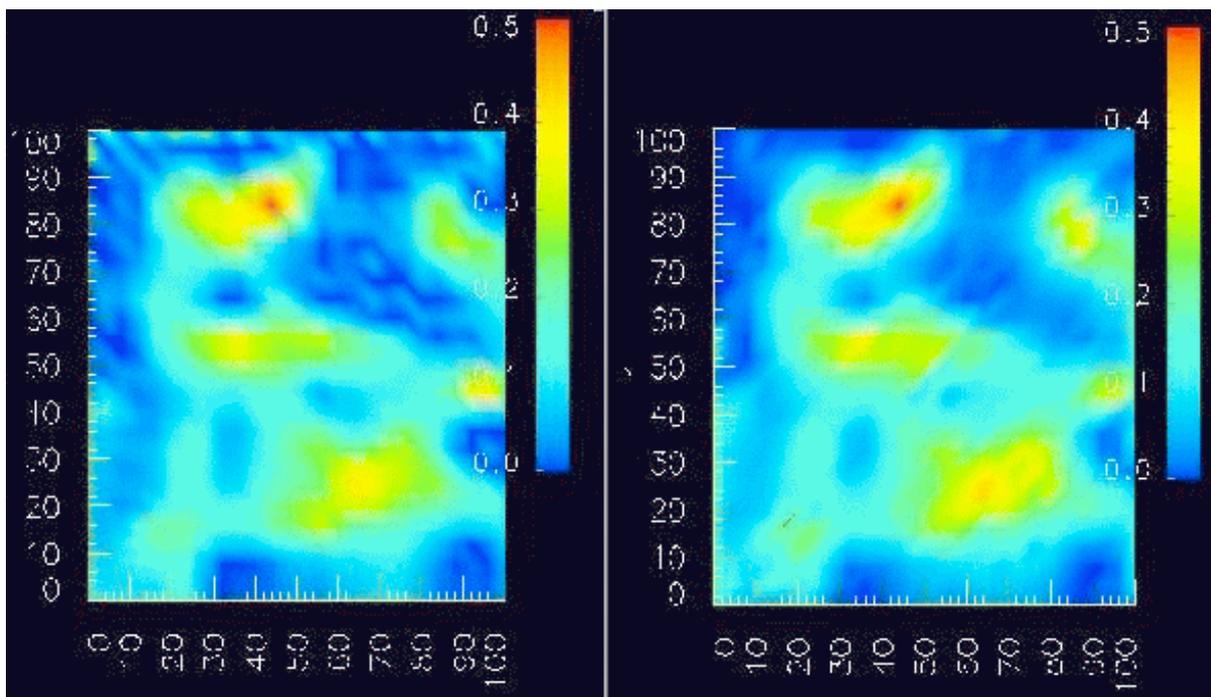


Figure 15 : Comparaison entre le modèle hydrodynamique de Rivage et le modèle à base de loi de St-Venant (d'après [Ser 00])

De plus, le modèle est à plusieurs échelles : Rivage essaie de détecter des structures émergeant lors de la simulation. Les structures retenues sont l'accumulation dans des dépressions (mares) et des écoulements le long de chemins préférentiels (ravines), comme illustré Figure 16.

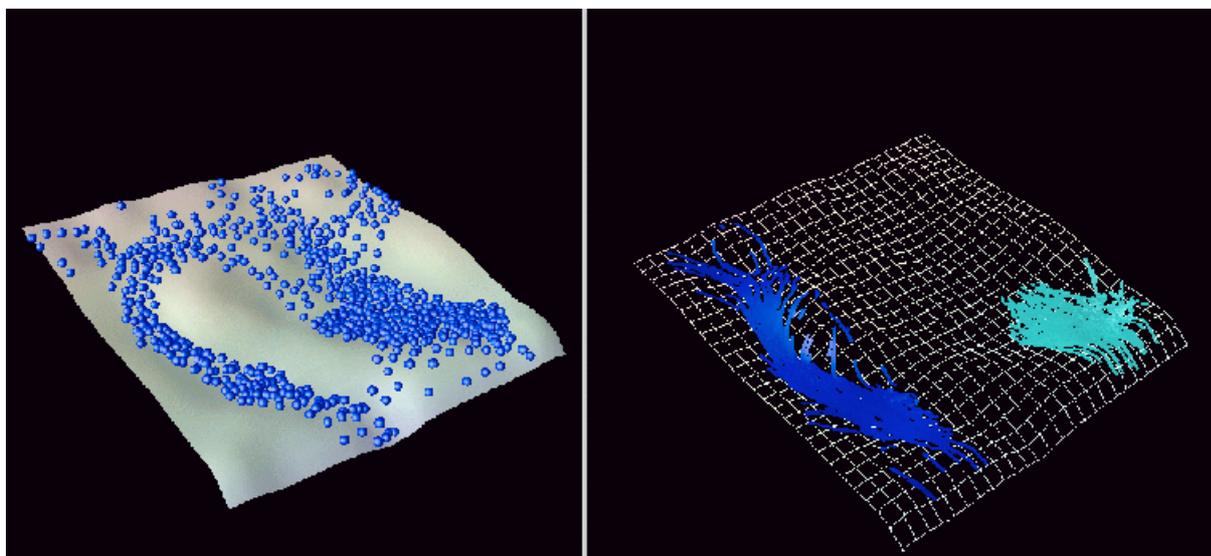


Figure 16 : Illustration des structures auxquelles Rivage s'intéresse

Pour ce faire, Rivage utilise pour chaque boule k deux indicateurs, I_k et J_k . I_k représente la différence entre 1 et le rapport entre, la distance parcourue par la boule depuis le début de la

fenêtre de temps considérée d'une part et, la distance entre ce point de départ et le point actuel de la boule d'autre part.

$$I_i = \frac{\text{distParcourue} - \text{distAbsolue}}{\text{distParcourue}}$$

J_k est une interpolation des I_k des boules situées « suffisamment » près de k .

L'interprétation est alors numérique : si I_k et J_k sont proches de 1, cela signifie que la boule et ses voisines stagnent : on est sûrement dans une mare. Sinon, si I_k et J_k sont proches de 0, alors la boule et ses voisines avancent dans la même direction, on est dans une ravine. Sinon, on ne conclue rien. La méthode est simple et rapide. Elle détecte néanmoins de fausses structures, par exemple parce qu'elle ne prend pas en compte la direction de déplacement : deux trains de boules parallèles, proches, mais de direction opposée seront considérés comme une ravine.

Une fois la détection achevée, Un nouvel agent représentant la structure (mare ou ravine) est créé. Cet agent sert surtout à des fins de représentation : il n'a pas vraiment de comportement, les boules gardent une indépendance et ne sont pas influencées par lui.

Rivage est donc une simulation multiéchelle de ruissellement par SMA. Ce changement d'échelle y sert des fins d'aide à la compréhension de la trace de simulation.

2.2.4.3 Projet Copépode

Rivage présentait un travail multiéchelle où les différentes échelles étaient de paradigmes homogènes. Philippe Preux, Éric Ramat et Raphaël Duboz de l'équipe MESC du LIL se sont eux intéressés au couplage de modèles hétérogènes, notamment SMA et modèle différentiel [Dub 04].

Raphaël Duboz s'intéresse plus précisément à un problème de dynamique de population de type proies/prédateurs. Il décrit en l'occurrence la consommation de phytoplancton par des copépodes, sorte de microscopiques crevettes.

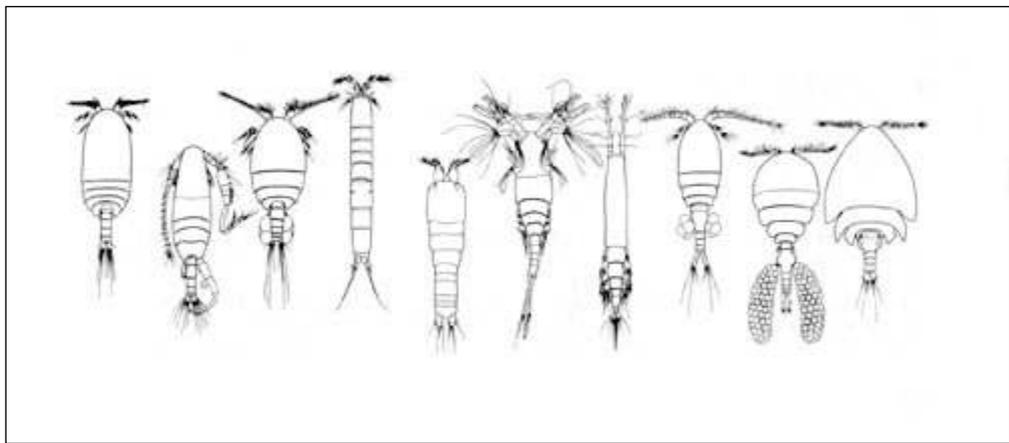


Figure 17 : Quelques copépodes adultes

Chapitre 2 Changements d'échelles

Ce travail essaie de relier le comportement des individus à l'évolution de la population. Il s'appuie sur les équations de dynamique de population de Holling-Tanner [Hol 59][Tan 75], évolution des travaux classiques de Lotka-Volterra [Lot 25][Vol 26].

Voyons d'abord l'équation présidant à la dynamique de la population de phytoplancton :

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right) - G(N, P)P$$

avec :

t le temps,

N le nombre de proies,

K la capacité de charge du milieu,

P le nombre de prédateurs,

r le coefficient de croissance de proie,

G(N , P) la fonction de l'intensité de prédation sur les proies.

On reconnaît une croissance de population logistique ($rN(1 - \frac{N}{K})$) à laquelle on soustrait une disparition de population par prédation, proportionnelle à la quantité de prédateurs, mais également à une fonction G dont la définition a été l'objet de nombreux travaux depuis Lotka-Volterra, notamment dans [Dub 04].

La population de prédateurs elle évolue selon :

$$\frac{dP}{dt} = eG(N, P) - mP$$

Avec en plus :

e, coefficient de transformation de la masse de proie en prédateurs (post-digestion)

m, coefficient de mortalité des prédateurs.

La fonction G a été la cible de nombreux travaux essentiellement analytique jusqu'à présent : on est passé depuis [Lot 25] d'un coefficient constant à une fonction rationnelle de degré 2. L'idée originale ici est de calculer la valeur de G(N , P) à partir de la trace d'une simulation d'un SMA. Une population de phytoplancton et une de copépoïde sont créées dans le SMA, celui-ci s'exécute et enfin on mesure l'intensité de prédation qui a eu lieu. Examinons ce SMA un peu plus en détail.

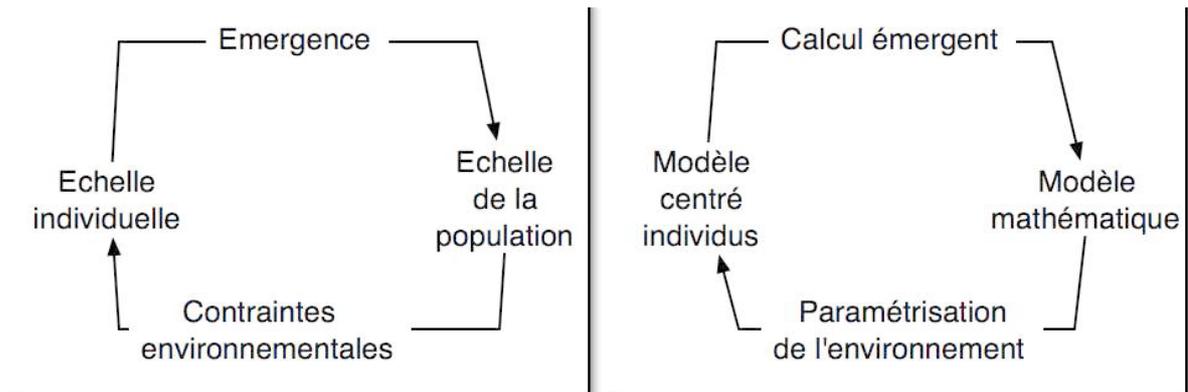


Figure 18 : Principe du calcul d'une fonction émergente (d'après [Dub 04])

Le phytoplancton y est modélisé comme un objet passif ponctuel, sa population répartie dans l'environnement spatial en 3D.

Le comportement du copépode est plus compliqué, on peut le résumer en :

- Déplacement pseudo-aléatoire
- Perception éventuelle d'une proie (cône de perception)
- Le copépode se dirige alors plus ou moins vers la proie.
- Le copépode redirige la proie vers ses appendices buccaux
- Il assimile ou non sa proie

Le comportement du copépode dans ce modèle²² s'appuie sur différents modèles analytiques connus.

Nous reviendrons dans 2.3.1.3 sur les raisons pour lesquelles Raphaël Duboz ne s'est pas contenté d'un SMA pour tout modéliser, et pour lesquelles donc il a gardé en partie un modèle analytique global.

2.2.4.4 ABIS

Nous décrivons au Chapitre 3 un système d'aide à la communication dans la couche dédiée d'un Système d'Information et de Communication (SIC). J'y ai participé pendant mon DEA et ma première année de thèse, et trois thèses du LIH lui sont liées : [Dur 99], [Les 99] et [Bou 02].

Un SMA multiéchelle baptisé ABIS est au cœur de cette réalisation. Le transfert d'échelle se fait entre deux organisations d'agents, les agents aspectuels et les agents de morphologie. Les premiers agentifient le discours scripté des utilisateurs du système, les deuxièmes représentant certaines caractéristiques du fonctionnement des premiers. Le système de morphologie peut être vu comme soulignant la dynamique du discours, alors que l'aspectuel serait une

²² Ce modèle représente également très bien le comportement de ma jeune fille titubant dans son youpala, à la différence que dans son cas des agents extérieurs s'efforcent d'influencer le déroulement du dernier point.

représentation plus statique. On pourra se reporter au Chapitre 3 si on trouve cette version très résumée trop obscure.

2.3 Analyse des méthodes décrites

2.3.1 Règles et lois

2.3.1.1 Changer d'échelle dans un modèle à base de lois

Le changement d'échelle dans cette catégorie se passe souvent par intégration. En effet, comme on l'a dit en 1.5.1, les fonctions d'état du système sont généralement continues, donc intégrables. On construit ou évalue de nouvelles fonctions d'état, éventuellement dans un autre domaine et avec des équations phénoménologiques différentes.

Le niveau de description inférieur est résumé dans le supérieur par une fonction voire une grandeur numérique. On en a vu un exemple avec [Bou 97] au 2.2.2.2, nous en verrons d'autres en hydrodynamique, aux 4.3.6 et 4.3.7 par exemple.

Le changement d'échelle dans ces modèles se produit alors au moment de la création du modèle et non lors de la simulation. Les fonctions d'état décrivant les différents niveaux sont calculées *a priori*. Elles incluent déjà le transfert d'échelle.

2.3.1.2 Changer d'échelle dans un modèle à base de règles

Les modèles à base de règles fournissent une plus grande variété de manières de changer d'échelle. En effet les modèles locaux présentent une meilleure adaptation à prendre en compte des entités fonctionnant de manière très différente, comme par exemple, n'étant pas de la même échelle. Voyons quelques exemples de tels modèles à base de règles.

Dès le début de l'utilisation des modèles individus-centrés en écologie [DEA 92], le problème des transferts d'informations entre les niveaux individuels et les populations s'est posé. L'interaction proposée alors entre les groupes et les individus était traitée de manière statistique [CAS 92] ou en utilisant une construction hiérarchique basée sur des calculs de potentiel d'action [PAL 92].

Reprenons les exemples vus au 2.2.4.

La plupart des architectures informatiques pour la gestion des modèles à plusieurs échelles sont basées sur des systèmes à niveaux. Souvent deux niveaux gèrent respectivement le niveau micro et le niveau macro. Ces niveaux sont couplés par exemple par des *recompositions* ou des *décompositions* des organisations émergentes, comme dans [MAR 97] (au 2.2.4.1). On passe alors séquentiellement d'une résolution globale à des résolutions locales détaillées sans pour autant que ces dernières interagissent, dans leur propre processus de calcul, avec la résolution globale.

Dès 1998, les membres du projet RIVAGE font remarquer la nécessité de gérer dans des simulations multiagents, les groupes émergents en leur associant, en cours de simulation, des entités spécifiques calculées par la simulation elle-même [SER 98]. Les amorces de solutions

jusqu'alors exhibées font généralement référence à des interactions frontalières entre entités et groupes [GAS 92].

D. Servat, dans son travail de thèse [SER 00] (2.2.4.2) propose un modèle hydrodynamique pour le ruissellement notamment. Des individus *boules d'eau* sont capables de s'agréger en mares ou ravines émergentes dans la simulation. Dans ce modèle, les boules d'eau agrégées subsistent avec leur comportement dans la simulation (elles peuvent par exemple, quitter leur groupe). On ne réduit donc pas fondamentalement la complexité du calcul et la constitution des groupes apporte des informations globales supplémentaires sans pour l'instant agir sur la dynamique des boules d'eau. Le modèle s'appuie sur des individus et des groupes représentatifs d'éléments physiques et contraint fortement une représentation abstraite basée sur des méta-modèles.

Dans Abis (2.2.4.4) les agents de morphologie sont créés en fonction des états des agents aspectuels, dynamiquement au cours de la simulation. Ils ont une existence réelle, influencée mais pas entièrement dépendante de la couche aspectuelle. Ils ne rétroagissent par contre pas directement sur celle-ci, même si c'était l'objectif à terme (notion de bouclage, voir [Car 00]).

2.3.1.3 Changer d'échelle dans un modèle mixte

On pense ici notamment aux travaux de l'équipe MESC (2.2.4.3), mais également à des travaux plus récents de notre équipe. Le principe en est de faire cohabiter au moins un modèle à base de règle et au moins un modèle à base de lois.

Dans [Dub 04] on l'a vu, le modèle à base de règles, un SMA, sert de laboratoire virtuel. Des mesures automatiques sont faites sur lui, celles-ci servant alors de paramètres et de variables pour un modèle à base de loi, basé sur une dynamique de population différentielle.

On pourrait se demander pourquoi R. Duboz n'a pas choisi de faire un seul niveau de description, le SMA. Mais il lui aurait alors fallu inclure des facettes supplémentaires du cycle de vie des copépodes comme la naissance, le cycle de développement (11 phases successives) et la mort. Non seulement ces données sont mal connues, mais de plus les intégrer correctement aurait grevé la complexité de la simulation. Or il disposait d'un modèle plus global certes, mais bien connu et rapide : il a donc choisi le couplage. Changer d'échelle entre l'individu-centré et l'analytique est parfois le meilleur moyen d'intégrer les différentes connaissances qu'on a sur un sujet.

Nous développerons au Chapitre 6 les continuations de nos travaux, avec un modèle compartimental de réseaux trophiques. Les grandeurs ambiantes telles que la lumière ou la concentration en oxygène sont décrites dans chaque compartiment par un modèle à base de lois. Les valeurs de certaines de celles-ci, notamment la concentration en oxygène, sont calculées en fonction des actions individuelles du phytoplancton, producteur primaire « transformant » sels minéraux, gaz carbonique et lumière en oxygène (photosynthèse). Le phytoplancton a une vie à base de règles. Nous nous efforcerons par la suite de ramener ce modèle vers plus de règles, en couplant les flux de matières et d'énergies avec le modèle présenté en détail dans cette thèse.

Chapitre 2 Changements d'échelles

2.3.1.4 Conclusion

Nous avons ainsi essayé de classer les différents modèles multiéchelles en fonction de leur nature. Voyons à présent comment on pourrait les regrouper en fonction des buts recherchés par leurs modélisateurs.

2.3.2 *Buts*

L'étude bibliographique précédente montre que de la conception à l'utilisation de plusieurs niveaux de description, plusieurs approches sont possibles. Cette diversité s'explique par des buts et des attentes différentes des modèles ainsi proposés. Nous allons ici décrire quels sont les objectifs qui vont induire les concepts de notre méthodologie.

2.3.2.1 Prendre en compte les aspects hiérarchiques des systèmes étudiés

C'est la motivation thématique la plus immédiate : les parties de la réalité auxquelles s'intéresse le modélisateur inspirent une nécessité de prise en compte de phénomènes à des niveaux de description variés. Elle est celle de beaucoup de modèles multiéchelles à base de loi (2.3.1.1), de GEAMAS (2.2.4.1) ou des modèles de turbulence hydrodynamique (4.3.5). Ces modèles incorporent de nombreuses échelles spatio-temporelles (2.1). ABIS (2.2.4.4) contient pour ces raisons différents niveaux de description (2.1) : la compréhension d'un discours, l'aide à laquelle est un des buts d'ABIS, nécessite plusieurs angles d'attaques non entièrement dissociés.

2.3.2.2 Présenter plus clairement les réponses de la simulation

On a rappelé en 1.2 qu'un modèle sert à répondre à certaines questions que se pose le modélisateur. Pour répondre à ces questions qui seules l'intéressent, le modélisateur doit néanmoins inclure un certain nombre de paramètres qui doivent se comporter de manière réaliste, même si, en dehors des conséquences qu'ils ont, ils ne sont pas intéressants pour le modélisateur ou même l'utilisateur du modèle. Ces paramètres nécessaires peuvent même être plus nombreux ou visibles que ceux auxquels l'utilisateur s'intéresse réellement.

Le changement d'échelle peut alors précisément mettre en valeur ce qui est recherché et mettre en arrière ce qui ne l'est pas. Ainsi par exemple dans RIVAGE (2.2.4.2), les agents mares et ravines soulignent ce qui intéresse l'hydrologue, les structures remarquables de l'écoulement, et masquent les agents boules qui coulent de manière non organisée.

2.3.2.3 Faire les deux

Ce sont les deux motivations précédemment exposées qui ont guidé notre travail. A celles-ci s'ajoute une motivation computationnelle : le changement judicieux d'échelle peut-il économiser du calcul ? Nous nous efforçons dans notre modèle (4.4 d'augmenter l'échelle quand de grandes tendances sont les principales instigatrices de la simulation (amélioration de la maniabilité du modèle), et au contraire de baisser l'échelle quand connaître plus de détails nous semble important (amélioration de sa justesse). Si cette détection de nécessité de changement d'échelle, et ce changement lui-même, prennent moins de calcul que de tout calculer au niveau de détail maximal, on a un gain de calcul.

2.3.3 *Quand changer d'échelle ?*

2.3.3.1 A priori

C'est la manière la plus habituelle de construire un modèle multiéchelle, répondant à la motivation ontologique (2.3.2.1), et n'utilisant pas nécessairement la simulation. C'est là qu'on trouvera notamment la plupart des modèles à base de loi. Le modélisateur considère les différents aspects de ce qu'il veut modéliser, et écrit un modèle les prenant en compte, préalablement à toute éventuelle simulation. Des systèmes à base de règles dont les différents niveaux et les rapports que ceux-ci entretiennent sont fixés a priori, comme GEAMAS, rentrent aussi dans cette catégorie.

2.3.3.2 A posteriori

Dans cette catégorie on fera rentrer certains modèles dont les paramètres au moins sont calibrés après simulation, ainsi que ceux dont des organisations qui ont émergées au cours de la simulation sont lues post mortem dans la trace de la simulation, comme dans MANTA [Dro 95] par exemple [Ser 98].

2.3.3.3 In medias res

Enfin, le transfert d'échelle peut avoir lieu pendant la simulation elle-même. C'est le moyen le plus informatique (par opposition à thématique) et peut-être le mieux adapté pour atteindre l'objectif de mise en relief des objectifs de l'utilisateur de la simulation.

C'est à cette catégorie qu'appartiennent Rivage, Abis et nos travaux.

CHAPITRE 3

CHANGEMENT D'ÉCHELLE AU SEIN DE LA COUCHE DE COMMUNICATION D'UN SIC

Résumé

Nous allons décrire ici une application mettant en œuvre des changements d'échelle *in medias res*.

En 1995, Stéphane Durand commença une thèse [Dur99] sous la direction de Alain Cardon dans le domaine de l'aide à la gestion de situations d'urgences voire de crise. Ils furent rejoints par Franck Lesage en 1996 [Les99]. Je rejoignis à mon tour cette équipe lors de mon DEA et de ma première année de thèse.

Le problème présenté ici est la recherche des points importants ressortant des conversations prenant place entre différents acteurs de la gestion d'une situation d'urgence. Ces acteurs communiquent par l'entremise de scripts au sein d'un Système d'Information et de Communication.

L'ensemble des messages échangés constitue un système discret, à base de règles. Un système multiagent holarchique, baptisé ABIS (Agent Based Interpretation System), constitué de sous-systèmes homogènes tente de mettre en exergue les grandes tendances sémantiques des communications échangées.

3.1 Situations d'urgence et problèmes de communication

Le problème étudié est l'aide à l'interprétation des messages échangés entre les acteurs d'un Systèmes d'Information et de Communication, ce qui implique :

1. D'analyser le texte des messages.
2. D'enrichir le message par son contexte d'émission.
3. D'immerger le message reçu dans le contexte de sa réception.
4. De dégager les traits saillants de cette immersion. Ce sont les tendances significatives du discours entre émetteur et récepteur.
5. De valider la mise en exergue de ces traits saillants en confrontant des prédictions s'appuyant sur ces points perçus comme important et le déroulement effectif des opérations.

Les points 1 à 3 sont développés dans la thèse de Stéphane Durand qui traite de la modélisation d'un SIC [Dur99]. Le point 4 l'est dans celle de Franck Lesage [Les99], qui traite de l'émergence des messages échangés, ainsi que dans [Car99]. Le point 5 est développé dans [Tra99].

3.1.1 *Les messages et l'ambiguïté sur les intentions*

La gestion des situations d'urgence implique des communications entre des personnes de différentes cultures, personnelle ou organisationnelle : les médecins du Samu ne communiquent pas entre eux comme des militaires de la gendarmerie. Des ambiguïtés peuvent donc apparaître quand les décideurs qui assument la gestion de la crise ne mettent pas exactement le même sens derrière chaque phrase. Ce problème apparaît bien sûr avec plus de force lors de l'utilisation de concepts abstraits et flous (« ça va mal », « je doute ») que dans celle de termes concrets et précis (« le camion rouge »). Cette incompréhension participe aux transformations de situations d'urgence en situations de crise.

Ces incompréhensions se produisent dans les communications ordinaires. On les résout, une fois qu'on s'est aperçu de leurs existences, en interrogeant son interlocuteur ou en lui demandant de reformuler son message. Ceci n'est pas possible dans les situations d'urgence car, d'une part, on ne dispose généralement pas du temps nécessaire à ces réémissions du message, et d'autre part on n'est pas dans le cadre d'un dialogue mais d'une communication à plusieurs dizaines de décideurs.

Une aide informatique devient alors très utile, voire peut-être nécessaire, à la gestion de la situation.

3.1.2 *Situations d'urgences et de crise*

Une situation d'urgence est, dans le domaine qui nous intéresse ici, une rupture dans une organisation socio-économique nécessitant un traitement rapide [Qua98]. Si une telle rupture échappe à une réparation totale, si certaines parties ou fonctionnalités de l'organisation doivent être sacrifiées pour en sauver d'autres, on parlera de situation de crise [BAP93]. Si les décideurs en viennent à lutter les uns contre les autres au lieu de coopérer, ou s'il y a entre

Chapitre 3

changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

eux de gros écarts dans leur représentation mentale de la situation, on parle alors de « crise dans la crise ».

3.1.3 SICs

Les actuels Systèmes d'Information et de Communication, hérités des systèmes de commandement militaires, sont des systèmes informatiques prenant en charge les informations sur les situations d'urgence, les retransmettant aux différents acteurs afin qu'ils décident au bon moment et de façon justifiée des actions à effectuer. Les SIC permettent aux différents intervenants d'échanger des données, des informations, des opinions et des jugements sur la situation traitée.

Un SIC comprend [Car98]:

- Une partie structurelle aux fonctionnalités précises : quelles sont les institutions et quels sont leurs moyens ?
- Des plans locaux précis de traitement de très nombreuses situations, comme les Plans Particuliers d'Intervention.
- Des plans généraux comme Orsec, Rouge ...
- Une structure générale partiellement hiérarchique (avec par exemple le préfet tout en haut, gendarmerie et pompiers en dessous etc...)
- Un système de communication permettant d'informer entre eux les décideurs des différentes institutions sur leurs intentions et actions

C'est à cette cinquième partie, le medium de communication, que nous allons nous intéresser maintenant

3.1.4 Communiquer dans le SIC étudié

Les décideurs communiquent par envoi de messages asynchrones. La forme standard du message comporte l'expéditeur, les destinataires, le sujet du message, l'heure d'émission, le texte du message et la finalité opératoire. La finalité opératoire correspond au but officiellement annoncé par l'expéditeur. Ceci a pour objectif de clarifier les intentions de l'expéditeur sur le message, par rapport à son appréciation de la situation en cours.

A cette forme standard, a été ajoutée à l'expéditeur la possibilité d'exprimer son point de vue de façon explicite pour les autres acteurs et de façon compréhensible à un système informatique d'interprétation artificielle des messages.

Cette expression se fait sous la forme de traits sémantiques. Un trait sémantique est représenté par un triplet (Objet du discours, Qualification, Valeur).

Les trois valeurs du triplet correspondent respectivement :

3.1 Situations d'urgence et problèmes de communication

- à l'objet que l'on cherche à qualifier (ex: un phénomène, un véhicule, une personne, un plan d'action,...),
- a une qualification de l'objet (ex: une couleur, une immatriculation, une identité, un doute,...) et
- la valeur de cette qualification (ex: *bleu, 1475 QN 14, John Smith, ...*) ou une intensité de la qualification sur une échelle subjective allant de 1 à 10 (*pour une faible certitude, un doute fort*).

Grâce à une ontologie fine du domaine du discours de gestion de situation d'urgence, les traits sémantiques nous permettent de transformer ce que nous appellerons *un script* en un ensemble de traits interprétables par un système informatique.

En effet même si les personnes impliquées dans la gestion de situations d'urgence appartiennent à des institutions possédant chacune des procédures particulières d'intervention, une culture, des buts et un langage propre, ces procédures et ces langages s'appliquent tous à un même domaine: la gestion de crises. En classifiant, dans ce domaine, les informations échangées durant les communications, on obtient une ontologie du domaine de communication de la gestion de crise. Le système d'interprétation des messages échangés dans le SIC doit opérer sur les communications en représentant le sens de la situation à gérer, c'est-à-dire en représentant la structure et l'organisation de cette situation au fur et à mesure qu'elle évolue et telle que les décideurs la conçoivent. En se basant sur des comptes-rendus d'incident réels, cinq types d'énoncés constituant les messages ont été dégagés [KAW 98] [DUR99]:

- Fait énoncé ;
- Question posée ;
- Jugement affirmé ;
- Ordre donné ;
- Action commentée.

Chaque message est constitué de plusieurs énoncés. Le contenu des messages est regroupé en catégories cognitives relatives aux situations d'urgence :

- Connaissances spatiales ;
- Connaissances temporelles ;
- Connaissances organisationnelles ;
- Connaissances de perception subjective de la situation par les décideurs .

On arrive ainsi à édifier *un script* grâce auquel les décideurs peuvent composer des messages par sélection de mots dans des menus déroulants ou dans des dictionnaires.

Chapitre 3

changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

Cependant, même si l'ontologie du domaine est suffisamment exhaustive, les messages échangés devront être replacés, par le système informatique, dans leur contexte de génération. Pour cela, le système informatique permet d'augmenter les discours des acteurs par des éléments contextuels afin de préciser le contexte d'émission des messages, ce que l'on appelle en linguistique la pragmatique. Le système informatique génère alors à son tour des traits sémantiques particuliers.

Exemple : lors d'une explosion dans un métro, le système générera des traits sémantique à propos de la possibilité d'un nombre important de victimes, de problèmes de circulation des rames, de la difficulté d'accès des secours, de différents types de blessures possibles, brûlure, coupures, asphyxie à contusions potentiellement graves.

3.1.5 Spécificités de l'interprétation des messages échangés

Le script utilisé est précis. Il nous permet ainsi de résoudre certains problèmes de pragmatique auxquels on est confronté habituellement dans la mise au point de traitements automatiques de messages échangés. Par exemple, un baptême automatique des entités quand elles apparaissent dans les messages sur lesquels travaille le système rend plus difficile les confusions entre instances différentes d'une même classe d'entités (la première fois par exemple qu'on parlera d'un camion il sera baptisé par exemple camion#1. Après cela, on ne pourra parler que de camion#1 ou d'un autre "camion", qui deviendra camion#2, etc...).

Ceci ne résout pas toutes les incompréhensions. Comme on l'a mentionné plus haut, les décideurs peuvent exprimer des jugements sur l'ensemble de la situation, y compris sur des jugements sur celle-ci. La prise en compte de ce genre de messages et de leurs sous-entendus étant primordiale pour éviter qu'une situation d'urgence ne dégénère, le système doit pouvoir percevoir ces descriptions ou commentaires de plus haut niveau d'abstraction afin de donner une vision correcte de la situation à ses utilisateurs.

Être capable de détecter des conflits non exprimés entre différents décideurs, se faire une idée de la manière dont ceux-ci perçoivent la situation et le représenter, demande une plasticité complexe à mettre en œuvre.

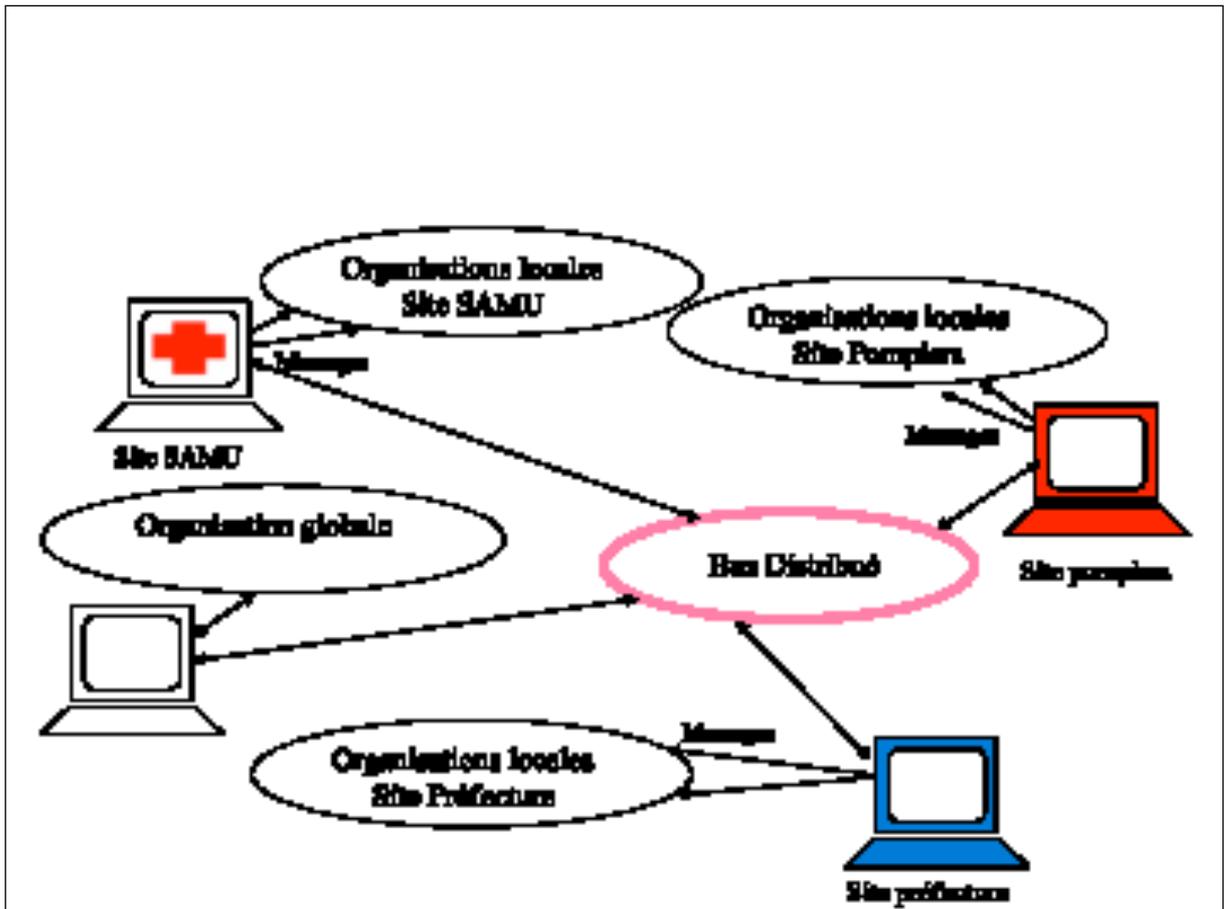


Figure 19 : Schéma du système distribué

3.2 Aide à l'interprétation des messages échangés dans ABIS

Dans le cadre d'un projet financé par la région Haute-Normandie et en collaboration avec Pompiers, SAMU et Préfecture, un système d'aide à la gestion de situations d'urgence et de crise a été réalisé dans le cadre d'un travail de thèse [Dur99] [Les99]. Baptisé ABIS, pour Agent-Based Interpretation System, c'est un vaste système multiagent physiquement distribué par CORBA, dont un prototype implémentant une partie importante du modèle a été réalisé en Smalltalk. Son but est de permettre de faire émerger le sens des communications, en partie multimédia et en partie en scripts, sur des réseaux à haut-débits (cf. Figure 20).

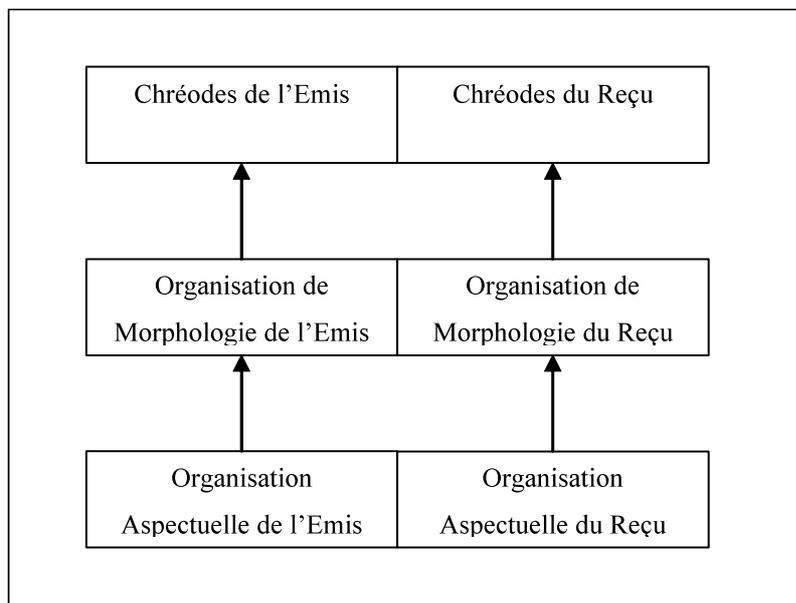


Figure 20: Les trois couches du système locales à chaque décideur

Chaque décideur, responsable d'une institution, est représenté par un nœud du réseau de communication. Localement, pour chaque décideur, ABIS est une holarchie qui se compose de trois holons. La communication entre les différentes couches a lieu dans les deux sens, sans qu'une réelle hiérarchie apparaisse.

Il existe également une couche globale regroupant la signification des interprétations locales des messages.

3.2.1 les Agents Aspectuels

Les traits sémantiques exprimés par les décideurs sous forme de triplets vont, dans ABIS, être interprétés grâce à des agents. Ces agents, représentant les aspects de la situation en cours, sont appelés agents aspectuels. Les traits sémantiques sont un triplet comportant une qualification, un objet du discours et une intensité. A chaque trait sémantique on associe plusieurs agents aspectuels représentant entre autre l'objet et la qualification.

Il existe une notion de proximité sémantique entre les agents aspectuels. En effet, certains sujets de communication ou certaines qualifications peuvent être proches (une voiture et un camion ou le doute et la défiance), éloignés (un incendie et une inondation ou le doute et la certitude) ou franchement sans aucun rapport sémantique (un incendie et le doute, ou d'une certaine façon un incendie dont le décideur parle et un dont on lui parle (le rapport entre ces deux notions sera perçu dans une autre couche du système)). Cette proximité a deux fonctions : permettre à un agent de définir ses alliés et ses ennemis potentiels, et déterminer si un trait sémantique l'intéresse ou non.

Tous les agents créés sont susceptibles d'utiliser un trait sémantique pour leur développement. Le rôle de ces agents aspectuels est de représenter un aspect de la situation dans son évolution.

3.2 Aide à l'interprétation des messages échangés dans ABIS

Les agents aspectuels sont des macro-automates. Les états de cet automate sont des ATN. Quand les agents se renforcent, leur état courant dans le macro-automate change et par conséquent leur comportement, fixé par l'ATN correspondant aussi. S'ils s'affaiblissent, ils régressent dans leur macro-automate

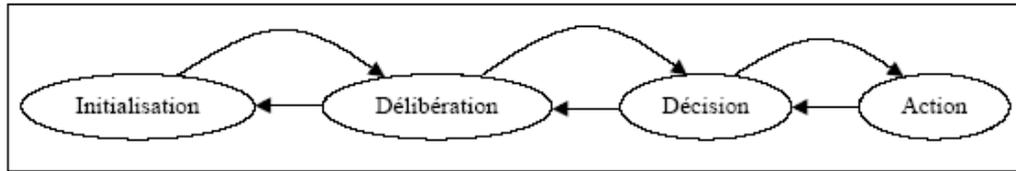


Figure 21 : Macro-automate de comportement d'un agent aspectuel

Lorsqu'un agent filtre un trait sémantique, il compare son objet et sa qualification aux siens selon cette proximité sémantique, codée dans une matrice de proximité propre à chaque organisation d'agents aspectuels. Selon cette proximité, le trait sera plus ou moins intéressant pour l'agent. Selon l'intensité du trait et sa proximité sémantique, le trait modifiera de façon plus ou moins importante l'état de l'agent. Plus le trait sémantique est proche de l'agent, plus le renforcement est fort. Un trait sémantique opposé est généralement ignoré. Ainsi, chaque message a un impact sur l'organisation des agents aspectuels fortement liés au sens des messages.

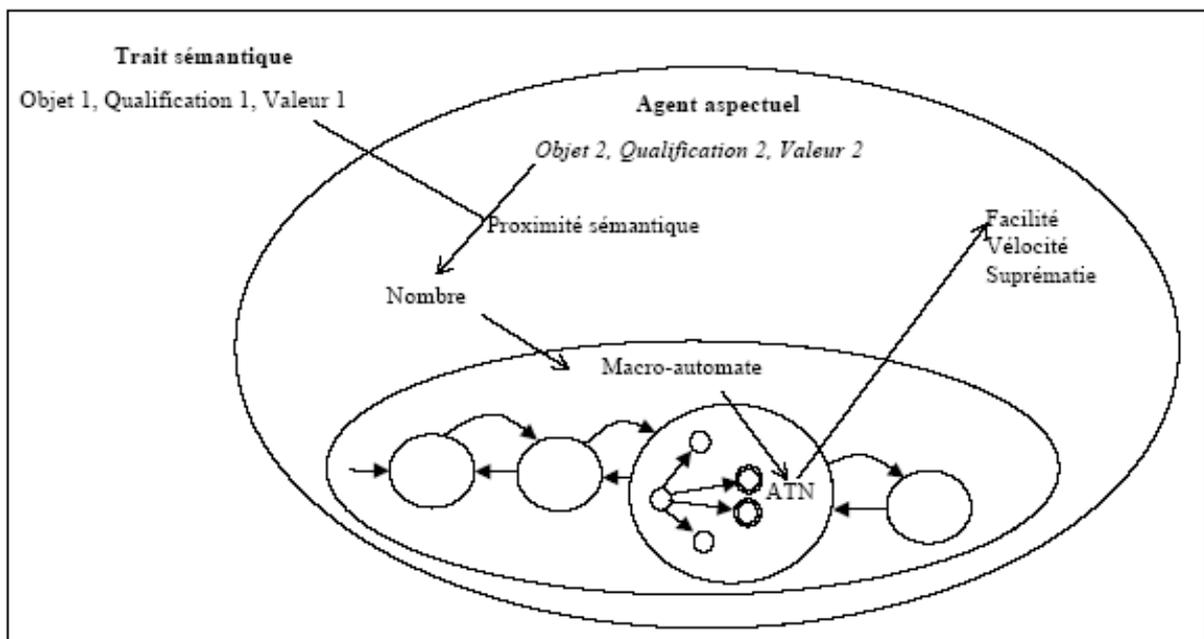


Figure 22 : Interprétation d'un trait sémantique par un agent

Le but des agents aspectuels est de se développer afin d'acquérir une place prépondérante dans le SMA afin de faire prévaloir la catégorie sémantique qu'ils représentent. Pour cela ils vont se grouper, s'associer et se combattre. Au cours de leur évolution, les agents combattent les agents sémantiquement éloignés et s'allient avec les agents sémantiquement proches. Les actions agressives consistent à ralentir ou à affaiblir les agents antagonistes (i.e. sémantiquement éloignés). Les actions d'aide consistent à renforcer les agents alliés les plus faibles.

Chapitre 3

changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

Ces organisations d'agents aspectuels sont des représentations dynamiques de la façon dont les décideurs ont exprimé leur vision de la situation en cours. Il existe une organisation d'agents aspectuels locale à chaque décideur utilisant le système, représentant ce qu'il a dit et ce qu'on lui a dit.

Ces agents aspectuels sont hybrides [Gue96], c'est-à-dire qu'ils réunissent des qualités cognitives et des réflexes innés typiques des agents réactifs. Ils répondent par ailleurs à la notion légère d'agent [JSW98]. On trouvera ainsi des agents aspectuels aussi divers que des agents de doute#3 ou de camion#1. On distinguera de plus les agents en fonction de s'ils sont émis ou reçus.

Chaque message émis est augmenté par l'organisation aspectuelle de l'émetteur. De nombreux traits sémantiques sont donc émis à chaque message, chacun créant ou renforçant plusieurs agents aspectuels. Au bout de quelques communications, le nombre d'agents aspectuels pour chaque décideur peut donc dépasser plusieurs centaines.

L'analyse individuelle de ces agents et de leurs relations conduirait à une explosion combinatoire. Il nous faut donc pour ABIS parvenir à résumer le plus fidèlement possible cet ensemble d'agents. Il doit réussir à percevoir ce que ces agents ont en commun, quels sont les plus importants, lesquels sont proches de certains et loin d'autres. Nous devons essayer de voir quelles « formes » se dessinent dans cet ensemble, dans ce que nous appelons *un paysage d'agents*. Nous raisonnerons ensuite sur ces formes, ces tendances géométriques émergentes reconnues dans le paysage, et non plus sur les agents eux-mêmes qui les composent.

3.2.2 La couche Morphologique

3.2.2.1 Notions locales

Les agents aspectuels sont renforcés par les messages les concernant et par les agents proches d'eux sémantiquement. Ils sont affaiblis par les agents opposés sémantiquement. Nous avons formalisé ceci grâce à une analogie mécanique. La relation fondamentale de la dynamique indique que :

$$\sum \overline{F}_{ext} = m\vec{\gamma}$$

Ici les forces extérieures sont exercées par les autres agents et les messages. L'accélération s'appelle ici *facilité*. Un agent aspectuel sera accéléré (sa facilité augmentera) par les messages le concernant (composante de connaissance), accéléré ou ralenti (composante structurelle) par d'autres agents pouvant l'influencer selon leur *suprématie* (voir plus bas, composante structurelle) pondérée par leur proximité sémantique (composante organisationnelle).

La masse, qui en mécanique représente l'inertie du solide, est ici l'expérience de l'agent aspectuel. Un agent sera moins sensible aux attaques des agents ennemis s'il a déjà été la cible de beaucoup d'attaques d'agents éloignés sémantiquement ou d'aides d'agents proches, ou s'il a été modifié par beaucoup de messages. Ainsi, si un message parle de sujets proches de l'agent aspectuel mais qu'il a été précédé de dizaines d'autres sur le même sujet, il influencera moins cet agent.

3.2 Aide à l'interprétation des messages échangés dans ABIS

On intègre la facilité par rapport au temps pour obtenir la *vélocité* de l'agent. La *vélocité* représente la vitesse de développement de l'agent. Si la facilité est forte (plus de soutien que d'empêchement) l'agent aspectuel se développera plus vite ; dans le cas contraire, il pourra aller jusqu'à régresser.

Enfin, on intègre la *vélocité* pour obtenir la *suprématie*. Celle-ci mesure la force de l'agent aspectuel par rapport aux autres. Elle lui vient, comme on peut le voir en suivant son procédé de calcul, de son intégration dans son environnement, composé du holon du système des agents aspectuels mais également des communications qui l'ont influencé.

Chaque agent calcule donc sa facilité, sa *vélocité* et sa *suprématie*. C'est néanmoins à un autre niveau que ces caractéristiques de l'agent sont exploitées.

3.2.2.2 Agents de morphologie

Pour ne pas être débordé par le volume de données sur les caractéristiques des agents aspectuels, pour concentrer ces données en connaissances significatives sur leurs actions et développement, on regroupe ces agents par paliers de valeurs. Ce n'est pas une simplification trop grossière car ces paliers sont calculés dynamiquement à l'aide d'agents particuliers, les *agents de morphologie*, dont l'ensemble constitue un nouveau holon.

L'intuition qu'on pourra en avoir se fait par analogie avec la gravitation :

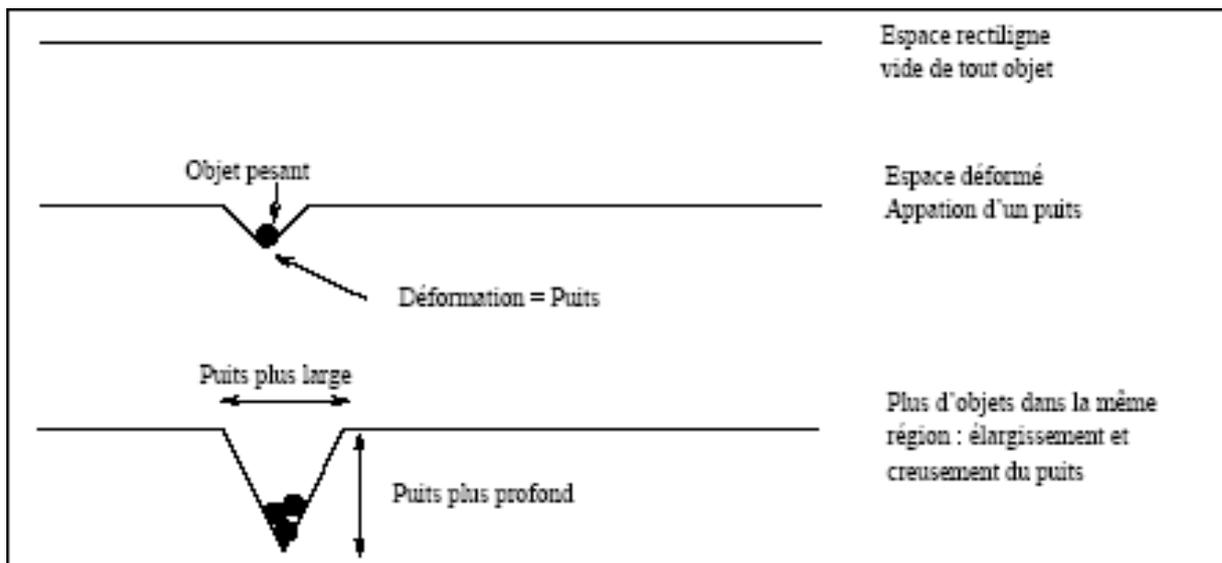


Figure 23 : Les agents de Morphologie se comportent comme des corps pesants

Ainsi, plus un agent de morphologie regroupe d'agents sur le palier qu'il représente, plus ce palier sera large. Voyons à présent cela plus précisément.

Nous avons trois organisations différentes d'agents de morphologie, une pour chaque caractéristique retenue dans le paysage aspectuel (ici par exemple facilité, *vélocité* et *suprématie*). Leur fonctionnement est néanmoins identique. A chaque agent aspectuel correspond trois pseudo-agents de pré-morphologie, un pour chaque organisation morphologique. Ces agents de pré-morphologie vont avoir tendances à s'agrèger, soit entre eux, créant ainsi un agent de morphologie, soit à un agent de morphologie existant. Cette

Chapitre 3

changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

agrégation dépend de la valeur de la caractéristique morphologique qu'ils représentent. Les agents de morphologie ont donc ainsi un *focus*, valeur moyenne de la caractéristique des agents de pré-morphologie agrégés, et un *poids*, dépendant du nombre d'agents de pré-morphologie qu'ils agrègent. Le poids d'un agent de morphologie détermine la largeur de l'intervalle autour du focus sur lequel l'agent de morphologie agrège les agents de pré-morphologie (cf. Figure 24).

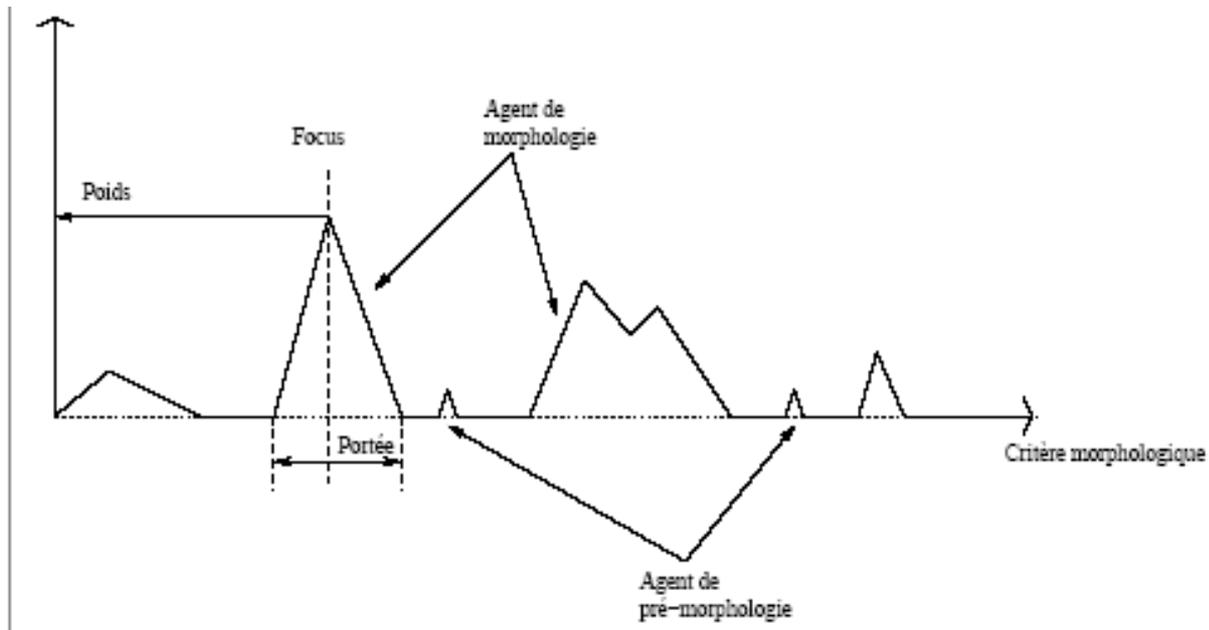


Figure 24: Représentation d'une organisation d'agents de morphologie

Ce résumé des caractéristiques morphologiques du paysage d'agents est particulièrement intéressant en ce qu'il dégage des visées pour le système, qui font que celui-ci interprétera les événements extérieurs en fonction de ce qui a capté son attention sur le moment (les agents de morphologie à plus forte intensité). Ainsi un agent aspectuel pourra s'intégrer morphologiquement au discours dans sa globalité s'il fait partie d'un agent de morphologie consensuel (intense) ou s'en écarter s'il est en dehors de tout, pouvant aller jusqu'à créer lui-même une nouvelle tendance.

Nous avons donc la couche aspectuelle, totalement reliée à la signification des scripts de message, et la couche morphologique, qui en est détachée, qui ressemblerait à une couche méta dans un système à base de règles. Pour pouvoir analyser rationnellement ces deux aspects du discours, il va nous falloir fusionner ces deux approches pour que l'on puisse se faire une idée de ce qu'exprime le discours, incluant une partie de son non-dit. C'est le rôle des *chréodes*.

3.2.2.3 Extractions des faits saillants : les chréodes

Nous commençons d'abord par fusionner les trois organisations de morphologie. On introduit pour cela la notion d'*importance* d'un agent aspectuel, qui est un barycentre de sa facilité, sa vélocité et sa suprématie. On notera donc qu'un agent aspectuel aura une forte importance si par exemple une au moins de ses caractéristiques morphologiques est élevée, ou encore si toutes sont à un niveau assez élevé sans qu'aucune ne soit individuellement très forte.

3.2 Aide à l'interprétation des messages échangés dans ABIS

L'importance est donc en quelque sorte un résumé de l'intérêt morphologique de l'agent aspectuel

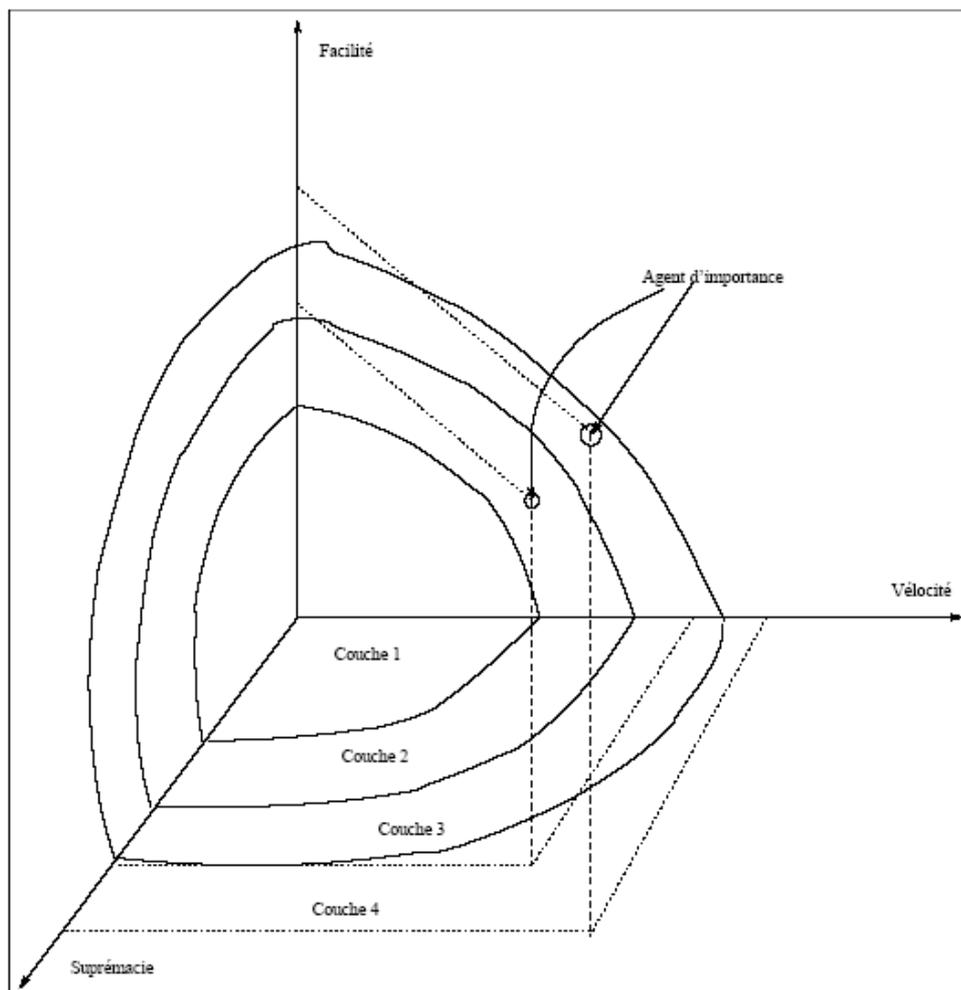


Figure 25 : Représentation de l'importance

De cette importance on va pouvoir déduire la *prégnance* du concept C réifié par l'agent aspectuel. Notée $Pr_R(C)$, cette prégnance se calcule en plusieurs étapes.

On l'a dit plus haut, on a une notion de proximité sémantique entre les différents agents. On s'intéresse au cercle de centre l'agent dont on cherche à calculer la prégnance et d'un certain rayon sémantique. On calcule ensuite la moyenne des importances des agents situés (sémantiquement) à l'intérieur du disque. Cette moyenne est pondérée par le rayon du disque moins la distance séparant l'agent du centre du disque. Ainsi, plus un agent est proche sémantiquement de celui dont on calcule la prégnance, plus l'influence de son importance se fera sentir dans le calcul (Figure 26).

$$\Pr_R(C) = \frac{\sum_{Ci/d(C,Ci)<R} Sa(Ci) * (R - d(C, Ci))}{\sum_{Ci/d(C,Ci)<R} (R - d(C, Ci))}$$

- C est l'agent aspectuel dont on calcule la prégnance
- R le rayon du cercle
- Sa (Ci) l'importance d'un agent aspectuel Ci
- d (Ci,Cj) la distance sémantique entre deux agents aspectuels Ci et Cj

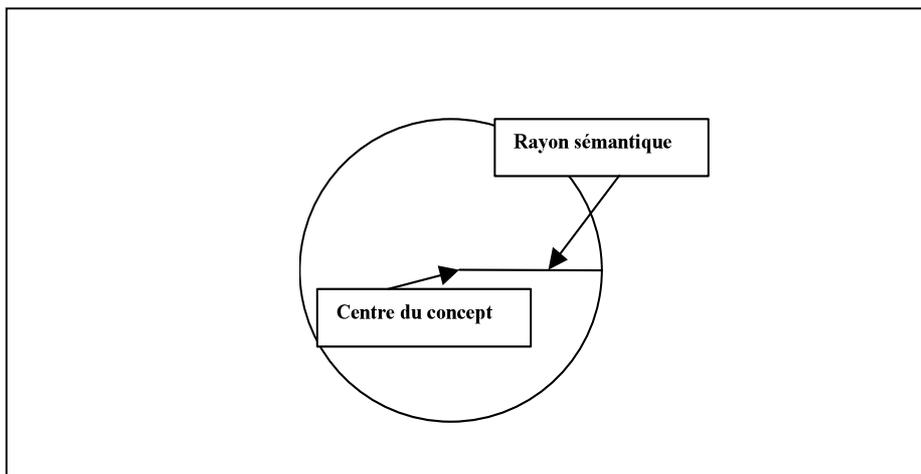


Figure 26 : Illustration du calcul de la prégnance

Il est à noter qu'on peut ainsi estimer la prégnance d'un concept dont on n'a jamais parlé nommément, mais dont on a évoqué plusieurs aspects proches.

Les agents calculent leur importance en permanence, en même temps que leurs caractéristiques morphologiques. On peut ainsi constituer une organisation morphologique d'agents que l'on appellera d'importance, suivant exactement le même principe que les trois autres organisations morphologiques que l'on appellera primaires.

On s'intéresse ensuite aux agents de morphologie d'importance dont le focus a la plus grande intensité (sur la Figure 24, ce sont les agents les plus à droite). On obtient à partir d'eux la liste des agents de pré-morphologie qu'ils agrègent, et de là celle des aspectuels correspondants. On calcule ensuite la prégnance des concepts que ceux-ci réifient.

Le calcul de la prégnance est en effet assez coûteux, il est donc utile de ne l'effectuer qu'à bon escient. Filtrer les agents sur leur importance est une bonne heuristique : étant donné la manière dont la prégnance est calculée et la façon dont les agents proches sémantiquement sont renforcés par les mêmes messages et s'entraident, les agents avec une importance faible ont peu de chances de réifier un concept important dans les conversations. Ce n'est néanmoins qu'une heuristique.

3.3 Étude de cas : Collision entre un camion citerne et un train de voyageurs

En regroupant ces concepts par paliers de prégnance au sein de ce qu'on appellera des *chréodes*, on obtient un résumé de ce à quoi le décideur s'intéresse le plus (ce dont il parle le plus) et ce dont les autres décideurs lui parlent le plus.

On peut remarquer que cette définition est légèrement différente de celle donnée dans [Les 00]. Les chréodes dans [Tra 99] étaient un outil préliminaire à une analyse rationnelle simple, celles de [Les 00] s'inscrivaient dans une perspective à long terme plus ambitieuse [Car 00].

Cette analyse rationnelle sans changement d'échelle est décrite dans [Tra 99] et développée dans [Bou 02]. Néanmoins, il est intéressant de remarquer que le changement d'échelle entre les systèmes aspectuels, morphologique, puis le mélange dans les chréodes, permet d'extraire des notions importantes du discours, des organisations discursives peut-être, propre à une analyse rationnelle qui exploserait combinatoirement sans ce travail de changement d'échelle préalable.

3.3 Étude de cas : Collision entre un camion citerne et un train de voyageurs

Nous allons ici illustrer le fonctionnement d'ABIS en reprenant un exemple également décrit dans [Dur 99] et [Les 99].

Cet exemple montre les problèmes liés à la qualité des informations qu'ont les décideurs lors du début d'un incident. Cet exemple est court : quatre messages. Mais il montre bien les imprécisions de l'information, même à haut niveau hiérarchique. Il nous permettra de montrer comment les éléments du discours se replacent dans leur contexte d'émission et de réception.

Ce scénario a été utilisé lors de la présentation pour la validation du prototype par le groupe de travail régional.

3.3.1 Le scénario

Les acteurs

Ce scénario comporte trois acteurs : Acteur 1, Acteur 2 et Acteur 3.

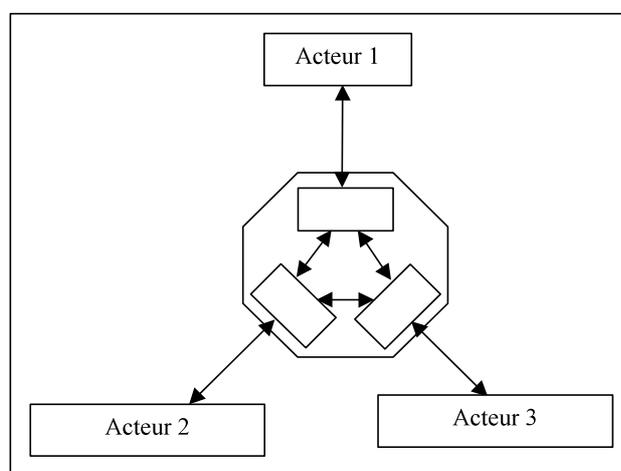


Figure 27 : Acteurs du scénario de collision.

Chapitre 3

changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

Les messages en résumé

| N° | Heure | Expéditeur | Destinataires | Contenu |
|----|-------|------------|----------------------|---|
| 1 | 0 | Acteur 2 | Acteur 1 | Explosion dans un train sur la ligne X, il y a 10 minutes |
| 2 | 0h4m | Acteur 3 | Acteur 1. | Incendie dans un train de voyageurs au niveau du passage à niveau Y, il y a 5 minutes |
| 3 | 0h7m | Acteur 1 | Acteur 2 Acteur 3 | Je veux plus d'informations |
| 4 | 0h15m | Acteur 3 | Acteur 1 | Collision au niveau d'un passage à niveau entre un train de voyageurs et un camion citerne. Explosion, Incendie et de nombreux blessés. |

Tableau 1 : Messages de scénario collision.

Il s'est donc passé vingt cinq minutes depuis le début de l'accident, avant que l'acteur 1 ait suffisamment d'informations pour prendre une décision d'action.

3.3.2 Les messages en détail

Nous allons détailler les traits sémantiques émis par les acteurs. Ces traits vont être ajoutés aux messages pour former une donnée communicationnelle.

Premier message

- (*Phenomenon#1, name, Explosion*)
- (*Phenomenon#1, Space Location, Location#1*)
- (*Phenomenon#1, Involved, Vehicle#1*)
- (*Vehicle#1, type, Train*)
- (*Location#1, accuracy, Vague*)
- (*Phenomenon#1, Time Location, Time Location#1*)

Deuxième message

- (*Phenomenon#2, name, Fire*)
- (*Phenomenon#2, Space Location, Location#2*)
- (*Phenomenon#2, Involved, Vehicle#2*)
- (*Vehicle#2, type, Train*)
- (*Location#2, accuracy, Accurate*)
- (*Phenomenon#2, Time Location, Time Location#2*)
- (*Vehicle#2, Passengers, SetOfPeople#1*)

3.3 Étude de cas : Collision entre un camion citerne et un train de voyageurs

- *(Phenomenon, Involved, SetOfPeople#1)*

Troisième message

- *(Phenomenon#1, Interrogation, Strong)*
- *(Phenomenon#2, Interrogation, Strong)*

Quatrième message

- *(Vehicle#2, is, Vehicle#1)*
- *(Phenomenon#3, name, Collision)*
- *(Phenomenon#3, Involved, Vehicle#3)*
- *(Phenomenon#3, Involved, Vehicle#1)*
- *(Vehicle#3, type, Truck)*
- *(Vehicle#3, cargo, Cargo#1)*
- *(Cargo#1, danger, Fire)*
- *(SetOfPeople#1, Wounds, SetOfWounds#1)*

3.3.3 Déroulement

Augmentation des messages

Les traits sémantiques suivants ont été ajoutés par les agents d'augmentation.

| Message 1 | Message 2 |
|---|---|
| (Communication#1, Hierarchy Level, High) (Fire#1, Space Location, Location#1) (Fire#1, Involved, Vehicle#1) (Plan#1,name, Red plan) | (Communication#1, Hierarchy Level, High) (Explosion#2, Space Location, Location#2) (Explosion#2, Involved, Vehicle#2) (Explosion#2, Involved, SetOfPeople#1) (Plan#1,name, Red plan) |

| Message 3 | Message 4 |
|--|--|
| (Communication#1, Hierarchy Level, High) | (Communication#1, Hierarchy Level, High) (Cargo#1, danger, Explosion) (Plan#1,name, Red plan) |

Tableau 2 : Augmentation des données communicationnelles.

Suivi de l'exécution du Scénario

En étudiant les agents aspectuels, on peut voir quels sont les sujets qui sont importants, lesquels ne le sont pas. On peut même voir le développement futur d'un aspect de la situation. Dans la Figure 28, l'agent sélectionné représente l'information sur la localisation de l'explosion. Nous sommes après le message 1, une explosion a bien été signalée dans le mais la localisation spatiale est vague. Donc l'agent, faute d'informations supplémentaires, périclité. Mais après le message 4, où l'explosion est confirmée et une autre explosion potentielle est signalée, par le jeu des proximités sémantiques l'agent finit par être suprême (Figure 29).

On peut voir dans la Figure 30 et suivantes une représentation de caractéristiques morphologiques du paysage d'agents aspectuels (3.2.2).

Les graphes se lisent comme suit : en abscisse se situe la valeur de la caractéristique (suprématie, vitesse, facilité) et en ordonnée le nombre d'agents aspectuels dont la caractéristique est autour de cette valeur. Les pics représentent donc un groupe d'agents aspectuels dont la valeur de la caractéristique concernée se situe aux alentours du sommet du pic. Plus un pic représente un nombre important d'agents, plus sa base s'élargit. Tout agent aspectuel dont la valeur de la caractéristique tomberait dans l'intervalle représenté par la base du pic est agrégé dans le pic. De même, si la valeur de la caractéristique sort de l'intervalle de la base du pic, l'agent aspectuel est libéré. On obtient ainsi une représentation dynamique de l'ensemble des valeurs des caractéristiques des agents aspectuels. L'aspect dentelé des pics de la Figure 30 est dû aux conflits engendrés par le chevauchement des bases des pics.

3.3 Étude de cas : Collision entre un camion citerne et un train de voyageurs

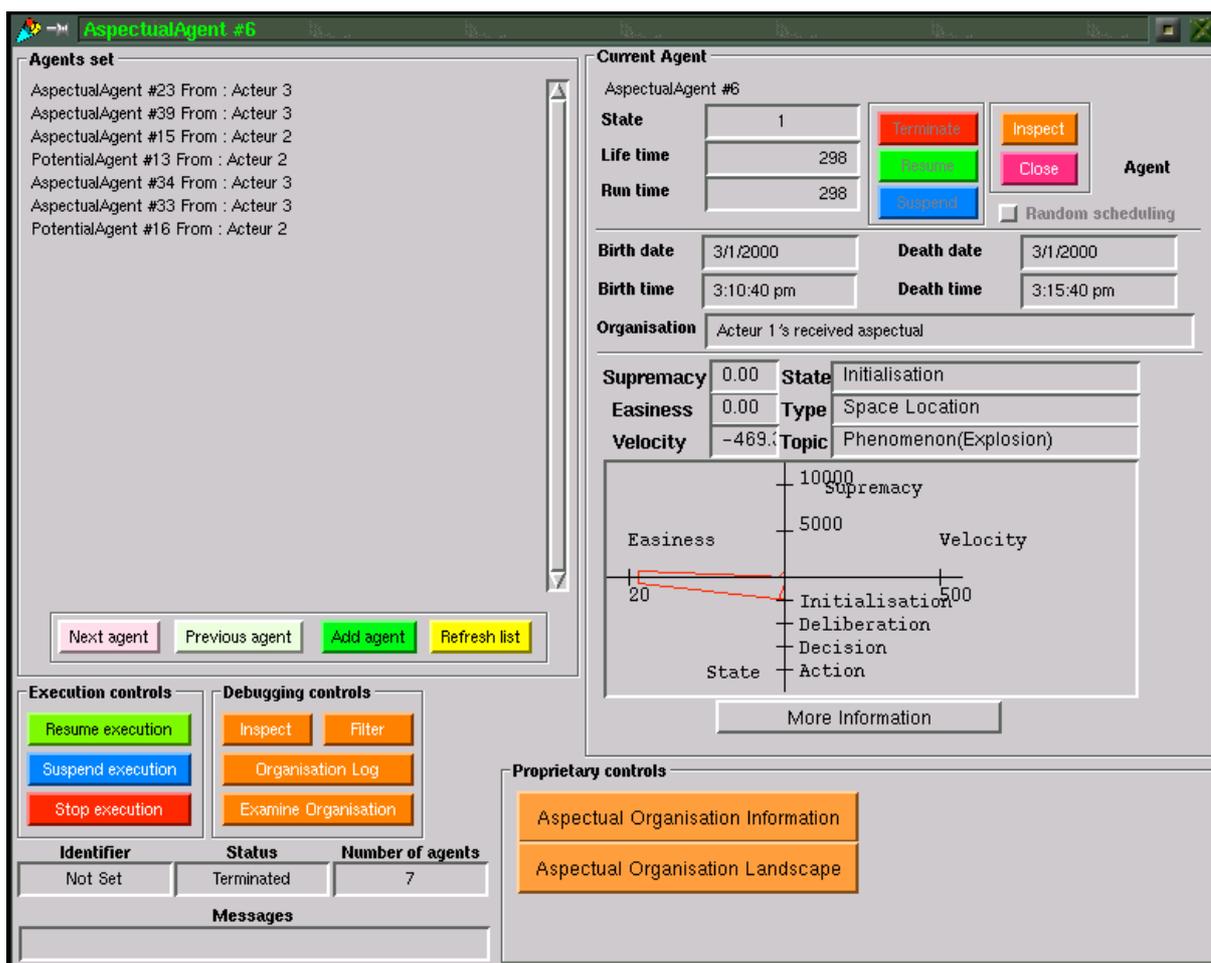


Figure 28 : Agent en perdition (suprématie nulle, vélocité négative)

La suprématie peut varier de 0 à 10000. La Figure 30 montre qu'au moment de la capture il y avait deux petits groupes d'agents aspectuels (deux pics) qui représentent une certaine importance dans le discours. La vélocité peut, elle, varier de -500 à $+500$. Quant à la facilité, elle varie dans un intervalle de -20 à $+20$. La Figure 32 et la Figure 31 montrent qu'une grande majorité d'agents aspectuels ont une facilité et une vélocité proche de 0. Cela signifie que l'organisation est stable : il n'y a que peu d'évolution. Cette situation correspond au temps d'attente entre le message 3 et le message 4 où par manque d'information, le Préfet ne peut pas prendre de décision.

Chapitre 3
 changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

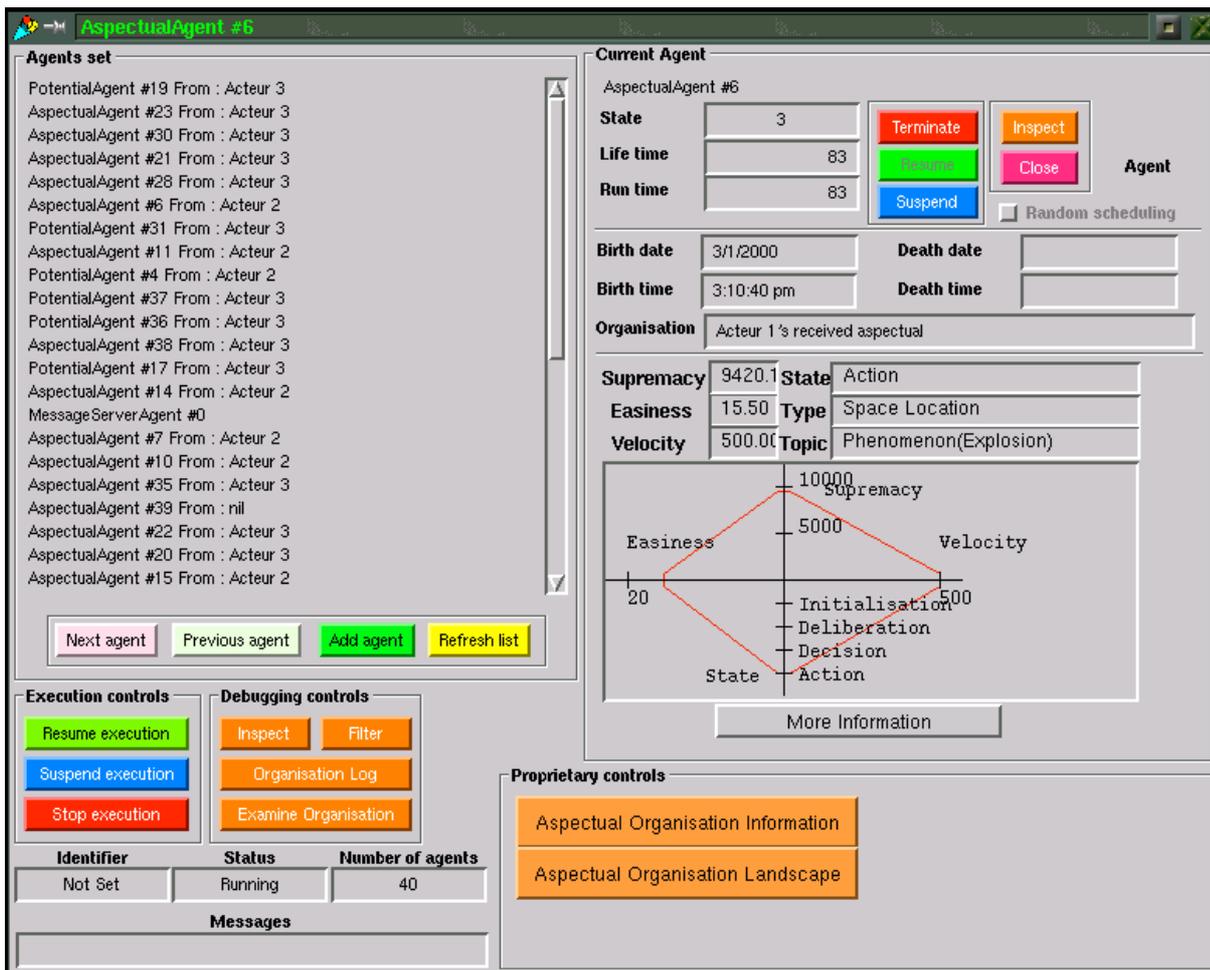


Figure 29 : L'agent aspectuel est suprême

Sur les quatre messages, les points de vue des acteurs sur la situation ne sont pas très clairs. Cependant les informations communiquées sont replacées dans leur contexte d'émission et de réception comme le montrent la Figure 33 et la Figure 34.

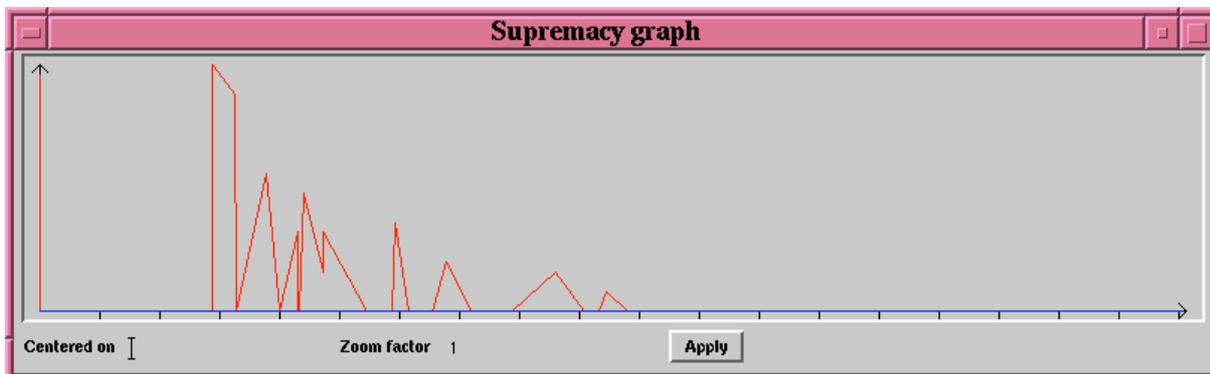


Figure 30 : Graphe morphologique de suprématie

3.3 Étude de cas : Collision entre un camion citerne et un train de voyageurs

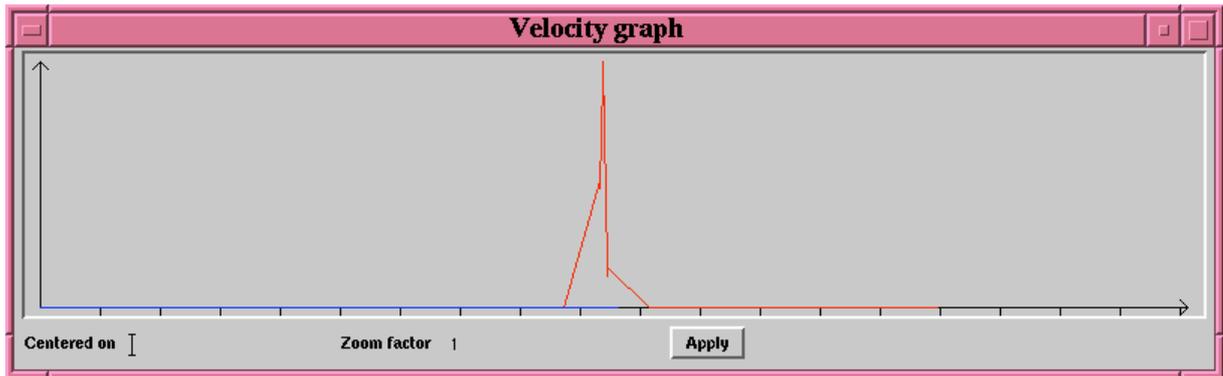


Figure 31 : Graphe morphologique de vitesse

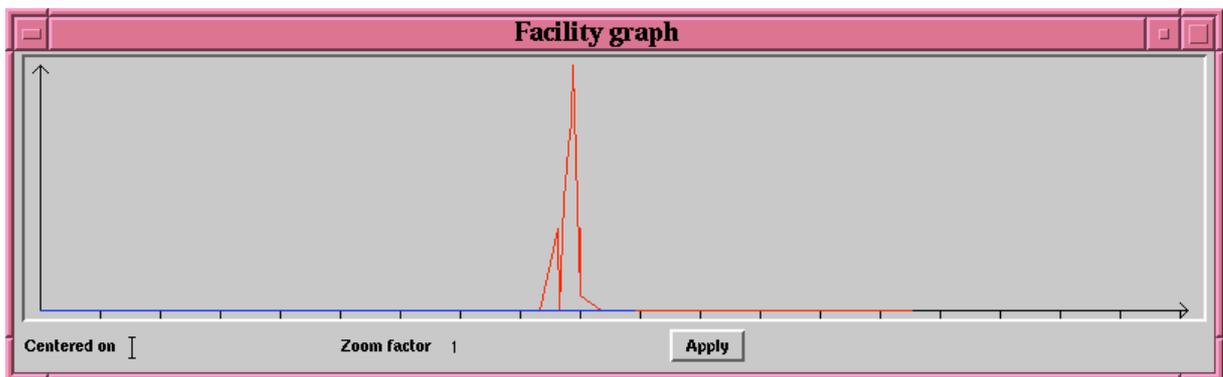


Figure 32 : Graphe morphologique de facilité

La Figure 33 montre l'historique de l'agent généré par l'acteur 2 dans l'organisation de l'acteur 1 lors de l'émission du trait sémantique concernant le fait qu'un train soit impliqué dans une explosion. On voit que rapidement l'agent devient suprême et le reste car l'acteur 3 en reparle dans son deuxième message, confortant ainsi l'agent. Il doit s'agir d'un fait important pour ces deux acteurs.

En revanche dans la Figure 34, l'agent se développe lentement et ne reste pas longtemps suprême, car l'acteur 2, émetteur de ce trait sémantique, ne reçoit aucune confirmation de la présence d'une explosion.

Chapitre 3 changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

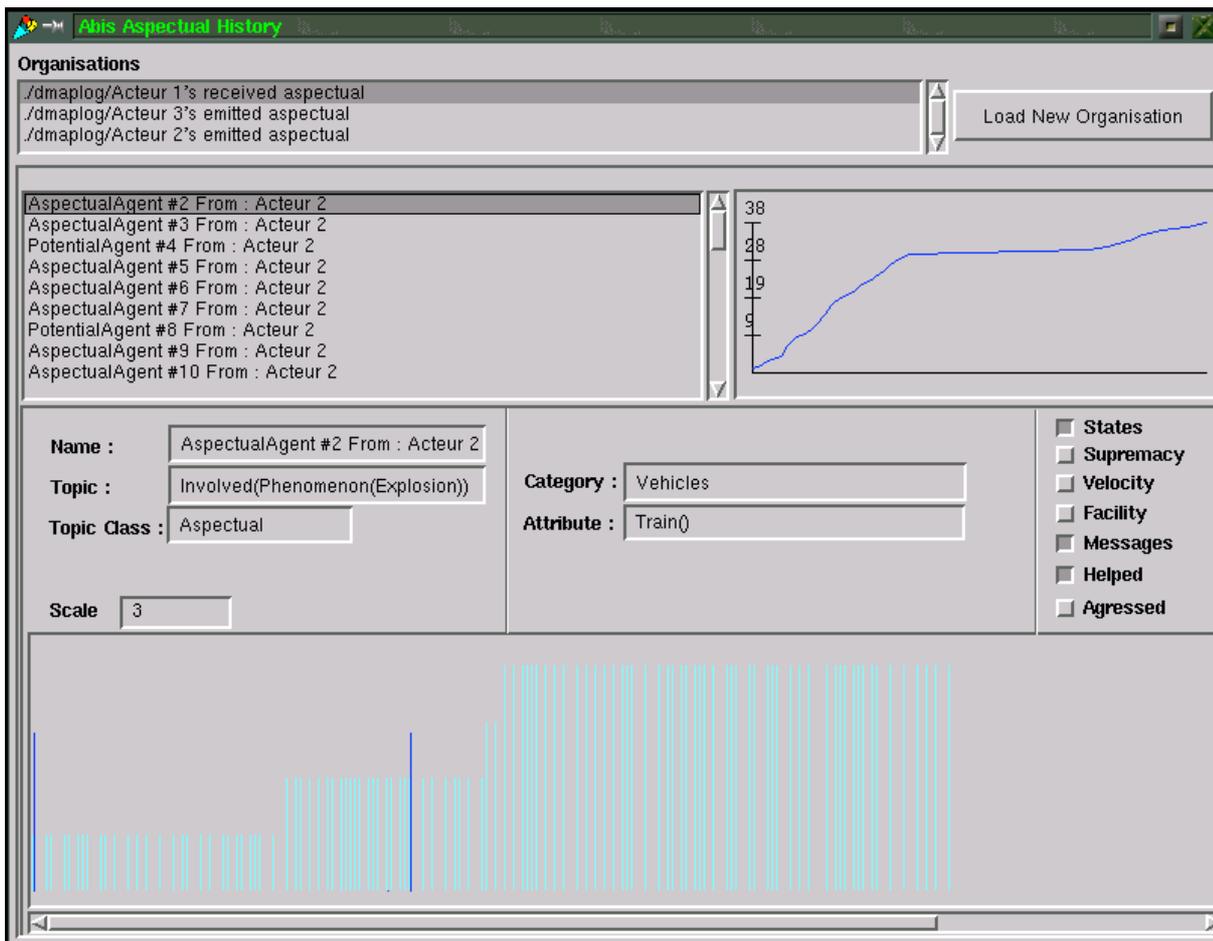


Figure 33 : Agent aspectuel reçus représentant l'implication d'un train dans une explosion.

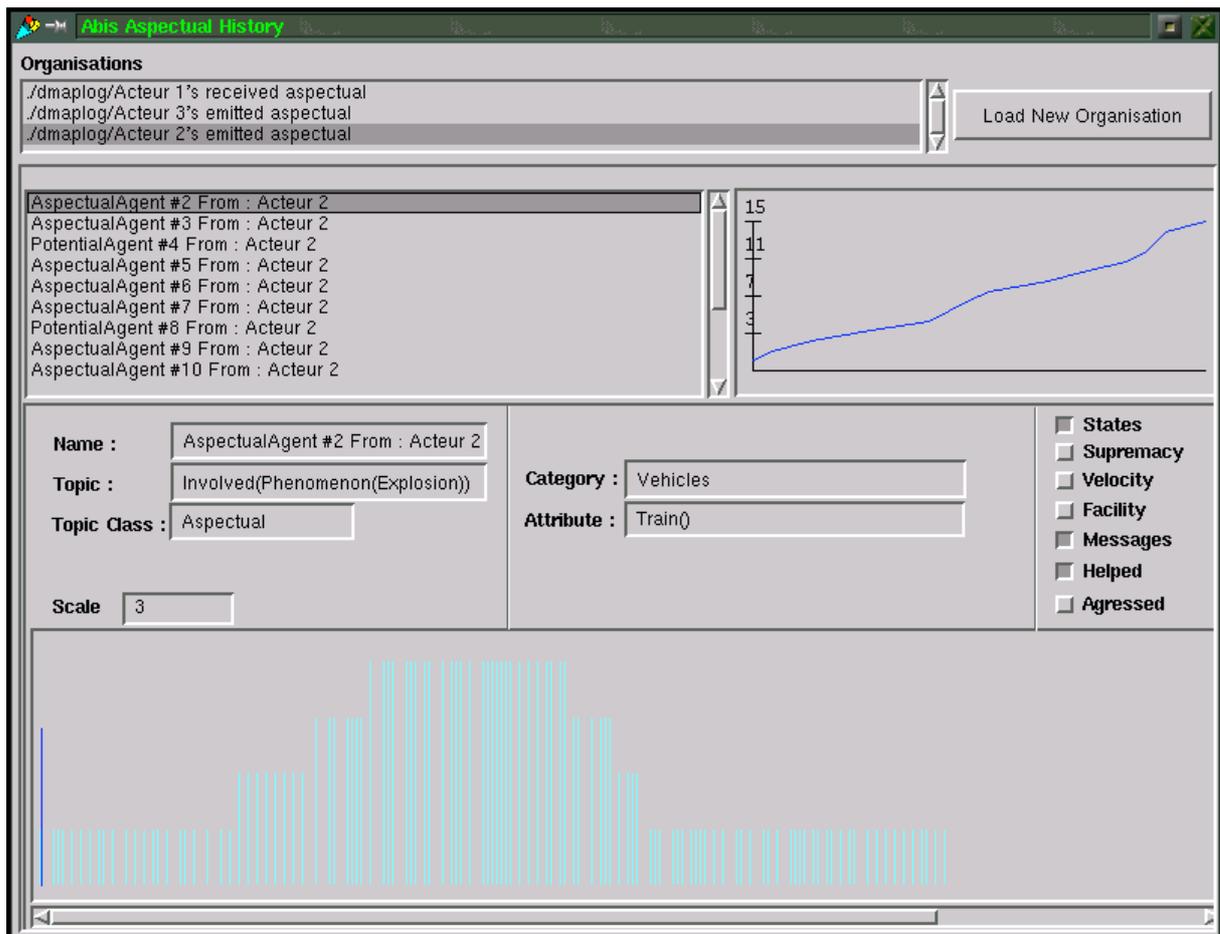


Figure 34 : Agent aspectuel émis représentant l'implication d'un train dans une explosion.

Le contexte de communication des deux acteurs 1 et 2 est différent, les agents de leurs organisations ne se comportent donc pas de la même manière. Nous illustrons ainsi qu'un trait sémantique aura des conséquences différentes sur des organisations d'agents distinctes.

3.4 Conclusion

ABIS permet une émergence dynamique du sens des messages échangés lors de communications dans un SIC.

Les décideurs utilisant le SIC envoient des messages sous forme de scripts. Ces messages sont augmentés localement à l'émetteur par une organisation d'agents aspectuels. Ils sont ensuite reçus par une organisation d'agents aspectuels locale au récepteur qu'ils modifient. Cette organisation change également au fur et à mesure que les agents qui la composent luttent, se renforcent ou s'affaiblissent.

La population de l'organisation aspectuelle est lue morphologiquement, c'est à dire qu'on s'attache à certaines structures émergentes au sein de l'organisation, liées à différentes caractéristiques des agents. Cette lecture est réalisée par une autre organisation d'agents.

Chapitre 3

changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC

Les traits saillants de cette lecture morphologique sont ensuite analysés localement par une troisième organisation d'agents, afin de comprendre ce qui a retenu l'attention des décideurs. On compare enfin ces points d'attention des différents décideurs afin de percevoir d'éventuels conflits ou des écarts entre les représentations qu'ils se font de la situation.

On voit bien là trois niveaux de descriptions différents, à base de règles, en liaison dynamique ou in medias res, chacun reflétant différents aspects d'une même situation.

CHAPITRE 4

ECOSYSTÈME ESTUARIEN

Résumé

Ce chapitre est une description ontologique de notre deuxième application, la simulation d'écosystèmes estuariens. Nous y décrivons tout d'abord l'histoire des principales notions épistémologiques de l'écologie, avant de mettre en évidence l'importance des flux de matières et d'énergie dans la modélisation d'écosystèmes, a fortiori aquatiques. Nous expliquons alors que nous avons concentré nos efforts sur la modélisation de l'écoulement liquide, et présentons un état de l'art des modèles hydrodynamiques courants. Nous concluons sur le modèle retenu, qui sera au contraire de ses collègues décrit en détail au chapitre suivant.

4.1 Notion d'écosystème

4.1.1 De l'écologie aux écosystèmes

Le XVIIIème siècle vit un développement fort des grands voyages d'exploration à buts scientifiques. Ces expéditions étaient également bien sûr à buts économiques : on pouvait vendre les découvertes par exemple végétales qu'on faisait, on pensera par exemple aux betteraves ou à la pomme de terre.

Au cours de ces voyages se développa la discipline de la géographie végétale. On s'intéressait en effet aux paysages végétaux qui sont révélateurs des conditions qui ont justement présidé à la création de ces formes. On peut citer Alexandre de Humboldt et son *Essai sur la géographie des plantes (1805)* comme fondateur de ce courant de pensée, en remarquant notamment que des facteurs physiques, climatiques entre autres, guident la répartition des végétaux.

Plus tard, Augustin-Pyramus de Candolle puis son fils Alphonse remarqueront qu'il faut considérer tous les facteurs simultanément et non séparément : « Nous devons examiner ici l'influence de la température, de la lumière, de l'eau, du sol et de l'atmosphère, et ne pas perdre de vue que, quoique pour la clarté de l'exposition nous devions les séparer, elles agissent cependant presque toutes à la fois ». Nous verrons par la suite que ce lien des facteurs est encore tout à fait d'actualité puisqu'il est au cœur de la notion d'écosystème et des difficultés de leur simulation. Alphonse de Candolle fondera en conséquence son analyse sur le mode de vie des espèces plus que sur leur répartition géographique : on se rapproche de l'écologie.

Le mot «écologie» est créé en 1866 par le biologiste allemand Ernst Haeckel (1834-1919). Il vient du mot indo-européen *weik* qui désigne une unité sociale supérieure à la famille, et qui a donné le grec *oikos* désignant le foyer, et du suffixe *logie*, science. Il en donnera plusieurs définitions au cours de sa carrière. On pourra retenir celle qu'il donne dans son ouvrage le plus célèbre, *Generelle Morphologie der Organismen* : « Par oekologie, nous entendons la totalité de la science des relations de l'organisme avec l'environnement, comprenant au sens large, toutes les conditions d'existence ». Ce sont ces relations centrales à la notion de système (1.6.3) qui nous intéresseront par la suite.

Si Haeckel a inventé le mot, les notions fondamentales et la séparation définitives d'avec la géographie sont plutôt attribuées à Eugenius Warming, qui distingue dans *Lehrbuch der ökologischen Pflanzengeographie* géobotanique traditionnelle et écologique, le but de cette dernière étant de comprendre « comment les plantes et les communautés végétales ajustent leurs formes et leurs comportements aux facteurs effectivement agissants, tels que la quantité de chaleur, de lumière, de nourriture et d'eau qui se trouvent disponibles »

En Europe à cette époque on a une conception statique de l'écologie, on perçoit la végétation comme un ensemble statique, on ne s'intéresse pas à son déploiement dans le temps. L'écologie américaine est elle plus intéressée par une approche dynamique. Comme l'explique Henry C. Cowles dans sa thèse de doctorat ([Cow 98]²³) : « Le domaine de l'écologie est la considération des relations mutuelles entre les plantes et leur environnement. Une telle étude est à la botanique structurale ce que la géologie dynamique est à la géologie structurale (...) L'écologue doit donc étudier l'ordre des successions des sociétés végétales

²³ 1898 ...

Chapitre 4 Ecosystème estuarien

dans le développement d'une région et entreprendre de découvrir les lois qui président aux changements généraux. L'écologie, par conséquent, étudie des dynamiques ».

Naît alors en 1897 avec Frederic Edward Clement un courant de pensée très intéressant pour l'approche que nous comptons nous-même adopter : l'organicisme. Comme il l'écrit dans le *Nebraska botanical survey* : « La végétation manifeste certains phénomènes qui sont l'expression caractéristique des forces qui la fondent (...) Cette conception sera plus intelligible si l'on considère la végétation comme une entité, dont les changements et les structures sont en accord avec certains principes de base, tout à fait comme les fonctions et les structures des plantes correspondent à des lois définies ». Un entomologiste américain, Stephen Alfred Forbes développe l'idée d'une autonomie relative des communautés structurées par des chaînes alimentaires. L'organicisme est la thèse de l'école dite de Chicago. On retiendra cette citation bien adaptée à ce que nous essayons de faire d'un de ses membres, le biocénocien américain Victor Shelford : « il convient de comparer le biome (formation biotique) à un organisme amiboïde, une unité de parties, croissant, se déplaçant et manifestant des processus internes qui se peuvent comparer au métabolisme, à la locomotion, etc., d'un organisme ».

Mais l'organicisme n'avait pas que des supporters. Le botaniste anglais Tansley s'opposait à cette conception, qui lui semblait laisser de côté une part importante des entités à analyser [Tan 35] : « But the more fundamental conception is, as it seems to me, the whole system (in the sense of physics), including not only the organism-complex, but also the whole complex of physical factors forming what we call the environment of the biome - the habitat factors in the widest sense. It is the systems so formed which, from the point of view of the ecologist, are the basic units of nature on the face of the earth. These ecosystems as we may call them are the most various kinds of sizes. They form one category of the multitudinous physical systems of the universe, which range from the universe as a whole down to the atom. ».

Comme pour l'écologie, si Tansley a forgé le mot écosystème, il ne fut pas seul inventeur de la discipline. Parmi ses grands contributeurs on peut compter l'américain G.E. Hutchinson et ses élèves, Raymond Lindeman et les frères Odum.

Lindeman écrit en 1941, un an avant de mourir pendant la deuxième guerre, un texte qui pose les fondements de la théorie des écosystèmes (*The trophic-dynamic aspect of ecology* ([Lin 42]) : « Les analyses des cycles de relations trophiques indiquent qu'une communauté biotique ne peut être clairement différenciée de son environnement abiotique : l'écosystème doit donc être considéré comme l'unité écologique la plus fondamentale ».

Ce sont ses collègues les frères Odum qui mettront en avant les liens entre la théorie des écosystèmes et la thermodynamique [Odu 53]. Shrödinger [Shr 44] affirmait que contrairement aux systèmes non vivants qui tendent vers un état permanent où l'on n'observe plus aucun événement, les êtres vivants en mangeant, buvant, respirant et (dans le cas des plantes) en assimilant, peuvent éviter l'évolution rapide vers l'état d'entropie maximale qui est celui de leur mort. On a par ailleurs vu dans 1.6.3 que c'est cette distinction qui avait motivé les travaux initiaux de Von Bertalanffy. Les frères Odum expliquent dans *Fundamentals of ecology* que les écosystèmes possèdent cette même caractéristique : « Les organismes vivants, les écosystèmes et la biosphère toute entière possèdent la caractéristique thermodynamique

essentielle d'être capables de créer et de maintenir un état élevé d'ordre interne, ou de basse entropie ». Ce rattachement à la thermodynamique, science physique donc plus « noble », marquera la fin de l'organicisme et du vitalisme dont il faisait preuve. Rappelons pour conclure que Eugene Odum a été d'une grande influence sur le développement de l'écologie systémique, et que *Fundamentals of ecology* a été le seul manuel universitaire de la discipline pendant dix ans. Il avait une approche holiste de l'écologie proche de la systémique, qui fut son évolution naturelle [Fro 98]

4.1.2 *Des écosystèmes vus comme des systèmes ouverts holarchiques et auto-organisés*

L'évolution de l'écologie a donc consisté en une accumulation de connaissances commencée il y a deux siècles, puis progressivement à une structuration de celles-ci en des modèles plutôt mathématiques (première moitié du siècle dernier) puis plus holistes (deuxième moitié) menant à des modèles plus à base de règles. Ce sont de grandes tendances : la modélisation écologique à base de lois est toujours en développement, et Pierre François Verhulst écrivait l'évolution logistique de population longtemps avant cela (1838). Néanmoins, les progrès de l'informatique ont permis un meilleur développement des modèles individus-centrés au cours des trente dernières années (voir 1.5.1 ou l'introduction de [Bau 04] pour une description de l'histoire, des forces et des faiblesses de ces approches).

Notre volonté n'est pas de privilégier l'une ou l'autre de ces approches, mais d'essayer de les faire fonctionner de concert dans un méta-modèle computable. Nous nous appuyons pour ce faire sur le formalisme des SOHO décrit au 1.6.4. Chacune des propriétés du formalisme est importante, justifions-les une par une.

4.1.3 *Propriétés SOHO des écosystèmes*

Dans notre modèle abstrait, les écosystèmes sont des systèmes thermodynamiques ouverts. Même s'ils ne se réduisent pas à cela, ils sont constitués de matière et d'énergie en interaction, et sont traversés par des flux de ces mêmes constituants de provenance non seulement interne mais également externe (on peut penser par exemple à l'influence très importante du rayonnement solaire en général dans la plupart de ces écosystèmes).

Un écosystème peut être décrit à des échelles et des niveaux d'organisations extrêmement divers, du niveau moléculaire au système terre-soleil. Ces différents niveaux ont une relative autonomie descriptive (ils sont distinguables par un observateur, il en existe des modèles), les entités qui les composent sont composées d'entités de niveaux inférieurs, et participent à des entités de niveaux supérieurs. Des entités d'un même niveau interagissent entre elles (ex. deux espèces de poissons, un prédateur et une proie), ainsi qu'avec ce qui les compose (le comportement d'un animal va lui permettre de se nourrir et d'alimenter ainsi en énergie les organes qui le font fonctionner), de même qu'avec celles qu'elles composent (un poisson dans un banc effrayé par un prédateur fuira sur quelques longueurs, entraînant un déplacement du banc, dont l'inertie globale modifiera la trajectoire et l'élan du poisson fuyant initialement). Les entités ainsi décrites sont donc des holons (1.6.4).

Chapitre 4 Ecosystème estuarien

De plus, les connaissances que l'on a sur les écosystèmes sont délimités géographiquement, ont une sorte d'unité spatiale (voir par exemple la Figure 35). Qu'on la voit sous l'angle de l'analyse compartimentale [Che 83] ou comme un biome (Un biome (ou aire biotique) est un ensemble d'écosystèmes caractéristique d'une grande zone biogéographique et nommé à partir de la végétation et des espèces animales qui y prédominent et y sont adaptés, voir [Fro 98] pour plus de détails), ces entités présentant une forme d'homogénéité à un certain niveau de description se construisent assez naturellement comme des holons.

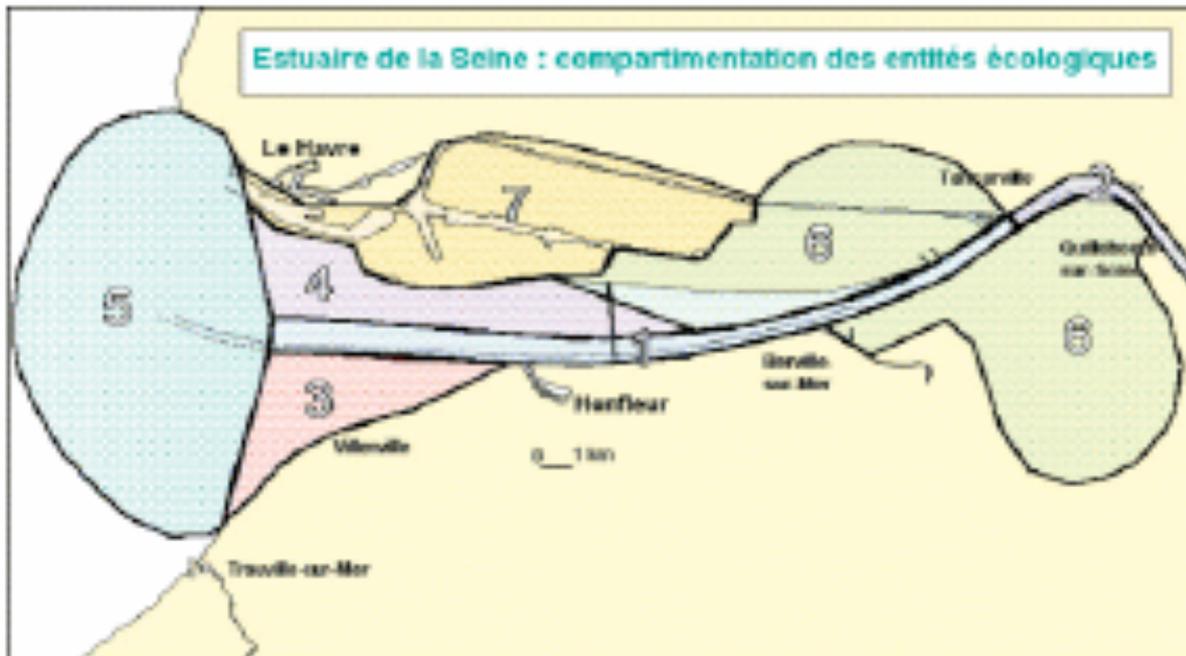


Figure 35 : Exemple de biomes sur l'estuaire de la Seine (d'après Seine Aval [Gue 99])

Nous voyons donc de manière générale les écosystèmes comme des systèmes ouverts et holarchiques. Plus précisément, les écosystèmes sont des systèmes ouverts dont « l'organisation » peut augmenter. Ce genre de système ouvert est appelé une structure dissipative dans le domaine initial de l'inorganique [Nic 77], on dit alors que son entropie n'augmente pas, voire baisse. On parle dans ce cas notamment d'auto-organisation²⁴. Les êtres vivants sont maintenant également décrits comme des structures dissipatives [Pri 85], de même donc que les écosystèmes [Jor 00].

Notre squelette de modèle d'écosystème est donc un système SOHO.

²⁴ Comme d'autres dans ce domaine (on peut penser à « émergence »), auto-organisation est un mot aux multiples acceptions. On pourra lire <http://en.wikipedia.org/wiki/Self-organization> pour une présentation sommaire de celles-ci dans différents domaines des sciences.

4.2 Spécificités de l'estuaire

4.2.1 Incarnation des propriétés

Les écosystèmes sont nombreux et variés, avec chacun des spécificités. Nous nous intéressons un peu plus précisément à l'estuaire de la Seine. Celui-ci est défini géographiquement comme allant du barrage de Pose jusqu'à la Manche (cf. Figure 35).

Il est holarchique (on pourrait même parler d'écosystèmes en toute justesse) et auto-organisé, comme tout écosystème, ainsi que très anthropomorphisé. Sa qualité de système ouvert par contre s'incarne d'une manière assez spécifique. De par sa nature en effet, l'écoulement du fleuve et la force des marées sont au cœur des flux de matière et d'énergie d'origine extérieurs à celui-ci. A ces flux s'ajoutent des polluants solubles ou transportés, à l'influence certaine sur la trajectoire de l'écosystème. C'est un des écosystèmes où les écoulements de fluides ont un rôle des plus primordiaux, même pour un écosystème aquatique.

4.2.2 Choix d'étude

Une partie importante de notre travail de thèse a donc porté sur une modélisation d'écoulements adaptée à la problématique de l'écosystème estuarien d'une part, et à nos compétences locales d'autre part. C'est en effet une thèse en informatique, et la question n'était bien sûr pas d'essayer de faire mieux que les mécaniciens ou les écologues séparément, mais d'essayer de voir ce que l'IA pouvait apporter à chacune de ces deux disciplines ainsi qu'à leur inter-relation sur ce problème précis.

Nous devons trouver un modèle d'écoulement adapté à l'écologie, c'est-à-dire à l'hétérogénéité et aux niveaux de description multiples. Examinons à présent quels modèles d'écoulement pourraient être retenus.

4.3 Principales méthodes hydrodynamiques

Simuler un écosystème suppose d'avoir modélisé les flux de matières et d'énergie qui le traversent (4.2.1). Dans un écosystème estuarien, ces flux sont pour beaucoup, ou ont comme support, des écoulements fluides. Nous nous sommes donc intéressés à la modélisation des écoulements fluides, dans l'objectif ultérieur de les intégrer dans une modélisation d'écosystèmes.

4.3.1 Les modèles utilisés en mécanique des fluides

Un fluide est système matériel composé de molécules qui ne présentent pas certains caractères d'organisation que présentent les solides. Aussi, pour modéliser un fluide faut-il partir d'au moins le niveau moléculaire : en deçà rien ne distingue une molécule de fluide d'une de solide. Partir de la dynamique moléculaire est donc une première idée, qui a d'ailleurs été exploitée au début des ordinateurs. Néanmoins le nombre extrêmement important de molécules dans le moindre verre d'eau rend cette approche computationnellement inabordable. Pour sortir de cette impasse, on considère qu'à une échelle suffisamment supérieure à celle des molécules, le fluide peut en pratique être considéré comme remplissant continûment tout l'espace. Ce changement d'échelle néglige alors le comportement détaillé de la structure et des processus moléculaires au profit d'un comportement moyen. C'est le point

Chapitre 4 Ecosystème estuarien

de vue de l'hydrodynamique classique, qui vit le jour à la fin du XIX^{ème} siècle. Le fluide est alors décrit par des valeurs continues (pression, vitesse, température, etc.) qui vérifient certaines équations : c'est une approche à base de loi.

Ces lois décrivant la dynamique des fluides dépendent de certaines caractéristiques de l'écoulement de fluide qui se situent à un autre niveau d'échelle que celles des fluides eux-mêmes. En fait, les écoulements fluides peuvent être décrits grâce à des grandeurs sans unités, les nombres de Reynolds et de Mach, dépendant de la viscosité, la vitesse ou encore la largeur de l'écoulement, qui fixent leur comportement. Ainsi deux fluides, par exemple chimiquement très différents (qui se comportent donc au niveau moléculaire très différemment), auront une même dynamique si leur nombre de Reynolds et de Mach sont chacun égaux.

Les lois s'appliquant alors sont des équations différentielles non linéaires appelées équations de Navier Stokes, qui sont le reflet macroscopique de lois de conservation microscopiques d'une part (de masse ou d'énergie par exemple), et d'anisotropie newtonienne d'autre part. Malheureusement, ces équations ne peuvent généralement pas être résolues analytiquement, c'est-à-dire que leur solution ne s'exprime pas en combinant des fonctions mathématiques usuelles. On essaie alors une approche informatique où on essaie d'obtenir des valeurs numériques approchées des solutions.

D'un premier niveau de description discret on est donc passé à un continu, avant de devoir retourner à du discret, condition préalable à l'utilisation de l'informatique. Néanmoins bien sûr, on ne découpera pas notre modèle continu en molécules, on a vu que c'était vain. Voyons quels sont les découpages, les approches numériques possibles.

4.3.2 Maillages.

Les méthodes par maillage sont les plus répandues en hydrodynamique. Elles consistent en recouvrir l'espace de l'écoulement d'une grille, et de calculer les grandeurs physiques du fluide, la vitesse ou la pression par exemple, aux nœuds intersection des axes de la grille.

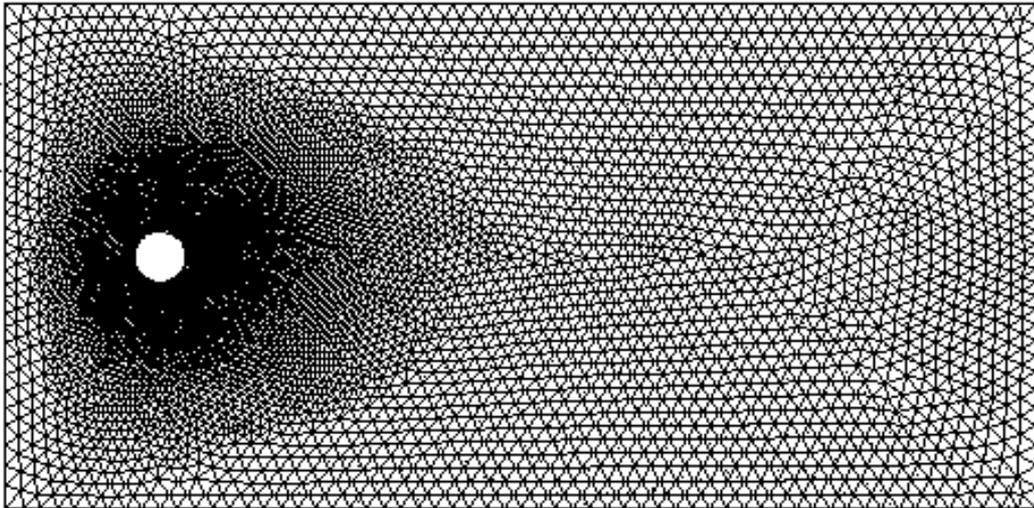


Figure 36 : Exemple de maillage²⁵

Or si on veut simuler directement les équations de Navier-Stokes (sans hypothèses rajoutées préliminaires), il faut que la finesse du maillage soit compatible avec le nombre de Reynolds du fluide : plus celui-ci sera élevé (grandes vitesses ou faible viscosité par exemple), plus le maillage devra être fin, car les valeurs hydrodynamiques varient alors beaucoup sur de courtes distances. Un maillage insuffisamment fin entraînera de la diffusion numérique, c'est-à-dire que les variations spatiales cinématiques fortes seront lissées sur les nœuds du maillage entourant celles-ci, puisque ces variations seront moyennées avec les grandeurs du reste du polygone délimité sur le maillage. Quand ces irrégularités spatiales s'additionnent dans le fluide réel pour donner des structures, celles-ci n'apparaîtront pas dans le maillage insuffisamment fin, ou si elles apparaissent comme irrégularités, elles diffusent artificiellement très rapidement et s'estompent. La Figure 37 montre bien ce problème : on distingue deux tourbillons derrière le cylindre avant que tout rentre dans l'ordre, à comparer avec les allées de Von Karman visualisées dans la nature (Figure 40) ou grâce à des dispositifs expérimentaux non intrusifs (Figure 41).

²⁵ Images venant de <http://joas.free.fr/karman/sommaire.htm>

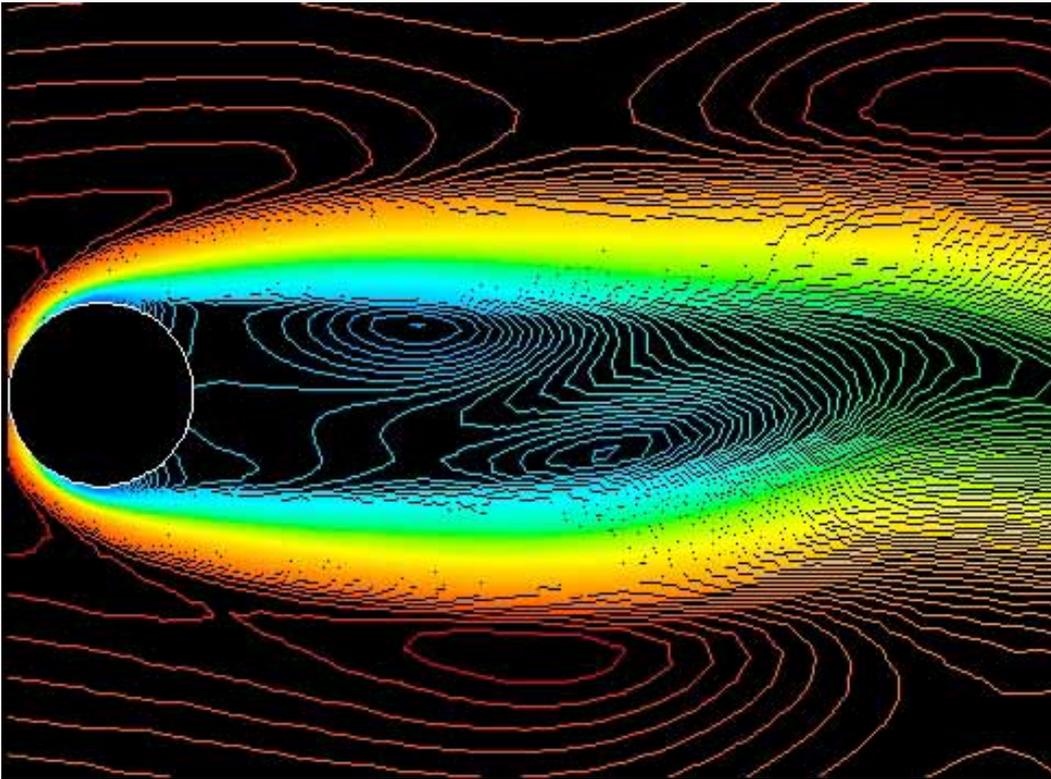


Figure 37 : Allées de Von Karman par maillage

On pourrait alors penser qu'il suffit de densifier le maillage là où il y en a besoin, comme cela est fait. Le problème est qu'alors plus le maillage est fin, plus les calculs à faire sont nombreux : un équilibre doit être trouvé entre justesse de la simulation et temps d'exécution de celle-ci.

4.3.3 Méthodes particulières

Dans le type de méthode que l'on a présenté au paragraphe précédent, on travaille en coordonnées eulériennes, les vitesses sont estimées, à chaque pas de temps, à des positions fixes qui correspondent aux nœuds du maillage. Les méthodes particulières s'appuient sur une discrétisation du domaine qui consiste à représenter l'écoulement par un ensemble de particules distinctes en interaction et en nombre fini [Leo 80]. Ces particules sont portées par l'écoulement qu'elles caractérisent : il s'agit alors d'une résolution lagrangienne. Ces méthodes présentent l'avantage de ne pas engendrer de diffusion numérique, comme cela peut se produire sur des méthodes de maillage. Même si dans les deux catégories de méthodes, il s'agit bien d'approcher des équations de comportement global de l'écoulement, à savoir les équations de Navier-Stokes, les méthodes particulières se traduisent finalement par une formulation centrée sur les individus - les particules fluides discrétisant le fluide - et sur leur interaction mutuelle.

C'est la méthode que nous avons finalement retenue, nous la développerons donc d'avantage au 5.2.

Remarquons que cette discrétion de la vorticité en N particules fait que les méthodes particulières appartiennent à la classe générale de problème des N corps, classe qui a des instances en dynamique moléculaire ou en interaction gravitationnelle. Ceci nous informe sur deux choses :

- La complexité algorithmique de la résolution sera en $O(N^2)$,
- et il existe une classe de méthodes heuristiques, dites méthodes (multip les) rapides, qui ramènent cette complexité à $O(N\log N)$.

Comment ces méthodes rapides fonctionnent-elles ? L'influence des particules les unes sur les autres dans cette classe de problème est inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. L'influence des particules proches sera donc plus grande que celle des lointaines. La méthode rapide moyennera les valeurs d'influence des particules situ es au-delà d'une certaine distance limite, et gardera le plein détails de celles de celles situ es en deçà.

Nous n'utiliserons pas directement ces méthodes, notre travail consistant notamment à leur trouver une alternative dans l'approche multiagente. Néanmoins, certains outils que nous avons développés (5.5.1) ont une certaine ressemblance avec la manière dont elles sont habituellement impl ment es.

4.3.4 Méthodes des gaz sur r seaux²⁶

La discrétisation consiste en une simplification du modèle continu tentant d'en garder les propriétés fondamentales qui en font la moelle.

Les modèles par réseaux s'inspirent de la réalité moléculaire sous-jacente au modèle continu, en ajoutant comme hypothèse qu'il n'est peut-être pas nécessaire de garder le nombre et les degrés de libertés des molécules pour que l'ensemble se comporte à un niveau macroscopique comme un fluide. Simplifions ce qui peut l'être pour ne garder que l'essentiel. Au passage, pensons directement que le modèle est destiné à être simulé sur un ordinateur et construisons un modèle adapté à l'informatique.

Le principe est ici d'utiliser un automate cellulaire. Le premier modèle date de 1973 et fut introduit par Hardy, de Pazzis et Pomeau (d'où son appellation de "modèle HPP"),

Le modèle HPP est basé sur un réseau en deux dimensions à symétrie carr e, dont les nœuds sont les seules positions accessibles aux particules du "gaz". L'espace est donc discrétisé et, en pratique, il est fini. Les conditions aux bords peuvent être choisies périodiques, ou bien, suivant les besoins, on peut choisir des parois infiniment lourdes sur lesquelles les particules subissent des chocs élastiques (des conditions de soufflerie sont aussi très simples à imposer). De plus dans ce monde fictif, les impulsions sont elles aussi distribu es de manière discrète, et même *très* discrète : toutes les particules ont la même masse (choisie unitaire) et le même module de vitesse. Ce module de vitesse unique est aussi choisi unitaire, la distance couverte sur un pas de temps sera celle qui sépare deux nœuds premiers voisins; le temps, notons-le, est donc lui aussi une grandeur discrète. De plus, on impose un principe d'exclusion : il ne sera pas possible à deux particules se propageant dans la même direction de se trouver sur le

²⁶ [Boo 93] et <http://poseidon.ulb.ac.be>

même nœud simultanément. Ainsi, il ne peut y avoir au plus que quatre particules sur un nœud donné; l'état d'occupation de celui-ci pourra donc être décrit par un mot de quatre *bits*.

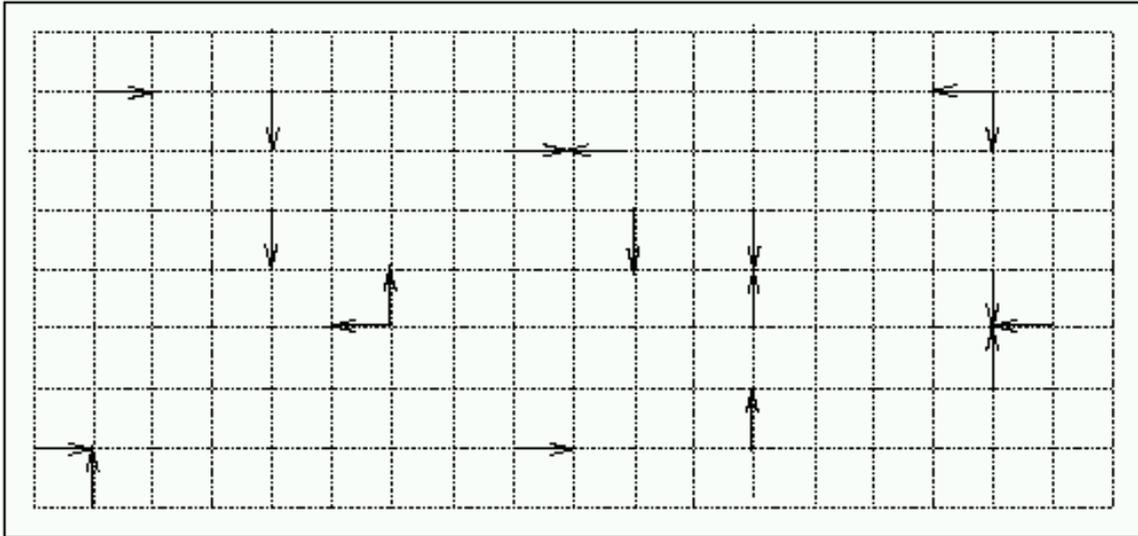


Figure 38 : Exemple de modèle HPP

Les interactions entre particules sont simples : il ne peut y en avoir qu'entre particules se trouvant sur le même nœud, sous forme de collisions locales et instantanées. Les règles qui gouvernent ces collisions sont telles qu'elles conservent le nombre de particules – donc la masse – et l'impulsion.

L'évolution du système d'un pas de temps à l'autre se fait en deux étapes successives, l'une de propagation, au cours de laquelle les particules se meuvent dans la direction de leur vecteur d'impulsion jusqu'au nœud immédiatement voisin, l'autre d'interaction, pendant laquelle les particules ont la possibilité d'échanger de l'impulsion, si la configuration du nœud le permet.

Comme on s'en est rapidement aperçu, les applications du modèle HPP sont toutefois assez limitées. Le réseau sous-jacent n'ayant un groupe de symétrie que d'ordre quatre, les équations de Navier-Stokes qu'il engendre contiennent des termes dissipatifs anisotropes : sa viscosité n'est pas conforme à celle d'un nombre réel. Un réseau carré n'admet pas assez d'axes de symétries comparé à un fluide réel.

Ainsi naquit le modèle FHP (construit par Frisch, Hasslacher et Pomeau) vers le milieu des années 1980. L'idée de base est la même que celle exploitée sur le réseau HPP, mais un réseau dont le groupe de symétrie est d'ordre six offre une plus grande richesse. Tout d'abord les équations macroscopiques du gaz FHP sont conformes aux équations de Navier-Stokes engendrées par un milieu continu, ce qui permet la simulation de l'hydrodynamique, que se soit en régime laminaire ou moyennement turbulent, dans des conditions que l'on contrôle bien. D'autre part, le nombre de collisions efficaces possibles pour le gaz FHP est bien plus grand que pour le gaz de type HPP.

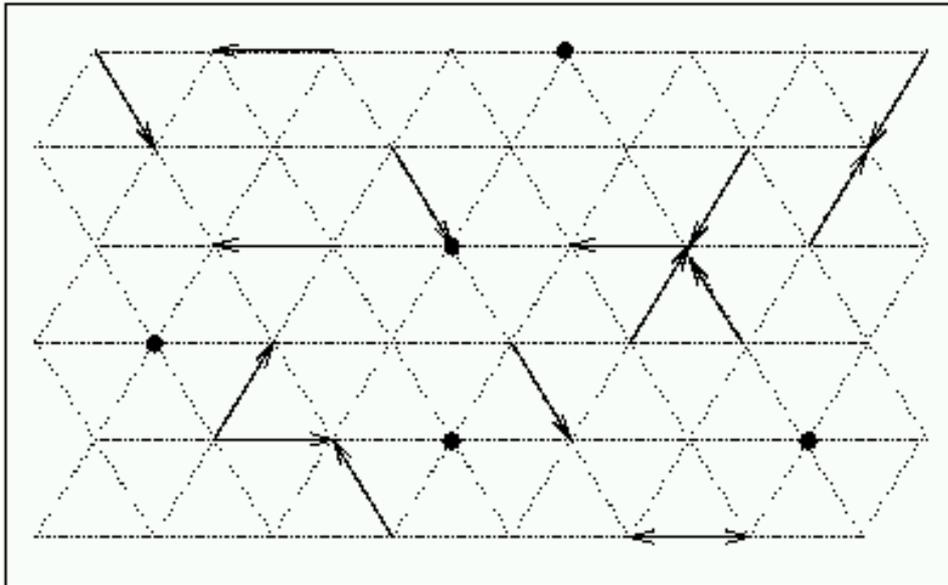


Figure 39 : Exemple de modèle FHP

Le modèle par maillage est le plus répandu des modèles d'hydrodynamique. Chaque description d'un modèle alternatif en contient donc une critique. Il est donc relativement facile de trouver les limites des méthodes à maillage. C'est plus ardu pour les autres modèles : les articles les présentant insistent plus sur leurs qualités que sur leurs défauts. Il semblerait néanmoins²⁷ que les limites des méthodes par réseaux soient une nécessité pour les écoulements fluides étudiés d'avoir un nombre de Reynolds faible, c'est-à-dire d'être très visqueux ou « lents » (subsoniques). On peut également remarquer la très grande rigidité de ce maillage qui contraint donc la dynamique : à comparer avec un maillage adaptatif tel que celui décrit Figure 36.

Une prolongation de ces travaux qui a pris beaucoup d'ampleur est la modélisation d'écoulements fluides sur réseaux Boltzmann (Lattice Boltzmann), qui lissent le bruit généré par un nombre trop élevé de particules en considérant des distributions de particules de différentes vitesses en chaque point du réseau, plutôt que des particules individuelles [Che 01]

4.3.5 Phénomène de turbulence et échelles de longueur

"When I meet God, I am going to ask him two questions: Why relativity? And why turbulence? I really believe he will have an answer for the first."

Werner Heisenberg

Un mouvement turbulent est généralement caractérisé avec la notion d'échelles de turbulence. On fait alors référence à différents types d'échelles : échelles de longueur, de vitesse, de temps [Cou 89].

L'échelle de longueur représente une taille caractéristique du mouvement. Elle n'est pas définie de manière unique et elle dépend ainsi de l'observation (de l'analyse) qui est faite du phénomène. Par exemple, dans les écoulements fluides réels le long des parois, une longueur qui sert souvent de référence est l'épaisseur de la couche limite, zone perturbée

²⁷ <http://d2set.free.fr/fr/projets/realisations/gazreseau.html>

Chapitre 4 Ecosystème estuarien

spécifiquement par la présence de cette paroi. D'autres références peuvent se dégager de la géométrie spécifique du phénomène traité ; Si l'on s'intéresse à la fumée qui s'échappe d'une cheminée, on pourra prendre comme échelle (référence) de longueur le diamètre de l'orifice de sortie. Ainsi, dans cet esprit de référence, on sous-entend que des expériences analogues avec cette même longueur de référence doivent générer des phénomènes analogues, sinon comparables ou encore analysables sur des hypothèses comportementales identiques. Finalement, on pourra dire que dans des écoulements fluides décrits par des compositions/interactions de formations tourbillonnaires, l'échelle de longueur de référence d'une de ces formations est celle du tourbillon associé.

Les écoulements fluides turbulents ne peuvent être caractérisés par un seul mouvement typique. Il existe en leur sein, toute une gamme de ces mouvements qui couvrent de nombreuses longueurs d'échelles, de quelques angstroms à 20 000 km pour la grande tache rouge de Jupiter [Mey 97]. Ces différents mouvements sont alors le résultat de la non-linéarité des équations qui régissent ces écoulements turbulents et la dynamique des tourbillons. On pourra finalement dire qu'un écoulement turbulent est fortement rotationnel mais surtout qu'il existe en son sein des fluctuations intenses du rotationnel conduisant à des formations de tourbillons sur une large gamme d'échelles.

On montre par expérimentation mais aussi par théorie que l'échelle de longueur des mouvements turbulents ne peut être infiniment petite. Elle s'adapte à la viscosité. Les grosses structures d'un écoulement turbulent transfèrent leur énergie cinétique (leur force de rotation) aux structures plus petites sans que la viscosité ne perturbe ce transfert. Pour les petites structures, la viscosité joue son rôle de dissipation d'énergie et transforme l'énergie cinétique en chaleur (phénomène de dissipation). Elles ne généreront pas de plus petites structures qu'elles ne peuvent alimenter en énergie cinétique. Le transfert d'échange cinétique des grosses structures permettant la création et l'alimentation des structures de plus faibles tailles sur plusieurs niveaux d'échelles est appelé *cascade d'énergie*, sa description est due à A.N. Kolmogorov. Ces cascades énergétiques assurent une capacité de mélange dans l'écoulement et elles ont pour conséquence, par exemple, le long d'une paroi, de simuler un épaississement de la couche limite. Dans ces cascades d'énergie, les plus petites échelles de structures existantes avant que n'apparaissent les phénomènes de dissipation, sont appelées *échelles de Kolmogorov*.

Par ailleurs, il est à noter que le modèle global équationnel du comportement dynamique d'un fluide, à savoir les équations de Navier-Stokes, reste valable sur tous les niveaux d'échelles de description, d'un écoulement océanographique au mouvement des particules élémentaires. Ce modèle est continûment différentiable d'une échelle à l'autre. On peut observer dans les Figure 40 et Figure 41 la même structure de turbulence sur des échelles extrêmement différentes.

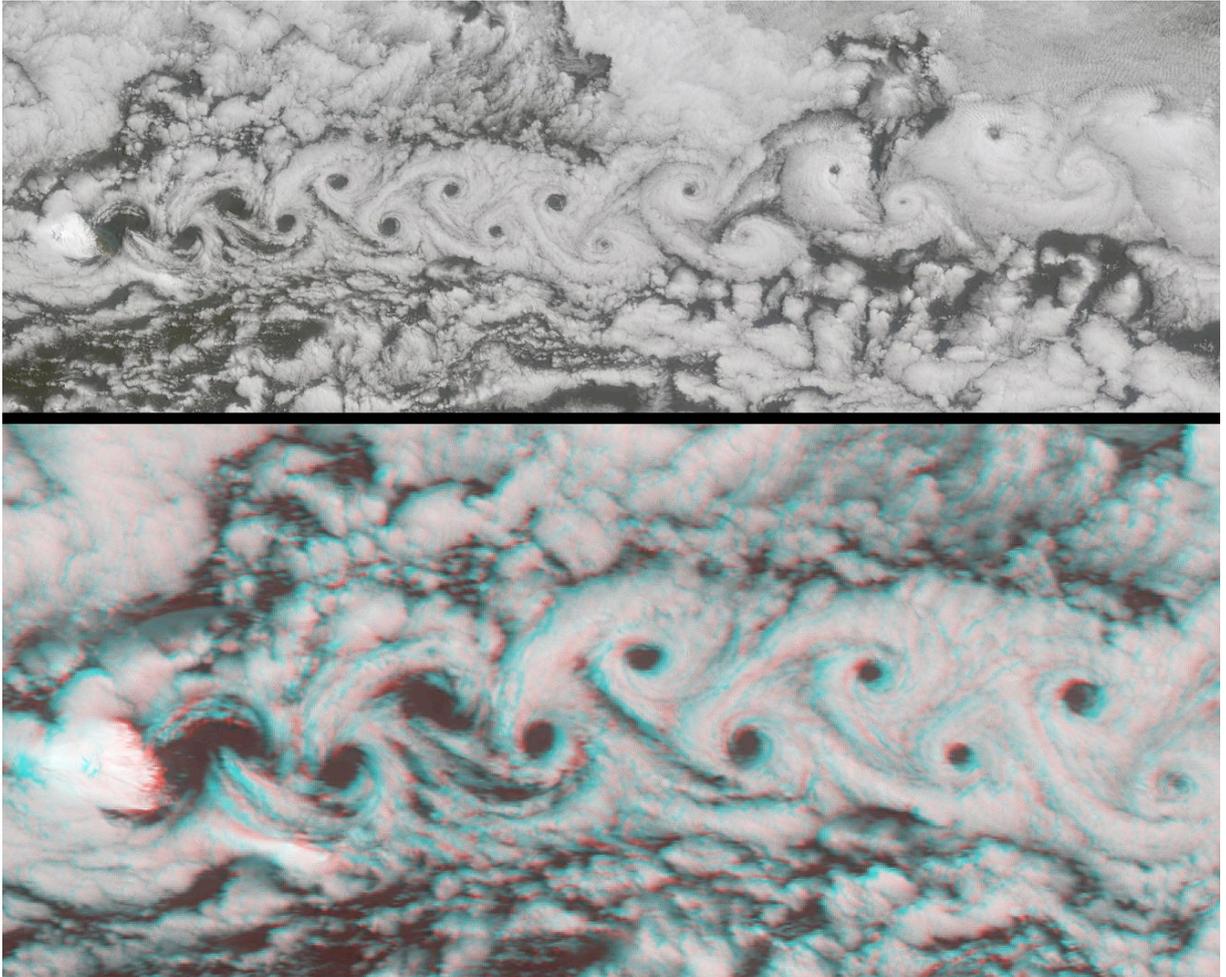


Figure 40 : Allées tourbillonnaires dites de Von Karman de nuages s'étendant sur 300 kilomètres au sud de l'île de Jan Mayen



Figure 41 : Allées tourbillonnaires de Von Karman derrière un cylindre en laboratoire²⁸.

²⁸ “So moving water strives to maintain the course pursuant to the power which occasions it and, if it finds an obstacle in its path, completes the span of the course it has commenced by a circular and revolving movement” Léonard de Vinci, d’après John Lumley



Figure 42 : Allées de Von Karman d'après Léonard de Vinci (circa 1510)

Il n'en reste pas moins vrai que toute résolution analytique est inabordable et que seules des résolutions approchées, notamment sous des formulations discrètes, sont accessibles et peuvent fournir des informations quantitatives. De telles résolutions de formulations discrètes ne peuvent être obtenues de manière directe sans qu'elles génèrent elles-mêmes des dissipations qui sont alors de nature artificielle, qualifiées de numériques. Elles sont caractéristiques du pas de la grille de résolution, échelle de longueur incontournable mais non reliée à une réalité que l'on décrit. La modélisation et la simulation numérique de la turbulence sont pour cette raison, un défi intellectuel qui a mobilisé nombre de scientifiques depuis plusieurs décennies [Les 87]. Une approche numérique reste malgré sa difficile mise en œuvre, d'un intérêt fondamental pour l'étude des phénomènes turbulents du fait que des mesures expérimentales sont encore plus difficiles à mettre en œuvre car tout dispositif expérimental est intrusif dans le phénomène observé et le dénature dans son essence même. Seul des mesures de type optique, la vélocimétrie doppler laser par exemple, sont à même de ne perturber que légèrement l'écoulement observé, bien que les incidences au niveau de l'énergie calorifique puisse éventuellement remettre en cause les effets à petites échelles.

4.3.6 Méthodes de type Large Eddy Simulation (LES)

Nota il moto del livello dell'acqua, il quale fa a uso de' capelli, che àno due moti, de' quali l'uno attende al peso del vello, l'altro al liniamento delle volte; così l'acqua à le sue volte

*revertiginose, delle quali una parte attende al impeto del corso principale, l'altra attende al moto incidente e riflesso*²⁹.

Leonardo da Vinci (ca.1510)

Malheureusement, la plupart des flux réels sont turbulents et non laminaires. Comme souvent, ce sont néanmoins les flux laminaires qui sont les mieux modélisés, puisque plus simples. Cette première approximation sert alors de support à des modèles plus complexes.

Il existe un certain nombre d'approche de modélisation des écoulements turbulents. Citons-en ici trois : la Simulation Numérique Directe (SND), les modèles statistiques dont les plus utilisés sont les K-epsilon et enfin, intermédiaire entre ces deux approches et intéressant pour nous car attaquant les différentes échelles de la turbulence, les Large Eddy Simulation (LES) ou Simulation aux Grandes Échelles (SGE) (parfois appelés modèles sous-maillages).

La SND ne fait aucune approximation, elle est donc la méthode dont les résultats sont les plus justes. Elle est par contre computationnellement irréaliste pour des problèmes d'un réalisme utile d'un point de vue ingénieur par exemple.

Les méthodes K-epsilon simplifient le problème de l'écoulement turbulent par des moyennes temporelles et spatiales. Cette approche fonctionne sur des flux suffisamment réguliers, mais pas avec les flots transitoires ou fortement cisailés, comme par exemple près des bords où le modèle est alors généralement couplé à un autre spécifique. Ces méthodes introduisent des grandeurs très pragmatiques et ne sont pas parmi les plus élégantes mathématiquement³⁰.

Les modèles *Large Eddy Simulation* calculent le comportement des grandes échelles, en modélisant l'action des petites échelles. En effet, les grandes échelles d'un écoulement sont celles qui contrôlent, par exemple, les transferts de chaleur, et qui contiennent l'énergie cinétique. La modélisation se fait en modélisant l'action dissipative des petites échelles sur les grandes échelles, au moyen d'une viscosité tourbillonnaire (modèle de type Smagorinsky). Des modèles plus précis, les modèles dynamiques, ont permis d'obtenir une meilleure estimation des constantes intervenant dans la modélisation de type Smagorinsky. Cette méthodologie hybride consiste en fait à filtrer les équations de Navier-Stokes pour séparer les échelles qui seront remodelisées (les petites) de celles qui seront résolues directement (les grandes). C'est une méthode très utilisée en aérodynamique.

Les schémas *multi-niveaux*, ou méthode *Dynamic Multilevel method (DML)* proposent une modélisation des petites échelles non fondée sur une modélisation de type Smagorinsky [Bou 99]³¹. Les premiers schémas multi-niveaux proposaient une simplification du calcul des petites échelles, tout en permettant une bonne estimation du comportement des grandes échelles. Ce type de modélisation numérique a permis d'accélérer le calcul de simulations directes. Mais, en vu d'une modélisation de type LES, il a fallu mieux retranscrire le caractère dissipatif des petites échelles lorsque la résolution était insuffisante. Cela a été réalisé, dans un

²⁹ « Observez le mouvement de la surface de l'eau, qui ressemble à une chevelure, et qui a deux mouvements : un du au poids des cheveux, l'autre à la forme des boucles ; de même, l'eau a des mouvements de remous, venant d'une part du courant principal et de l'autre de mouvements aléatoires et contraires » (Figure 42) (trad. d'après Ugo Piomelli)

³⁰ <http://name.math.univ-rennes1.fr/fulgence.razafimahery/seminaire/turbulence.html>

³¹ <http://www.cnrs.fr/Cnrspresse/math2000/html/math15.htm>

premier temps, en modifiant les phases des petites échelles obtenues avec le calcul simplifié. Dans un deuxième temps, l'estimation des petites échelles a été obtenue en imposant une décroissance correcte de l'énergie cinétique contenue dans les échelles en fonction de leur taille (selon un spectre d'énergie de type Kolmogorov), afin de bien retranscrire l'action des petites échelles, qui sont modélisées, sur les grandes échelles qui sont calculées.

Les méthodes LES sont algorithmiquement plus complexes que les méthodes statistiques, notamment par nécessité de maillages plus fins, mais prennent mieux en compte la turbulence, ce qui est parfois sine qua non en modélisation industrielle (ailes d'avion par exemple). Sa lourdeur actuelle est très à portée de progrès rapides de la technologie informatique.

4.3.7 *Échelles temporelles, corrélations spatio-temporelles et mémoire de la turbulence*

A. Favre [Fav 76] propose d'étudier le déplacement de la turbulence au cours du temps à l'aide des corrélations spatio-temporelles. Il s'agit de permettre le suivi de l'évolution de la turbulence, en comparant statistiquement des grandeurs mesurées dans un écoulement réel en deux points différents mais à des instants différents. Une telle corrélation spatio-temporelle globalise un modèle que l'on pourrait qualifier d'*histoire des mouvements turbulents*. On peut en déduire une vitesse de convection des mouvements turbulents. La production d'énergie turbulente au sein même de l'écoulement brouille ces corrélations en générant ainsi une *perte de mémoire de la turbulence*. L'existence de multiple échelles de temps, à l'instar des échelles de longueur, rend difficile une interprétation de ces corrélations qui par nature figent ces deux échelles et induit une analyse de type statistique globalisant des phénomènes sur des petites échelles dans des coefficients les moyennant.

4.3.8 *Lois d'homogénéisation, de type Darcy*

Dans ce type de lois (modèles différentiels), on globalise dans des coefficients globaux des phénomènes à petites échelles. Par exemple, lorsque l'on s'intéresse à des simulations de transport sédimentaire, soit on postule que les sédiments en petit nombre n'ont pas d'influence sur l'écoulement et qu'ils le subissent seulement, soit ces sédiments sont trop nombreux pour cette dernière hypothèse et l'on doit modifier localement les équations comportementales du fluide. Dans la loi de Darcy, on dira par exemple, que le fluide a une viscosité plus grande due à la globalisation des sédiments qu'il contient.

4.4 Conclusion.

Le vingtième siècle vit se renforcer la compréhension de l'écologie, née de la géographie botanique plus descriptive avant de se rapprocher de sciences plus modélisantes. Les écosystèmes sont maintenant au cœur des modèles écologiques, et c'est à contribuer à leur modélisation par leur simulation que nous nous attaquons. L'approche écologique retenue est systémique, car d'une part elle est bien répandue en écologie et d'autre part elle correspond bien aux compétences informatiques que nous comptons développer. C'est par les flux au sein de tels systèmes que nous entamons notre parcours, car ils ont une importance capitale pour la dynamique du système en entier, a fortiori dans le cadre d'un estuaire tel que celui de notre étude. Nous examinons donc les méthodes existantes pour simuler des écoulements. Nous les avons présentées dans ce chapitre à l'exception de celle que nous avons finalement retenue, que nous allons à présent aborder.

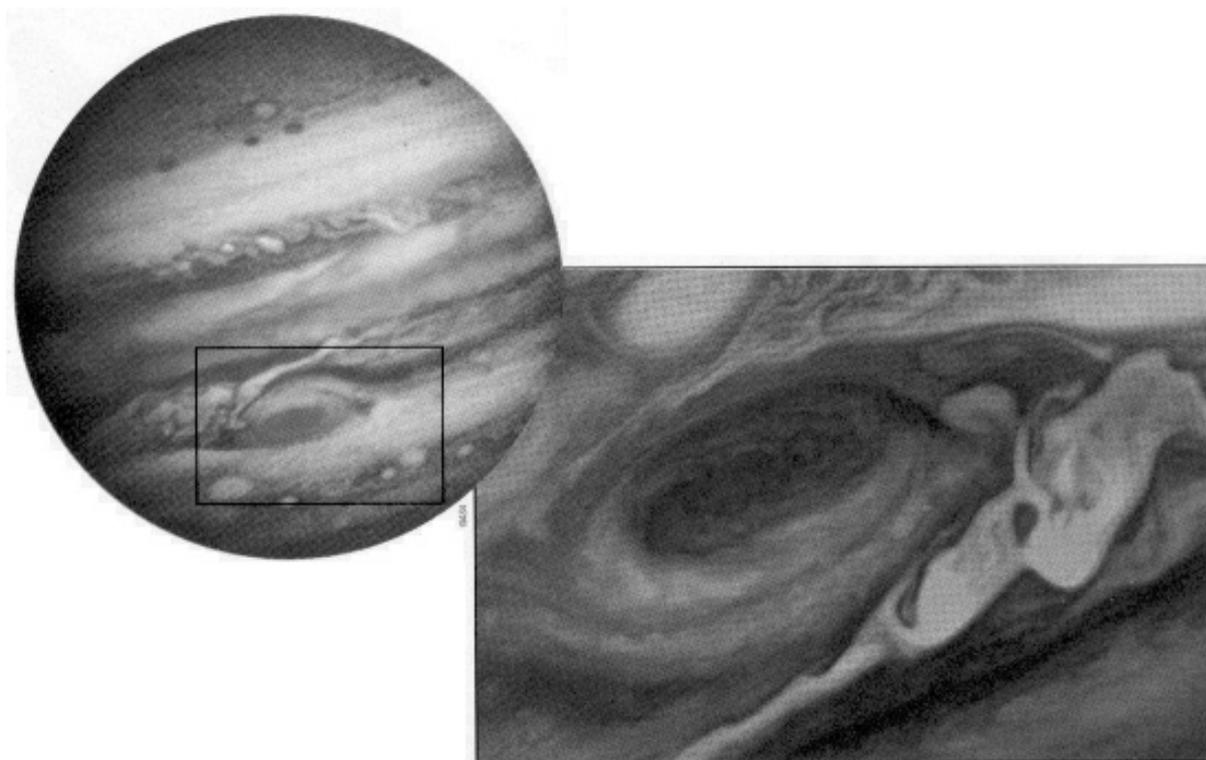


Figure 43 : La grande tache rouge de Jupiter, une des plus grandes structures hydrodynamiques stables connues. [Rob 01]

CHAPITRE 5

SIMULATION D'ÉCOULEMENT FLUIDE

« Les films réalisés dans l'équipe MOST du LEGI montrent que la turbulence est dominée par des tourbillons cohérents qui naissent de manière imprévisible, interagissent non-linéairement, et finalement meurent, rejoignant ainsi une vision philosophique proposée par Lucrèce plus de 2000 ans auparavant. En 1970, le chercheur sur la turbulence était comme un aveugle n'ayant à sa disposition que des mesures statistiques. Aujourd'hui l'aveugle voit un monde merveilleux de tourbillons et structures qui lui permettent d'interpréter les statistiques d'antan. Nous pouvons contrôler ces tourbillons pour réduire la consommation d'un véhicule, le bruit d'un TGV et d'un avion, ou l'échauffement des moteurs-fusée. Nous savons aussi simuler la pollution atmosphérique et les tempêtes, pour une meilleure protection des populations et des biens. »

Marcel Lesieur, discours d'introduction à l'Académie des Sciences (2003).

Résumé

Ce chapitre décrit notre simulation hydrodynamique. Il commence par une description du modèle mécanique retenu, un système de discrétisation des équations de Navier Stokes dit particulière. On décrit alors comment il est implémenté. On explique ensuite les différentes méthodes retenues pour percevoir des structures et des organisations hydrodynamiques, ainsi que les différents systèmes multiagents qui les réifient dans la simulation une fois la détection effectuée. Nous concluons en comparant les différentes méthodes qui pourraient parvenir à ce genre de résultat.

5.1 Présentation

Afin de pouvoir nous intéresser à plusieurs niveaux de description d'un fluide, nous nous sommes attachés à pouvoir détecter et réifier des organisations qui pouvaient apparaître lors de la simulation.

Le modèle de base que nous utilisons est basé sur des vortex élémentaires dans un écoulement en deux dimensions. Ce modèle est mathématiquement équivalent aux équations de Navier Stokes. Nous nous intéressons ici à la détection d'organisations de même nature mais d'un niveau de description plus élevé : on garde ainsi une formulation mathématique homogène pour conserver une équivalence à Navier Stokes. Pour détecter ces organisations, on utilise une méthode faisant suivre triangulation, calcul d'enveloppe convexe puis d'ellipse associée.



Figure 44 : Vortex élémentaires de différentes échelles (Léonard de Vinci circa 1510)

Une fois le tourbillon détecté, on crée un agent, au sens des systèmes multiagent, le représentant. Cet agent est basé sur un automate d'écorésolution [Fer 95]. Ses perceptions et ses actions, ou plus généralement en fait les règles qui le régissent, sont modelées par les impératifs mécaniques de la structure qu'il représente, d'une manière somme toute téléologique.

Différentes implémentations de tout ou partie du modèle décrit ont été réalisées par Cyrille Bertelle, Damien Olivier et moi-même, rejoints plus tard mais de manière notable par Sylvain Lerebourg lors de son stage de DESS .

Le langage d'implémentation a toujours été Java, l'implémentation des agents s'appuyant éventuellement sur différentes itérations de la plateforme MADKIT.

Voici ce à quoi ressemble notre simulation d'écoulement fluide :

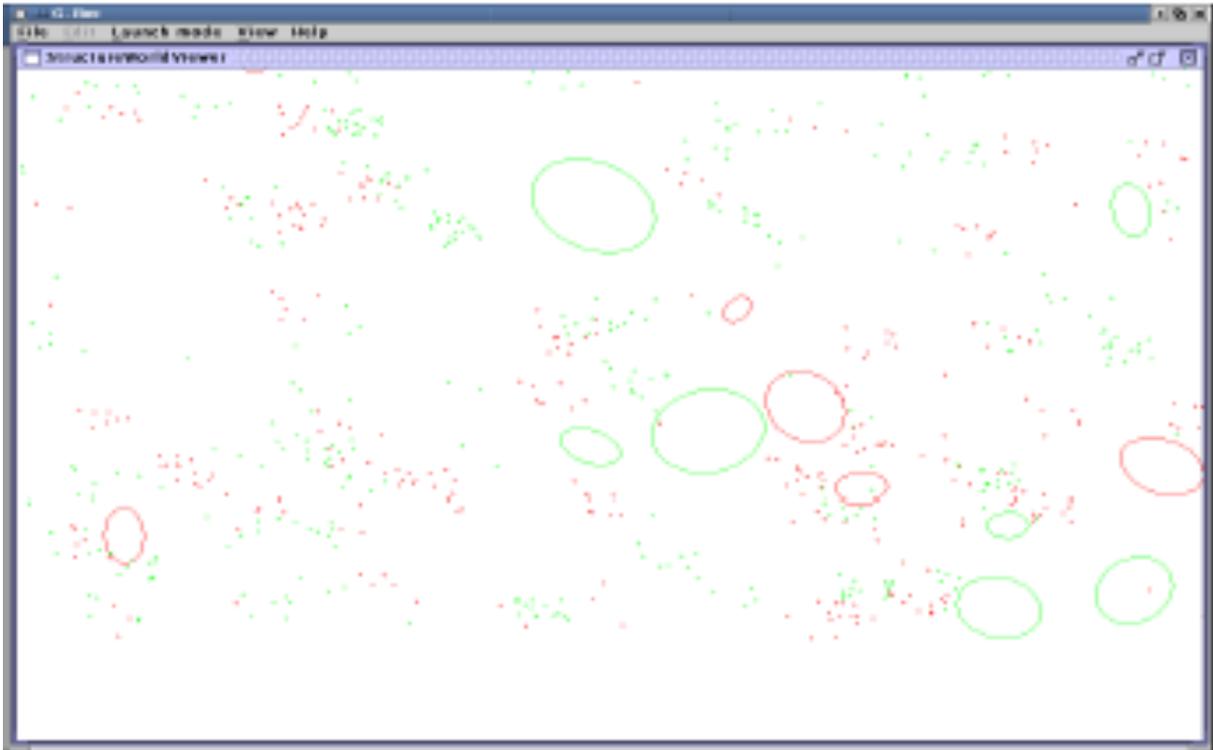


Figure 45 : Une capture d'écran de la simulation

Les points rouges et verts sont les particules vortex, la couleur figurant le sens de leur rotation. Les ellipses rouges et vertes représentent les structures de fluides détectées et réifiées.

Développons à présent les règles présidant à ces calculs.

5.2 Couche des particules

Nous allons donc discrétiser notre fluide en un ensemble de n particules $(P_i)_{1 \leq i \leq n}$, de positions $(\vec{x}_i)_{1 \leq i \leq n}$, de vitesses $(u_i)_{1 \leq i \leq n}$ (on réservera la lettre 'v' au volume) et de rotationnels $(\vec{\omega}_i)_{1 \leq i \leq n}$.

Comme nous l'expliquons au 4.3, un écoulement fluide incompressible voit les rapports entretenus entre sa vitesse et sa vorticité décrits par un système d'équations différentielles appelées équations de Navier-Stokes. Plusieurs formulations de celles-ci sont possibles, et vont même jusqu'à recouvrir des notions variables dans la littérature mécanique. Nous présentons ici celle que nous avons retenue [Leo 80].

Pour calculer à chaque instant t , pour chaque particule P_i la portion de la vitesse \vec{u}_p qui vient de l'action des autres particules, nous utilisons la formule suivante [Leo 80]:

$$\vec{u}_p(\vec{x}_i, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq i} \vec{\omega}_j \wedge \frac{(\vec{x}_i - \vec{x}_j)}{\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|^2} \quad (1)$$

Il est à noter que nous faisons ici nôtre l'usage courant en mécanique qui consiste à ne pas préciser que les $\vec{\omega}_j$ et les \vec{x}_j sont fonction du temps, afin d'alléger un peu l'écriture.

Si de plus, à cet instant t , l'ensemble des particules $(P_i)_{1 \leq i \leq n}$ est transporté par un écoulement global de vitesse moyenne $\vec{u}_\infty(t)$, alors la vitesse de P_i correspond à la somme de la vitesse de l'écoulement global et de la vitesse induite par les autres particules en rotation dans le domaine :

$$\vec{u}(\vec{x}_i, t) = \vec{u}_p(\vec{x}_i, t) + \vec{u}_\infty(t)$$

Deux possibilités s'offrent alors à nous pour le fluide : il peut être visqueux ou non. Commençons par le plus simple, supposons qu'il soit parfaitement fluide (non visqueux). Les particules « glissent » alors les unes sur les autres, et leur vorticité est constante au cours du temps.

$$\omega_i(t) = Cste = \omega_i(0)$$

On calcule alors la position des particules par intégration de leur vitesse puisque bien sûr :

$$\frac{d\vec{x}_i}{dt}(t) = \vec{u}(x_i, t)$$

Voilà pour l'idée générale. Pour l'implémentation effective, on constate que (1) présente des risques de singularité lorsque certaines particules sont très proches les unes des autres. On la reformule donc en utilisant une fonction de régularisation. (1) devient alors :

$$\vec{u}_p(\vec{x}_p, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq p} \omega_j \wedge \frac{(\vec{x}_p - \vec{x}_j)}{\sqrt{(\|\vec{x}_p - \vec{x}_j\|^4 + \varepsilon^4)}}$$

$$\vec{u}_p(\vec{x}_p, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq p} \omega_j \wedge \frac{(\vec{x}_p - \vec{x}_j)}{\sqrt{(\|\vec{x}_p - \vec{x}_j\|^4 + \varepsilon^4)}}$$

ε étant un petit paramètre. L'expérience montre qu'une bonne valeur pour lui est $h^{3/4}$, où h est la distance minimale entre deux particules.

Il existe également un modèle particulière pour fluide visqueux.

« Frottant » alors les unes sur les autres, les particules changent de vorticité au cours du temps :

$$\frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \frac{\sum_j (V_i \vec{\omega}_j - V_j \vec{\omega}_i) \exp\left(-\frac{\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|^2}{4\nu\Delta T}\right)}{(4\pi\nu)\Delta T^2} \quad (2)$$

où les $(V_i)_{1 \leq i \leq n}$ sont les volumes associés aux particules $(P_i)_{1 \leq i \leq n}$, et ν la viscosité cinématique du fluide. On suppose le fluide incompressible, ce qui est une bonne hypothèse pour les écoulements auxquels nous nous intéressons : les $(V_i)_{1 \leq i \leq n}$ sont donc constants.

Il nous faut alors intégrer numériquement cette équation aux dérivées partielles (2) à chaque pas de temps, ce qu'on fait par l'entremise d'un algorithme à pas fractionnaires.

Sur ces bases mécaniquement solides, nous allons pouvoir bâtir notre système multiagent.

5.3 Des particules aux agents vortex : détection des organisations

Au cours de la simulation apparaissent des organisations dans le flux, que nous souhaitons incarner en des agents. Nous devons donc :

- Détecter ces organisations
- Créer des agents les représentant.

Intéressons-nous à présent au premier point.

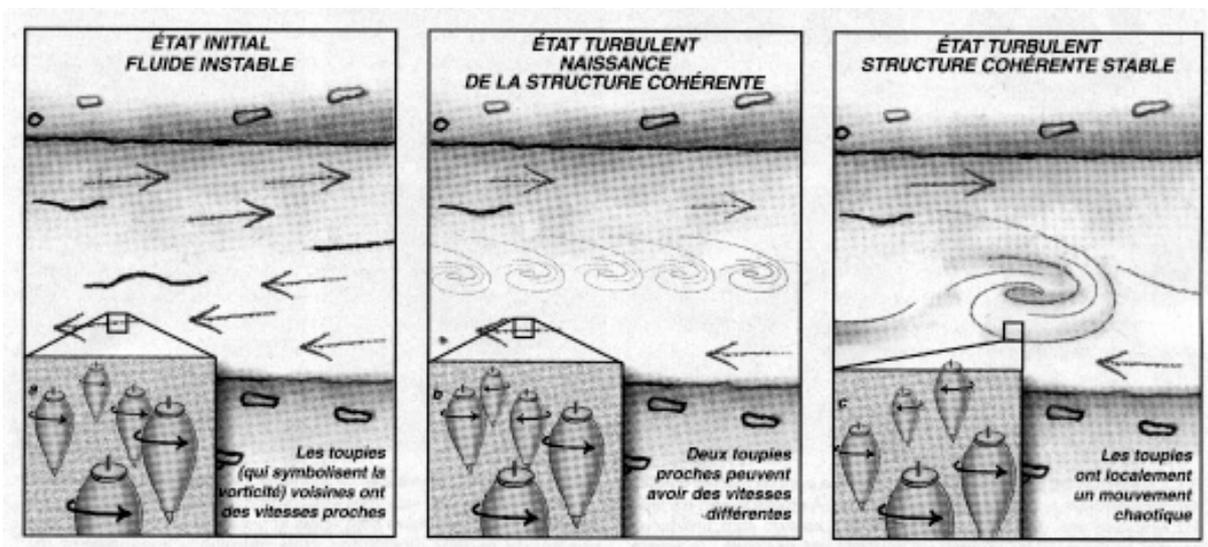


Figure 46 : Les structures que nous souhaitons détecter (d'après [Rob 01])

La détection de structures que nous utilisons actuellement peut être résumée ainsi :

- Calcul d'une triangulation de Delaunay des particules vues comme des points.
- Calcul d'un arbre de poids minimum recouvrant la triangulation précédente.

5.3 Des particules aux agents vortex : détection des organisations

- Suppression de certains arcs suivant des critères ontologiques, transformant ainsi l'arbre en forêt.
- Calcul de l'enveloppe convexe de chaque arbre de la forêt précédente.
- Suppression de certaines enveloppes suivant des critères morphologiques (l'enveloppe ne doit pas avoir une surface trop différente de celle des arbres qu'elle entoure)
- Calcul d'ellipses « proches » des enveloppes convexes précédentes

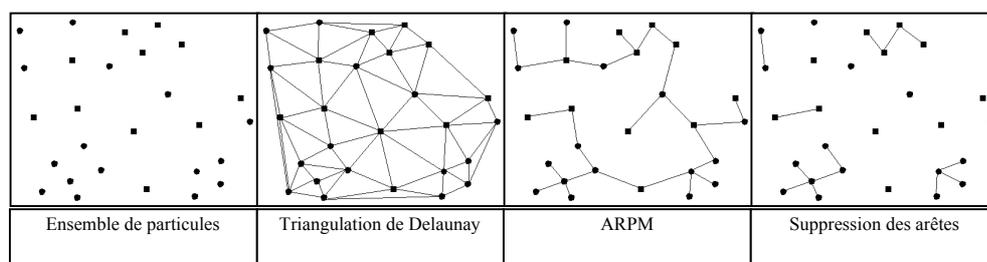


Figure 47 : Schéma récapitulatif de la détection d'agrégats

On assigne alors un agent à cette ellipse. Cette méthode détectant des structures elliptiques, nous l'avons baptisée DSE, montrant ainsi que la créativité littéraire n'est pas une nécessité dans notre métier.

Détaillons à présent ces différentes étapes.

5.3.1 Triangulation de Delaunay

Une triangulation est une classe d'algorithme qui calcule une partition en triangles d'un nuage de points donné. Dans cette classe, nous avons choisi un membre de la famille de triangulation dite de Delaunay. Cet algorithme garantit que les sommets du nuage sont reliés aux sommets les plus proches : nous pourrions donc bien trouver l'ARPM décrit au 5.3.2. Nous sommes donc bien en route pour regrouper nos particules par proximité.

L'algorithme de Delaunay est itératif. L'initialisation consiste à rajouter quatre points formant un rectangle englobant le nuage de particules. On prend alors une des deux diagonales de ce rectangle, obtenant ainsi nos premiers triangles. On ajoute alors un à un nos points représentant nos particules, transformant notre triangulation à chaque étape comme détaillé plus bas. Lorsque tous les points ont été introduits, nous enlevons les quatre premiers points du rectangle initial, ainsi bien sûr que les arcs dont ils sont sommets.

Comment transformer la triangulation ? Plaçons-nous dans l'état où la triangulation de Delaunay est déjà réalisée pour n points. En insérant le point $n+1$, nous obtenons une nouvelle triangulation comme le montre la Figure 48. Nous commençons par éliminer les triangles dont le cercle circonscrit contient le nouveau point, puis nous construisons la nouvelle triangulation à partir de ces triangles éliminés et du point à ajouter.

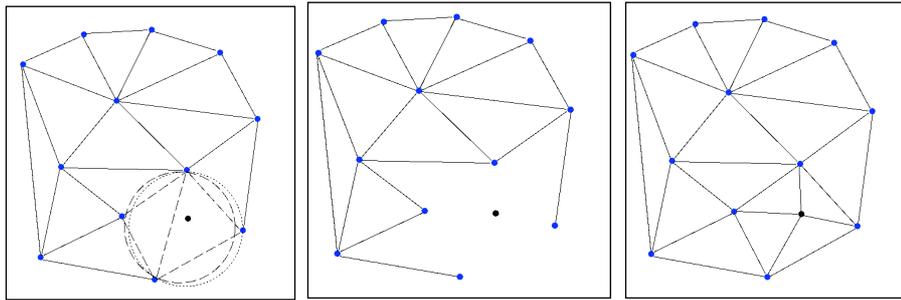


Figure 48 : Un pas de la triangulation de Delaunay

Grâce à la triangulation d'un ensemble de points par la méthode de Delaunay, nous obtenons un graphe connexe non orienté.

Nous évaluons alors les arcs par leur longueur. Plus deux sommets d'un arc sont éloignés, plus l'arc coûtera cher.

5.3.2 *Arbre de Recouvrement de Poids Minimal*

On cherche alors à trouver un arbre dont les nœuds sont les sommets du graphe précédent, et les arêtes incluses dans les arcs du graphe en question. On souhaite de plus que la somme des valuations de ses arêtes soit minimale parmi celles des arbres vérifiant les propriétés précédentes.

L'algorithme utilisé est l'algorithme de Kruskal [Kru 56], dont le principe est le suivant :

- nous partons d'une forêt de n arbres réduits chacun à un sommet isolé du graphe
- On trie l'ensemble des arêtes suivant leur longueur
- à chaque itération, nous ajoutons à cette forêt la plus petite arête ne créant pas de cycle avec celles déjà choisies
- nous stoppons quand l'arbre est couvrant, c'est-à-dire à la $(n-1)^{\text{ième}}$ arête.

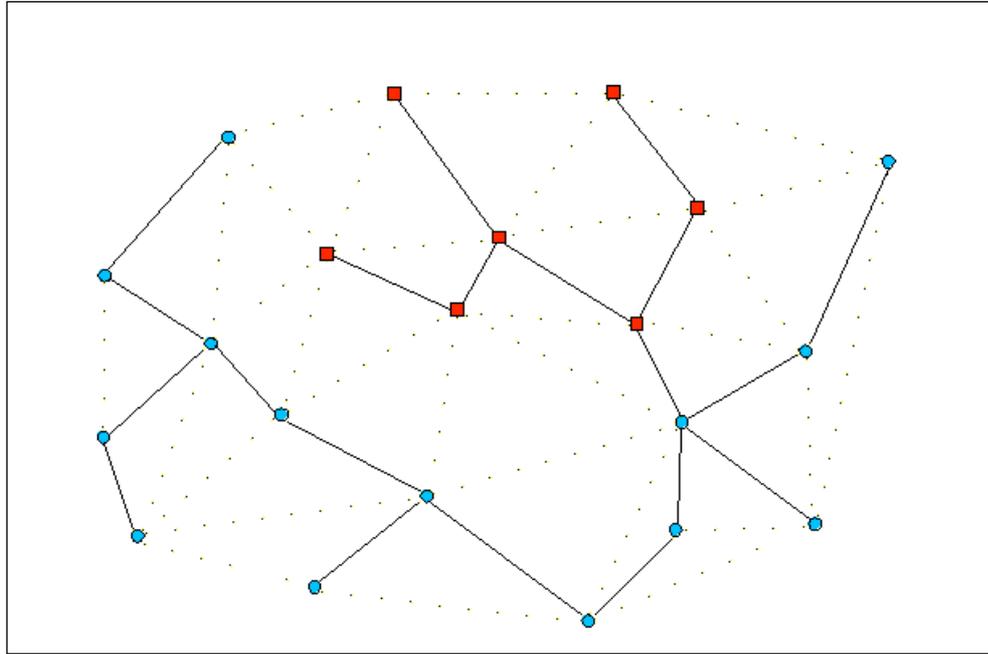


Figure 49 : ARPM (traits pleins) sur une triangulation de Delaunay (traits pointillés)

5.3.3 De l'arbre à la forêt : premiers clusters

Sont reliés au sein de notre arbre des particules proches les unes des autres, indépendamment de leur sens de rotation. Ceci n'est pas intéressant ontologiquement, et nous y remédions alors, enlevant simplement les arcs reliant des particules de sens de rotation différents. Nous transformons alors notre arbre en forêt, dont chaque arbre correspond à un cluster.

5.3.4 Calcul des enveloppes convexes des arbres de la forêt

L'enveloppe convexe d'un ensemble de points d'un plan est le polygone :

- Convexe,
- qui contient ces points et
- minimum pour la relation d'ordre d'inclusion.

On montre notamment que tout sommet de l'enveloppe convexe est un des points de l'ensemble dont on calcule l'enveloppe.

Prenons par exemple l'APRM de la Figure 49. Les carrés rouges représentent des particules tournant dans un sens, les ronds bleus dans l'autre. Enlevons l'arc reliant le carré rouge au rond bleu, on obtient deux arbres. Le résultat du calcul de l'enveloppe convexe sera :

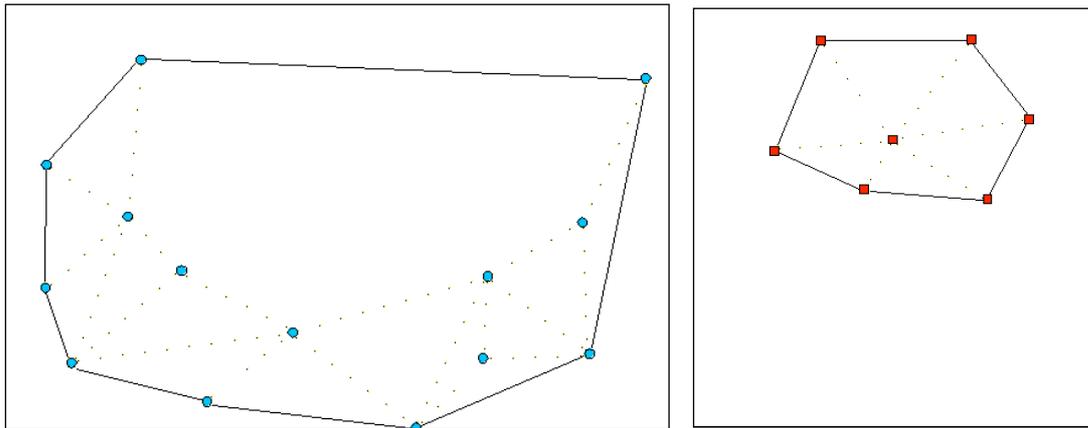


Figure 50 : Résultat du calcul des enveloppes convexes.

Détaillons à présent ce calcul.

Nous avons essayé deux méthodes pour calculer nos enveloppes convexes :

- Emballage des paquets ou méthode de Jarvis
- Elimination des concavités ou méthode de Graham.

C'est au final la deuxième que nous avons retenue ([LER 02]), nous ne détaillerons donc ici que cette méthode.

Celle-ci s'effectue en deux étapes:

- on commence par construire un polygone simple fermé (non connexe) passant par tous les points.
- En parcourant les points dans l'ordre établi précédemment, on élimine ceux qui ne font pas partie de l'enveloppe convexe.
 - La détection d'une concavité se fait en calculant le sens de rotation d'un triangle constitué de l'avant dernier point ajouté à l'enveloppe convexe, du dernier point ajouté, et du premier des points du chemin polygonal qui n'a pas encore été examiné pour être ajouté à l'enveloppe.
 - Lorsqu'une concavité est ainsi détectée, il faut éliminer un ou plusieurs points précédemment ajoutés : c'est une méthode par backtracking.

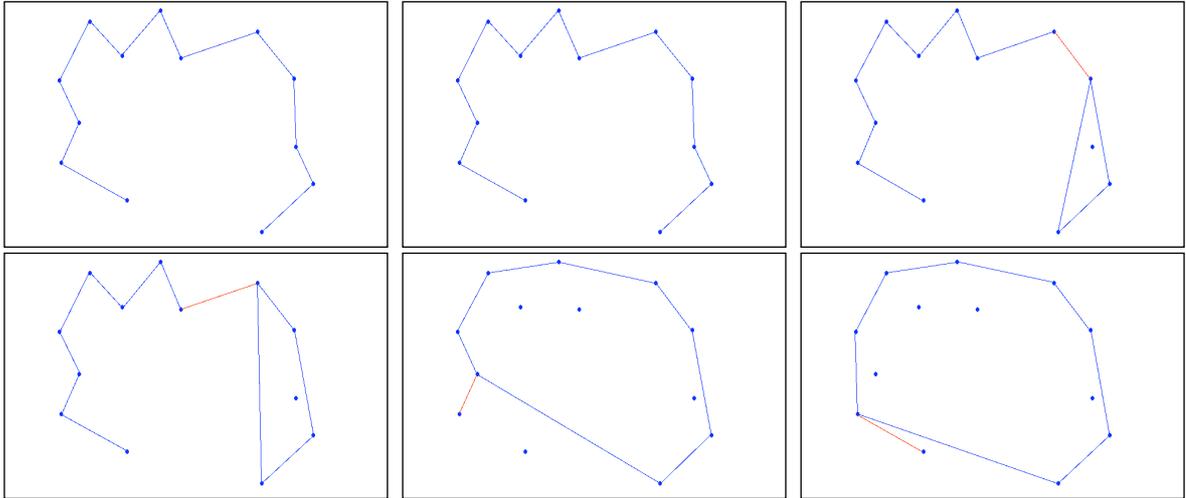


Figure 51 : Déroulement de l'algorithme d'élimination des concavités

Ce qui pourrait être écrit en java de la manière suivante :

```
int graham (Point p[], int N) {
    int i, min, M;
    Point t;

    for (min = 1, i = 2; i <= N; i++)
        if (p[i].y < p[min].y) min = i;
    for (i = 1; i <= N; i++)
        if (p[i].y == p[min].y)
            if (p[i].x > p[min].x) min = i;
    t = p[1]; p[1] = p[min]; p[min] = t;
    Toolbox.triRapide(p, N); // selon theta(p[i], p[1])
    p[0] = p[N];
    for (M = 3, i = 4; i <= N; i++) {
        while (Toolbox.sensRotation(p[M], p[M-1], p[i]) >= 0)
            M--;
        M++;
        t = p[M];
        p[M] = p[i];
        p[i] = t;
    }
    return M;
}
```

Nous pouvons donc calculer ainsi l'enveloppe convexe des arbres de notre forêt. On se rapproche de la forme des structures recherchées, des ellipses. Finissons à présent cette recherche.

5.3.5 Calcul des ellipses les plus proches de l'enveloppe convexe obtenue.

Nous allons à présent chercher les ellipses qui constituent une bonne approximation de nos enveloppes convexes, au sens des moindres carrés.

Une ellipse est une conique particulière. Ainsi, nous la représentons algébriquement par une équation de la forme :

$$F(A, X) = A.X = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$

Chapitre 5
Simulation d'écoulement fluide

où (x, y) est un point du plan considéré, $A = [a b c d e f]$ et $X = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]$. $F(A, X)$ est appelée distance algébrique entre le point X et la conique d'équation $F(A, X) = 0$.

Considérons à présent les sommets $(X_i)_{1 \leq i \leq N}$ de l'enveloppe convexe qu'on désire approximer. Suivant la méthode des moindres carrés, nous allons chercher la conique qui minimise la somme des carrés des distances algébriques entre elle-même et ces sommets. De plus, afin d'être sûrs d'obtenir une ellipse, nous devrions rajouter comme contrainte sur A $b^2 - 4ac \leq 0$.

On ne sait néanmoins pas actuellement résoudre ce genre de minimisation avec une telle contrainte. Nous sommes donc passé par des méthodes approchées aux contraintes plus fortes mais compatibles. Si ces méthodes trouvent une solution, celle-ci sera compatible avec le problème général. Si elles n'en trouvent pas on ne peut rien conclure. Nous utilisons en pratique deux de ces méthodes approchées, une de Gander [Gan 94] et l'autre de Fitzgibbon [Fitz 96].

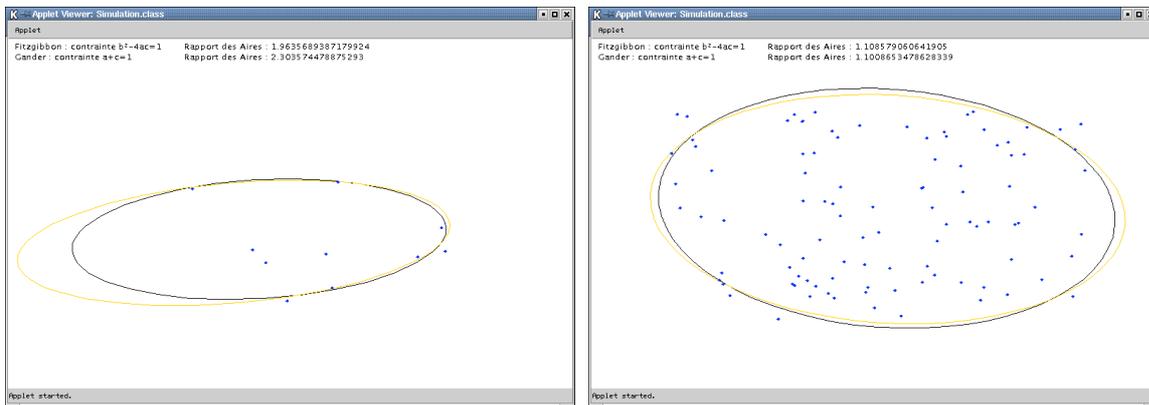


Figure 52 : Exemples de calcul d'identification d'une ellipse à partir d'un ensemble de points avec les deux méthodes (Gander (clair) et Fitzgibbon (foncé)).

La Figure 52 nous montre une identification entre le nuage de points et l'ellipse qui « se passe bien » : la forme de l'ellipse est conforme à l'intuition qu'on en a. Ce n'est pas toujours le cas (cf Figure 53). Nous utilisons essentiellement deux critères pour détecter automatiquement ces anomalies.

5.4 Couche des structures et organisations réifiées

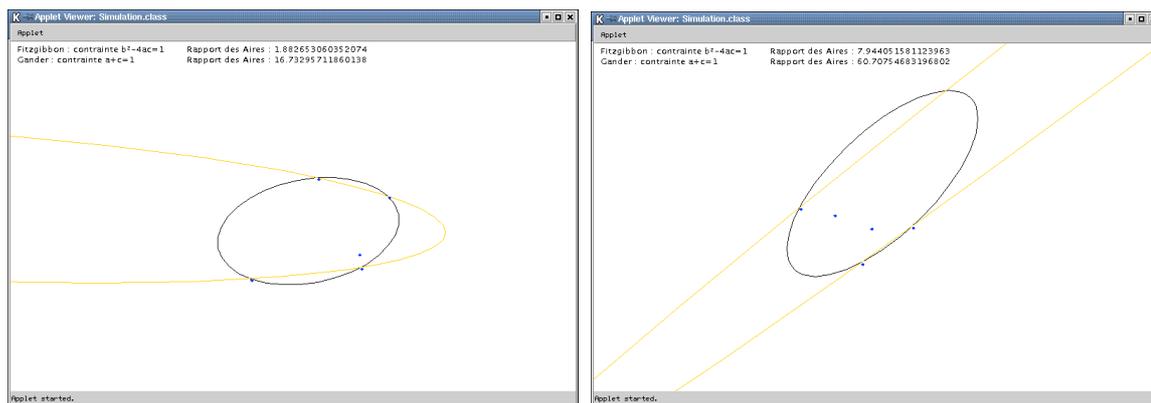


Figure 53 : Ellipses correspondant mal au nuage de points

Le premier critère est de calculer le rapport de longueur entre les axes : un rapport trop éloigné de 1 indique une ellipse trop étirée.

Le deuxième est de calculer le rapport entre la surface de l'ellipse et celle du polygone enveloppe convexe. De même, le rapport doit rester près de 1.

Si nous n'arrivons pas à obtenir en l'état une ellipse satisfaisante, on procède alors à une subdivision de l'enveloppe convexe, qui rajoute des sommets au milieu de segments existants. L'augmentation de la quantité de données à approximer permet une meilleure adéquation entre le polygone et l'ellipse.

Ainsi, nous avons détecté une structure fluide émergée au cours de la simulation, et avons délimité approximativement ses contours. A présent, enlevons de la simulation les particules dont la structure a émergé, et créons un agent pour la représenter dans la simulation.

5.4 Couche des structures et organisations réifiées

5.4.1 Un système multiagent.

Les structures que nous allons ainsi créer dans la simulation doivent répondre à un certain nombre d'impératifs. elles doivent se comporter avec une certaine cohérence dictée par les lois physiques propres à ce genre de phénomène. Dans le même temps, celles-ci leur imposeront une certaine interaction bien précise avec le reste du fluide, aussi bien les particules de base que les autres tourbillons émergés. Ainsi, elles devront faire preuve d'une certaine autonomie, qui les distingue de leur environnement, et d'une interaction voire d'une vie sociale avec celui-ci. Avec un soupçon de téléologie, on voit que les propriétés vérifiées par nos structures réifiées sont quasiment celles caractéristiques d'un agent informatique. C'est donc cet outil qui les réalisera : nos structures vortex seront dans notre simulation membres d'un système multiagent.

Les systèmes multiagents sont des systèmes qui soulèvent des problèmes d'implémentation sans même introduire des comportements évolués pour les agents (asynchronisme/synchronisme, gestion de communications asynchrones, programmation événementielle, gestion dynamique d'organisation ou de groupes, ...). Nous avons lors de nos différentes implémentations essayé différentes gestions de l'architecture des agents. Nous

allons ici décrire celles utilisant la plateforme multiagents MadKit (Multi-Agent Development Kit), développée au LIRM-Montpellier et qui, tout en laissant libre de proposer des modèles comportementaux évolués pour les agents, gère leurs possibles interactions. Nous décrirons ensuite une autre implémentation plus légère, ne s'appuyant pas sur un framework existant (mais n'en redéfinissant pas un non plus). Madkit nous a en effet permis de prototyper certaines fonctionnalités de la simulation, mais au prix d'un surcroît de calcul gênant sur le long terme.

5.4.2 MadKit

Une des caractéristiques d'un agent informatique théorique est l'autonomie. Cette notion recouvre généralement une vue de l'esprit qui veut que les agents s'exécutent en parallèle dans le SMA, sans ordre indépendant de leur volonté. C'est bien entendu impossible pour un agent informatique réel. Les calculs qui décrivent son comportement sont exécutés quand un certains nombres d'arbitres les y autorisent : système d'exploitation, machine virtuelle java, scheduler du SMA ... A défaut d'une belle exécution parallèle, il faut se résigner à choisir un ordre d'exécution le moins gênant possible. Celui-ci rompra bien sûr la métaphore mais on n'a pas le choix : il faut juste le choisir au mieux, de manière à ne pas trop affecter le déroulement de la simulation [Meu 01]. Là où on a le plus facilement prise, c'est dans le scheduler³², l'ordonnanceur du SMA. Voyons donc quels outils de simulation du temps MadKit nous fournit [Fer 98].

Dans MadKit, les agents sont membres d'un *groupe* dans lequel ils jouent un *rôle*.

Un agent de Madkit est nécessairement un :

- **AbstractAgent** : permet de gérer le cycle de vie d'un agent (création, fonctionnement et suppression), l'appartenance à un groupe et l'assignation d'un rôle ainsi que la gestion de l'envoi et de la réception de messages. Ces agents peuvent éventuellement s'exécuter dans un même thread et donc alors de manière séquentielle.

Et peut également être :

- **Agent** : classe dérivée de **AbstractAgent** où chaque agent s'exécute dans son propre thread.

Certains *Agents*, associés donc à un thread, ont un rôle particulier, et gèrent l'accès d'autres agents au calcul :

- Un agent activateur (**Activator**) va permettre de définir les mécanismes d'ordonnancements des actions du groupe d'agents auquel il est rattaché.
- Un agent ordonnanceur (**Scheduler**) gère plusieurs agents activateurs. Il dérive de la classe **Agent** et possède donc son propre thread.

³² Le mot anglais « Scheduler » à l'avantage sur le français « Ordonnanceur » de rajouter une connotation horaire conforme à l'intuition qu'on a de ses fonctions. Néanmoins, arrêtons là cet anglicisme.

5.4 Couche des structures et organisations réifiées

- Un agent observateur (**Watcher**) va gérer un ensemble de sondes (**Probe**) afin d'observer les agents. Ces sondes peuvent aller extraire des informations sur des agents appartenant à un groupe donné et jouant un certain rôle.

Les communications se font par l'intermédiaire de messages et sont gérés par un mécanisme de type boîte aux lettres. Ainsi, chaque agent, héritier d'*AbstractAgent*, possède et gère sa propre boîte.

Tout ceci est résumé Figure 54.

En ce qui concerne notre application, nos tourbillons sont implémentés via une classe Tourbillon³³ héritière d'Agent. Un autre Agent s'occupera de l'ensemble des particules de base. Le comportement de celles-ci est en effet trop fruste pour justifier d'y consacrer les ressources d'un agent par particule : le coût immense en calcul n'aurait aucune contrepartie³⁴.

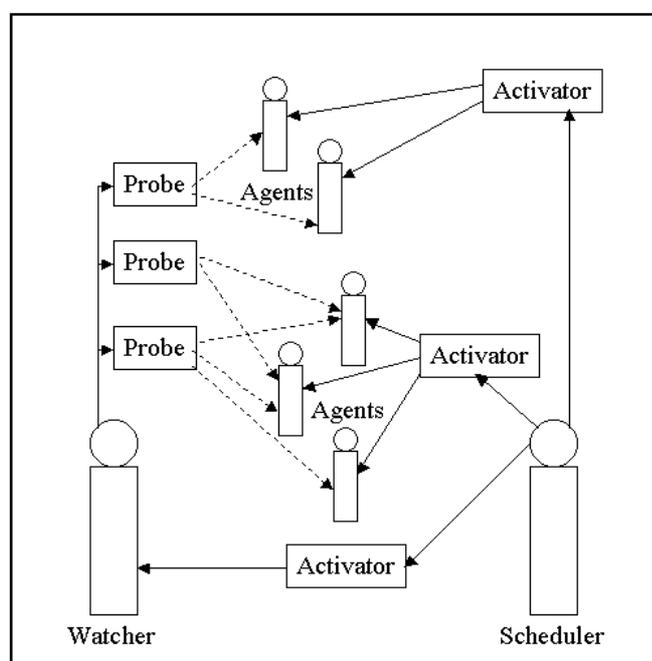


Figure 54 : Gestion de l'accès au calcul dans MadKit

5.4.3 Autre implémentation : déroulement synchronisé des automates

Un cycle de simulation fait agir les différentes entités de la simulation. Lors de la partie dévolue aux agents, on peut dans nos implémentations les plus récentes distinguer deux étapes :

- Déplacement des Tourbillons
- Gestion des interactions et de la stabilité des Tourbillons

³³ Nous adoptons comme convention de mettre une majuscule aux noms communs « techniques » (classes, packages etc.).

³⁴ Nous en parlons sagement pour avoir fut un temps suivi cette piste ...

Chapitre 5

Simulation d'écoulement fluide

Pour le déplacement on procède en deux temps, calculer la nouvelle vitesse puis en déduire la nouvelle position, ces calculs étant faits par rapport aux valeurs du pas de temps d'avant. Les nouvelles positions ainsi obtenues peuvent poser des problèmes « sociaux » aux tourbillons (cf. 5.4.5). On entre alors dans la deuxième partie, réglée dans chaque agent par un automate (cf. 5.4.4). Chaque agent exécute une transition sur son automate, jusqu'à ce qu'ils aient tous atteints l'état de satisfaction, qui est un état terminal. On passe alors à la suite du cycle de simulation.

Nous représentons ci-dessous le graphe des packages d'Aquasys en entier. C'est le package environnement (Figure 56) qui contrôle ces cycles.

5.4 Couche des structures et organisations réifiées

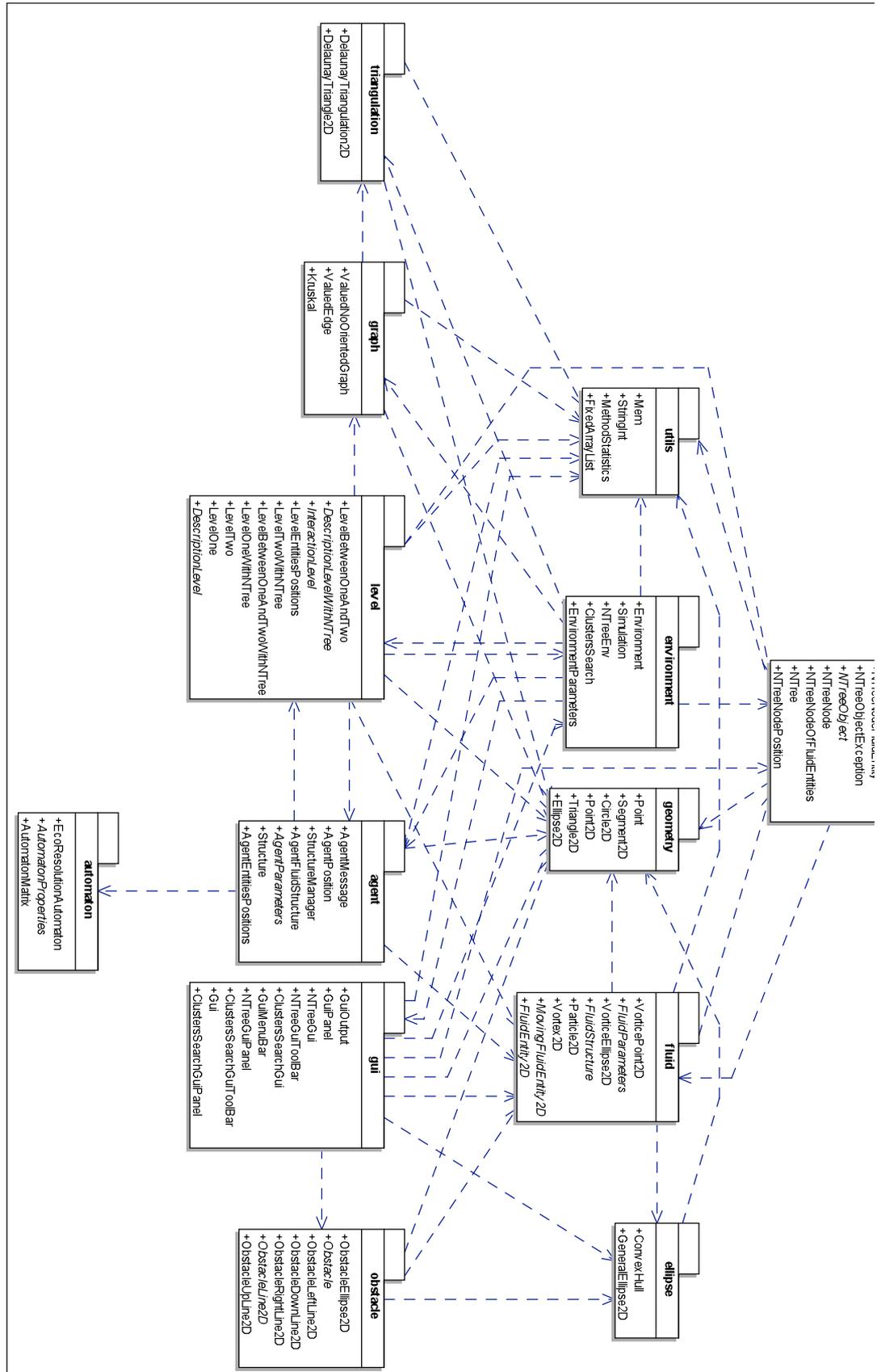


Figure 55 : Graphe de dépendance (UML) des packages d'Aquasys

Chapitre 5

Simulation d'écoulement fluide

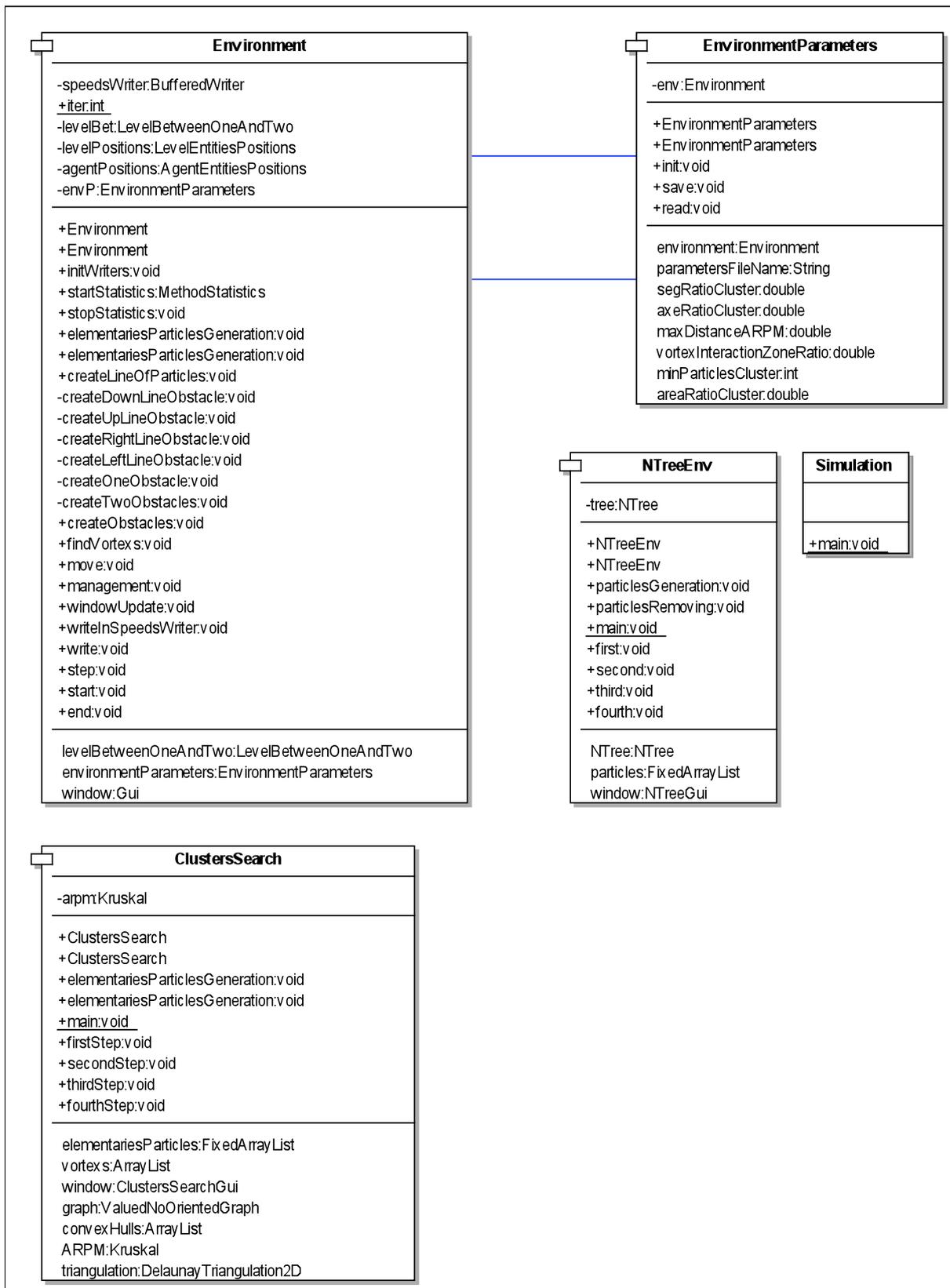


Figure 56 : Graphe de dépendance du package environnement*5.4.4 Vie des Tourbillons*

La partie sociale du comportement des agents Tourbillons est réglé par un transducteur incarnant une description de type *éco-agent* [Fer 95].

Un transducteur est une machine abstraite qui se présente comme un graphe orienté. On passe d'un sommet à l'autre en lisant sur une bande d'entrée un symbole, en allant ensuite sur le sommet prévu pour le symbole lu et pour l'état dont on part, et on écrit sur une bande de sortie un symbole d'un autre alphabet. On peut regarder la Figure 57 pour avoir un aperçu d'un tel automate. L'action symbolique d'écriture correspond pour nos agents à une action. Définissons à présent plus précisément ces machines.

Définitions :

- Soit :
 - un alphabet fini Σ
 - un semi-anneau $(K, +, \cdot)$,
 - Q un ensemble fini d'état
 - $I : Q \rightarrow K$ l'ensemble des états initiaux
 - $T : Q \rightarrow K$ l'ensemble des états finaux
 - $\delta : Q \times \Sigma \times Q \rightarrow K$ une fonction de transition

Le 5-uplet $(\Sigma, Q, I, T, \delta)$ est alors appelé automate à multiplicité.

- Soit Π un alphabet, $P(\Pi^*)$ l'ensemble des polynômes à coefficients entiers de mots du langage généré par Π , un transducteur est un automate à multiplicité dont le semi-anneau est $(P(\Pi^*), +, \cdot)$, avec $+$ correspondant à l'union et \cdot à la concaténation.

Un transducteur, dont l'alphabet d'entrée correspond aux perceptions possibles de l'agent, et l'alphabet de sortie à ses actions possibles, est au cœur de nos Tourbillons. Ce transducteur en fait ce qu'on appelle des éco-agents.

Un éco-agent est défini de la manière suivante :

- quatre états internes : satisfaction, fuite, recherche de satisfaction et recherche de fuite
- des actions élémentaires de satisfaction ou de fuite
- une fonction de perception des agents gêneurs (c'est à dire les agents qui empêchent l'agent courant d'être satisfait ou de fuir)
- Une fonction d'agression d'autres agents

En l'occurrence, pour chacun de nos Tourbillons nous appelons :

- les états internes de l'éco-agent :

Chapitre 5

Simulation d'écoulement fluide

- (S) être satisfait
- (SS) rechercher la satisfaction
- (F) fuir
- (SF) rechercher la fuite

L'état initial est (SS) et l'état final est (S).

- les fonctions de perceptions :
 - (A) être attaqué
 - (I) percevoir des gêneurs
- les actions élémentaires :
 - (TF) fuir
 - (TS) se satisfaire
- (TA) attaquer les agents

On utilise donc le transducteur $(\Sigma, \Pi, Q, I, T, \delta)$ suivant :

- $\Sigma = \{a, b, c, d\}$ est l'alphabet d'entrée des perceptions :
 $a = (A, I), b = (A, \bar{I}), c = (\bar{A}, I), d = (\bar{A}, \bar{I})$
- $\Pi = \{TA, TF, TS, TI, TE, N0, N1\}$ est l'alphabet de sortie des actions élémentaires (TI, TE, N0 et N1 sont des actions « techniques » qui n'ont pas de sens dans la métaphore éco-agent).
- $Q = \{S, SS, F, SF\}$ est l'ensemble des états de l'automate
- $I : Q \rightarrow \Pi^*$ est défini par $I(SS) = T1$ et $I(S) = I(F) = I(SF) = N0$
- $T : Q \rightarrow \Pi^*$ est défini par $T(S) = TE$ et $T(SS) = F) = T(SF) = N0$
- δ est défini par les transitions de l'automate décrit dans la Figure 57

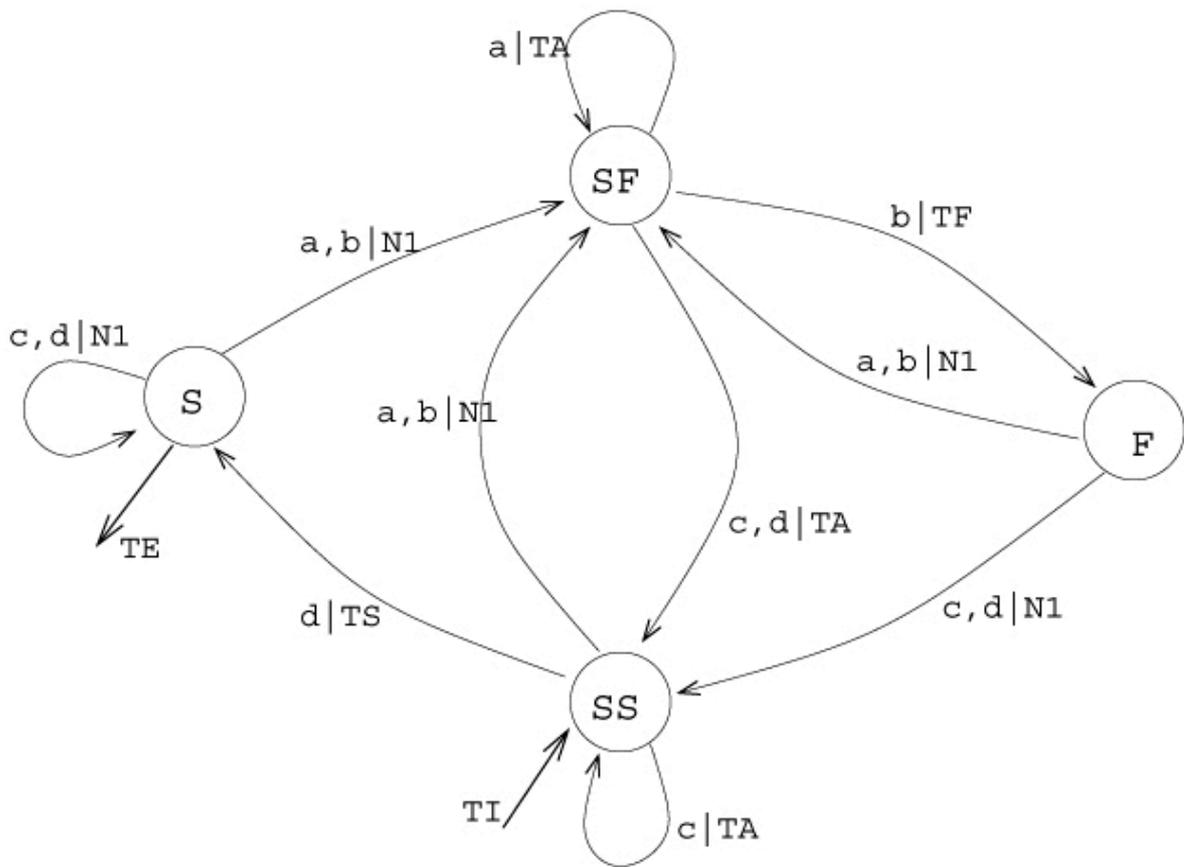


Figure 57 : Transducteur codant le comportement d'un éco-agent

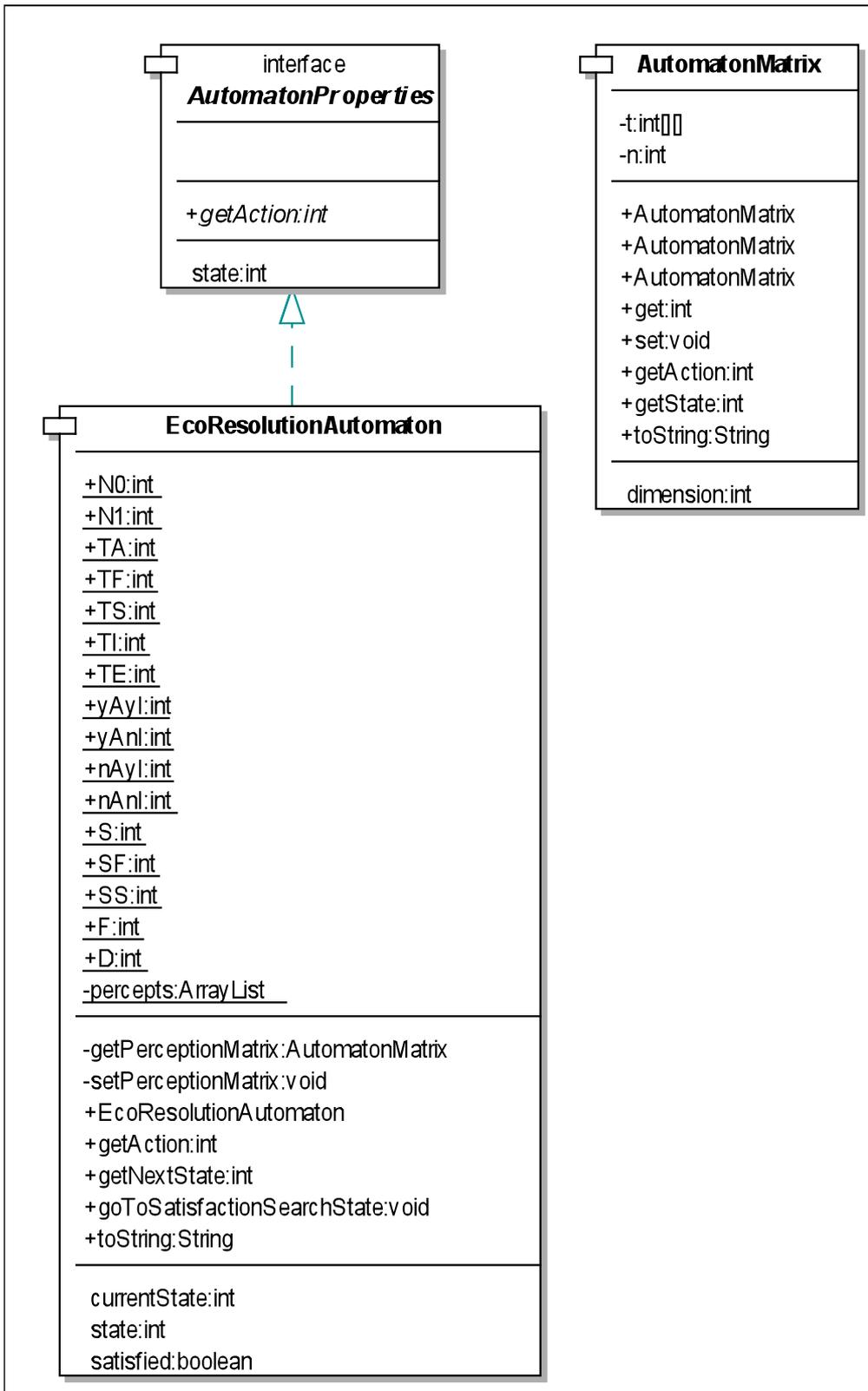


Figure 58 : Graphe de dépendance du package automaton

5.4.5 Détails des notions constitutives de l'éco-agent

Nous allons ici détailler comment nous avons créé un éco-agent adapté à la description du comportement d'une structure hydrodynamique tourbillonnaire. Pour cela nous allons préciser ce que signifient ici :

- Percevoir des gêneurs
- Agresser des agents
- Fuir
- Se satisfaire

5.4.5.1 Percevoir des gêneurs

Nous dirons qu'une structure en perçoit une autre comme étant gênante si cette dernière (cf. Figure 60) :

- Se déplace vers la première.
- Est « suffisamment » proche de la première

C'est ce dernier point qui demande le plus de calcul. Le principe de celui-ci est de calculer une zone d'interaction autour de l'ellipse qui perçoit. Cette zone est l'image de l'ellipse par une homothétie de rapport plus grand que 1 (Figure 59).

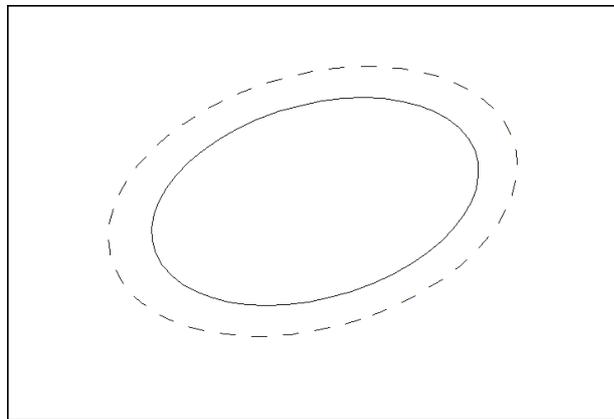


Figure 59 : Zone de perception d'une structure

On cherche alors une éventuelle intersection entre cette plus grande ellipse et les ellipses dont on veut savoir si elles gênent. On regarde également la direction de déplacement de la structure si elle n'est que dans la zone d'interaction ; si les structures se touchent la perception de gêne est automatique.

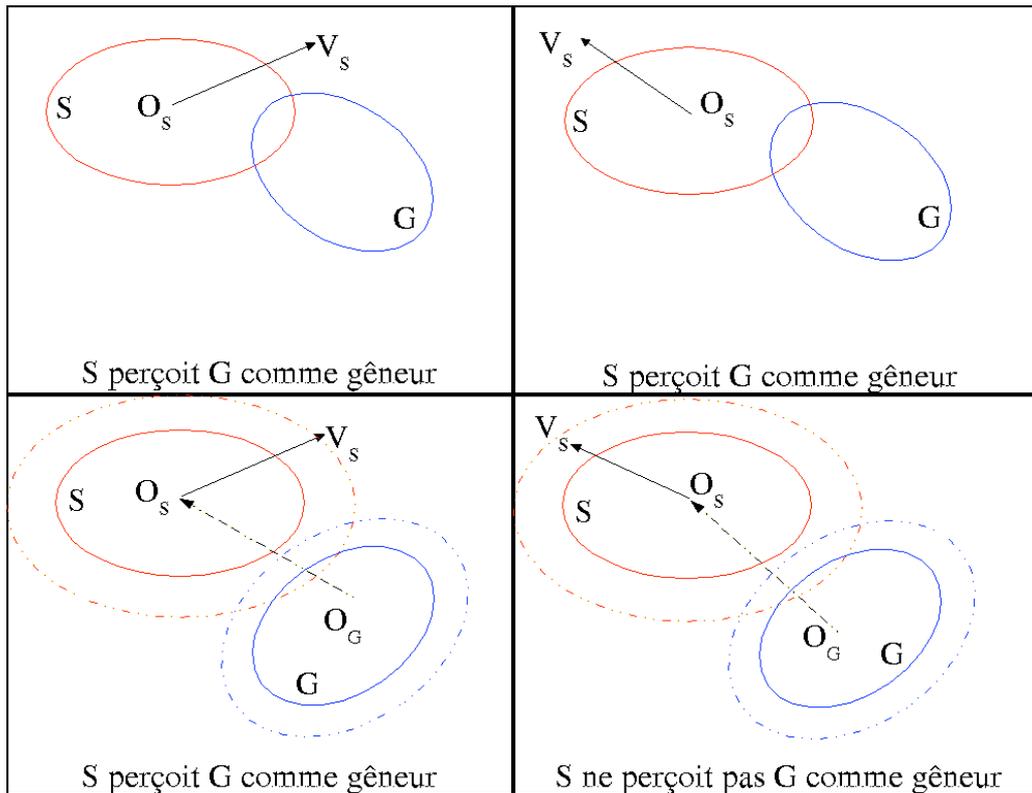


Figure 60 : Différents cas de figure de la perception de gêne

5.4.5.2 Agresser d'autres structures

Cette action consiste simplement à envoyer un message d'agression à une structure qui a plus tôt été perçue comme gêneuse et de rotationnel opposé, ce qui pourra alors enclencher son action de fuite.

5.4.5.3 Fuir

Cette action consiste pour le Tourbillon a :

- Réduire la taille de son ellipse
- Générer sur son pourtour de plus petits Tourbillons voire des particules de même rotationnel que lui

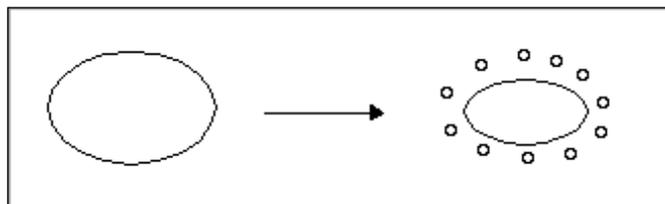


Figure 61 : Fuite d'un Tourbillon

Si la structure fuit, c'est qu'elle a été agressée, c'est-à-dire qu'un tourbillon de rotationnel opposé est proche d'elle et sur une trajectoire d'intersection. Pour gérer plus finement l'interaction mécanique, on génère donc de plus petits Tourbillons voire des particules qui nous permettront de calculer le résultat de cette proximité.

5.4.5.4 Se satisfaire

Les structures détectées ne gardent pas une forme constante dans le temps. Elles peuvent grossir ou au contraire se désagréger. Les redétecter en permanence serait clairement contre-productif. C'est pourquoi elles peuvent « fuir » (ce qui simule la déstabilisation) ou « se satisfaire » : la satisfaction pour nos Tourbillons, c'est grossir³⁵. Ceci peut se faire de deux manières :

- En agrégeant des particules de base
- En s'agrégeant avec une autre structure gênée de même rotationnel.

Voyons tout d'abord le premier de ces deux cas.

Si notre structure a dans son voisinage des particules de même rotationnel, ceci signifie probablement que la structure du fluide à laquelle notre Tourbillon est sensé correspondre est plus large que celui-ci. Il devra alors altérer sa forme pour se conformer de nouveau à la structure.

Il utilisera pour ce faire une méthode qui n'est pas sans emprunter à celle qui lui a donné naissance. Nous commençons par discrétiser l'enveloppe de l'ellipse, c'est-à-dire à générer des particules régulièrement espacées sur le pourtour de l'ellipse. Nous considérons alors les particules situées à l'intérieur de la zone de perception du tourbillon (incluant donc les particules récemment générées sur la frontière), comme on peut le voir Figure 62.

³⁵ Ce qui montre combien ils transcendent les impératifs de leur siècle.

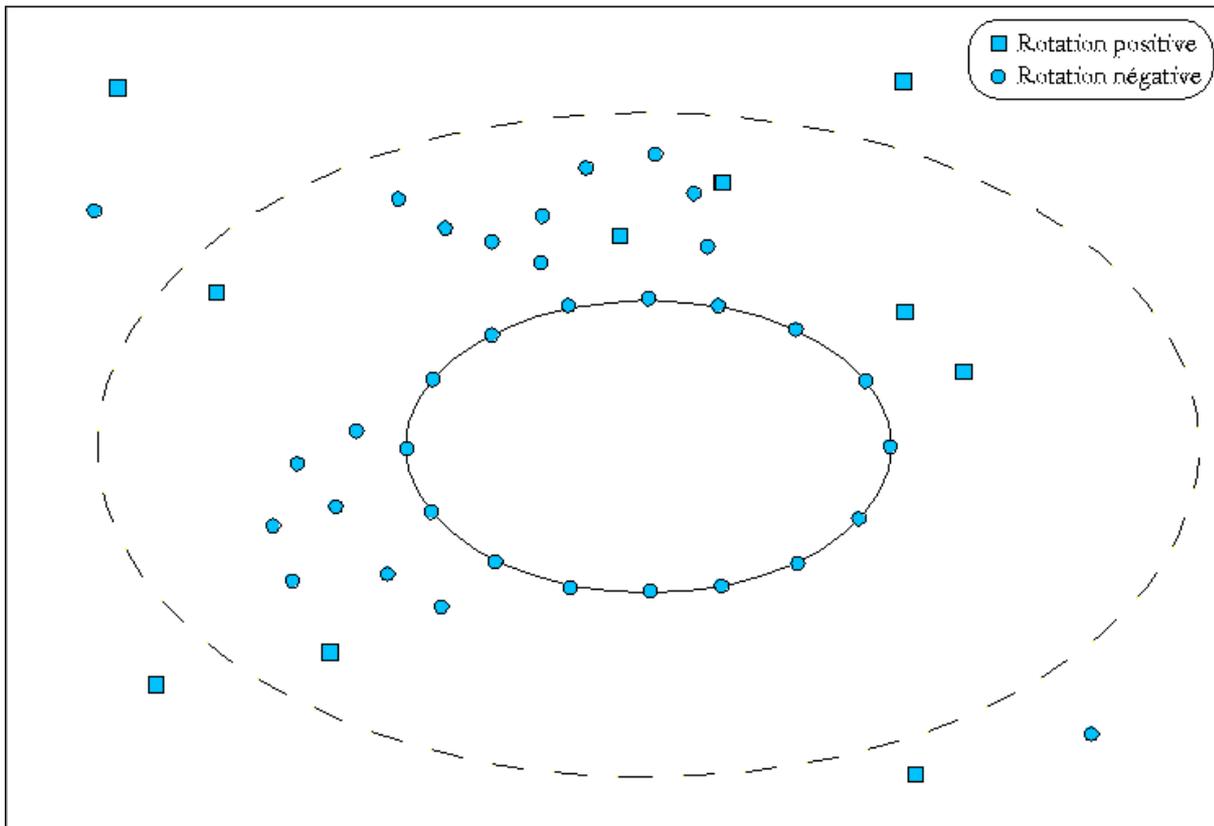


Figure 62 : Particules considérées lors d'une satisfaction

On triangule alors ces particules et cherche ensuite des arbres de recouvrement de poids minimum de racines les particules situées sur l'ellipse. Comme précédemment, on enlève les arcs trop longs ou reliant des particules de sens de rotation opposés. On s'intéresse de nouveau aux triangles dont les sommets sont au sein d'un même arbre (Figure 63) :

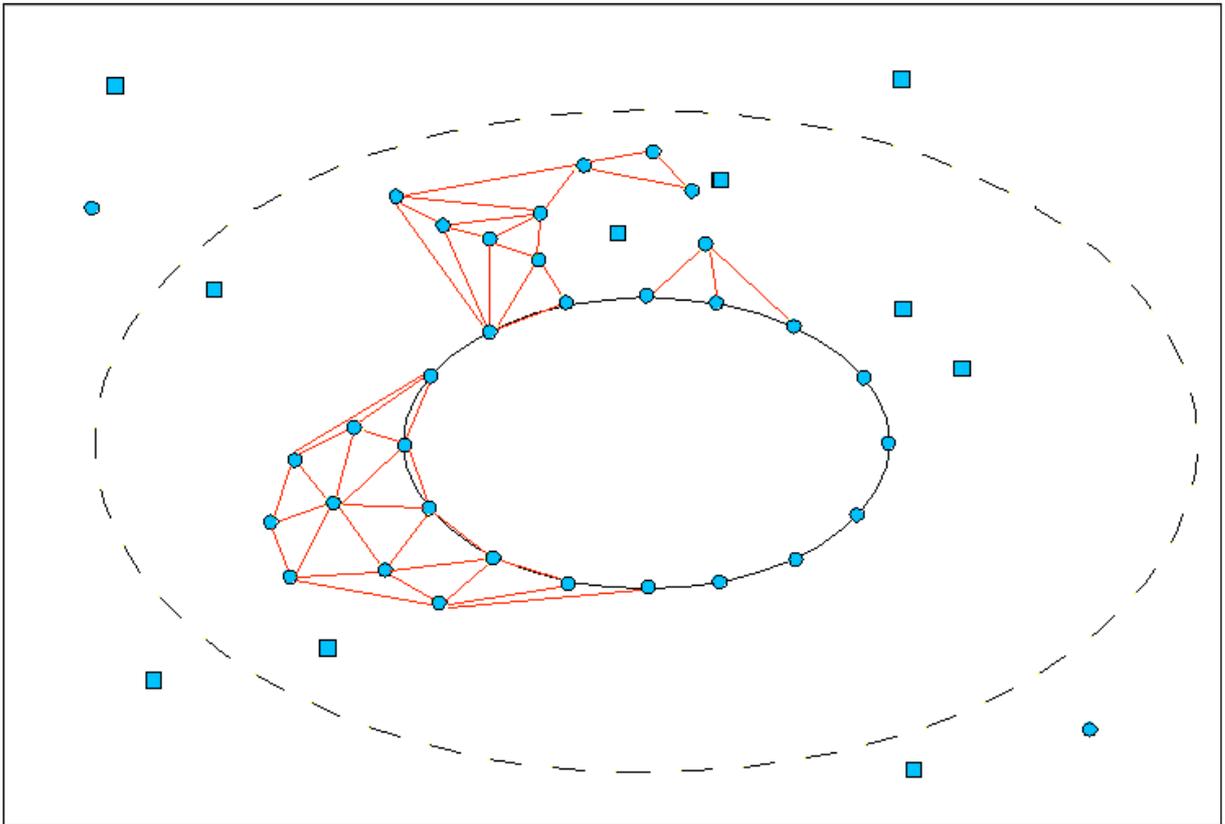


Figure 63 : Particules présélectionnées pour l'assimilation

On élimine enfin les amas obtenus sur des critères de compacité (cf. 5.3.5). Dans l'exemple ci-dessus, on rejettera ainsi les deux amas du haut et gardera celui de gauche. Il nous faut en effet éviter de déformer excessivement le Tourbillon pour quelques particules, ainsi que de gêner celles qui pourraient donner un autre Tourbillon voisin. Celui-ci s'il s'éloigne suivra alors sa vie de structure. S'il reste, il finira par fusionner avec le Tourbillon qui se satisfaisait. Ceci nous amène à la deuxième manière pour un Tourbillon de se satisfaire : il peut fusionner avec ses voisins.

Si deux Tourbillons de même rotationnel entrent en collision, ils vont tenter de se satisfaire ensemble, bref, de fusionner.

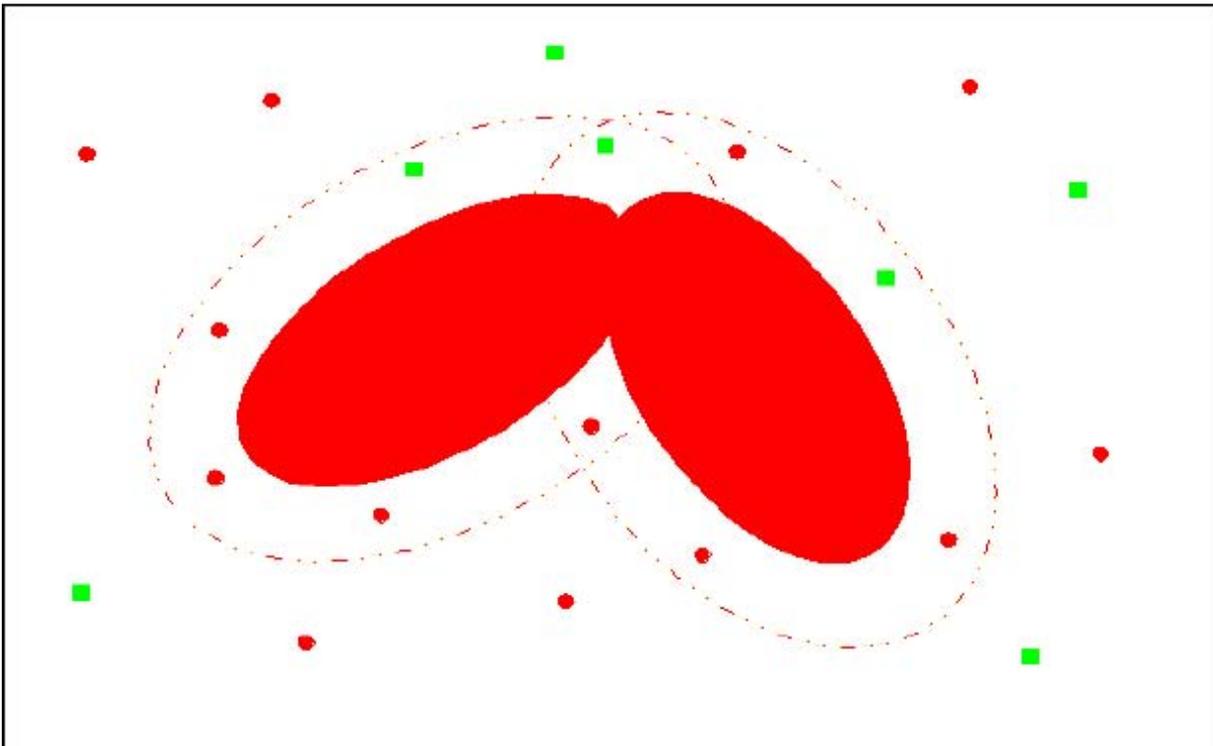


Figure 64 : Deux structures de même rotationnel en collision.

Pour chacune des deux structures, nous générons des particules sur la frontière de l'ellipse, afin de la discrétiser, et nous prenons toutes les particules se trouvant dans les zones d'interactions des deux structures. Puis, nous calculons la triangulation de Delaunay sur cet ensemble de particules, comme le montre la Figure 65.

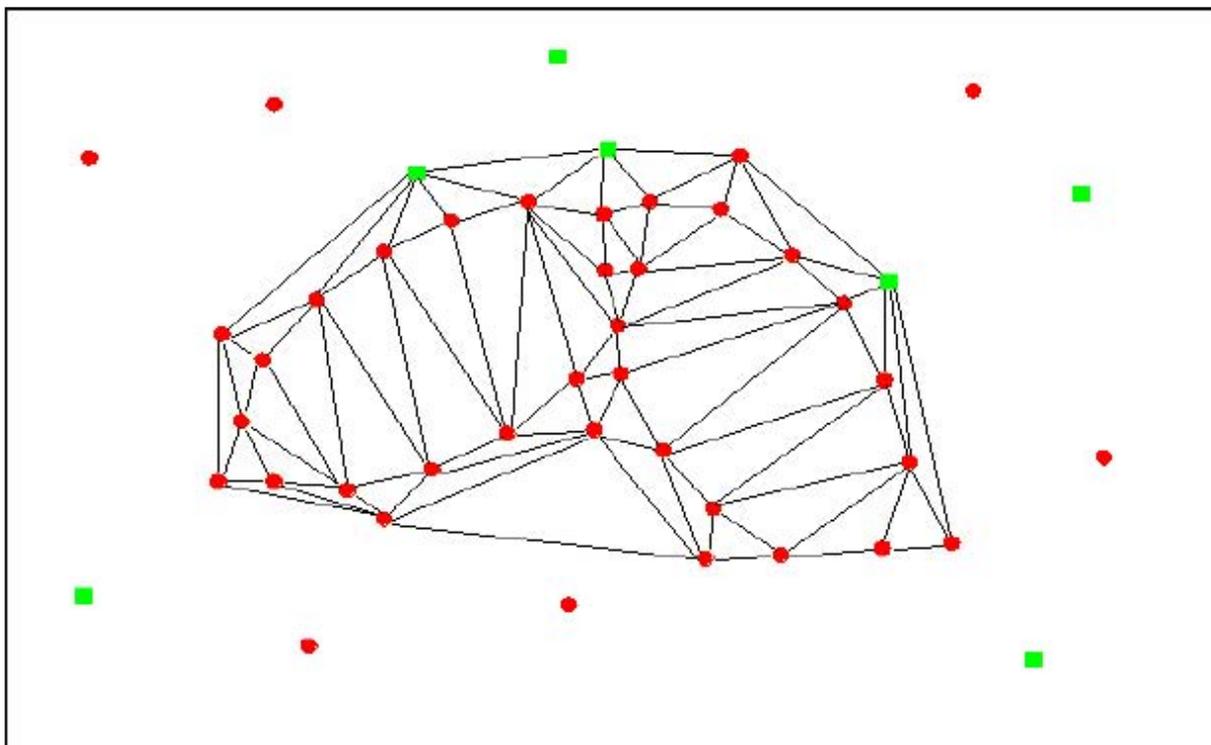


Figure 65 : Triangulation de Delaunay sur deux structures en collision.

Ensuite, à partir de la triangulation de Delaunay, nous recherchons des structures cohérentes denses suivant le processus expliqué précédemment. Nous pouvons avoir deux cas de figure :

- Un seul cluster a été trouvé (celui qui représente la fusion des deux structures)
- Aucun ou au moins deux clusters ont été trouvés

Comme le montre la Figure 66, nous calculons l'aire de l'ensemble des triangles issus de la triangulation de Delaunay et l'aire de l'enveloppe convexe. Sur cet exemple, nous pouvons remarquer que le rapport des deux aires va être assez proche de 1.

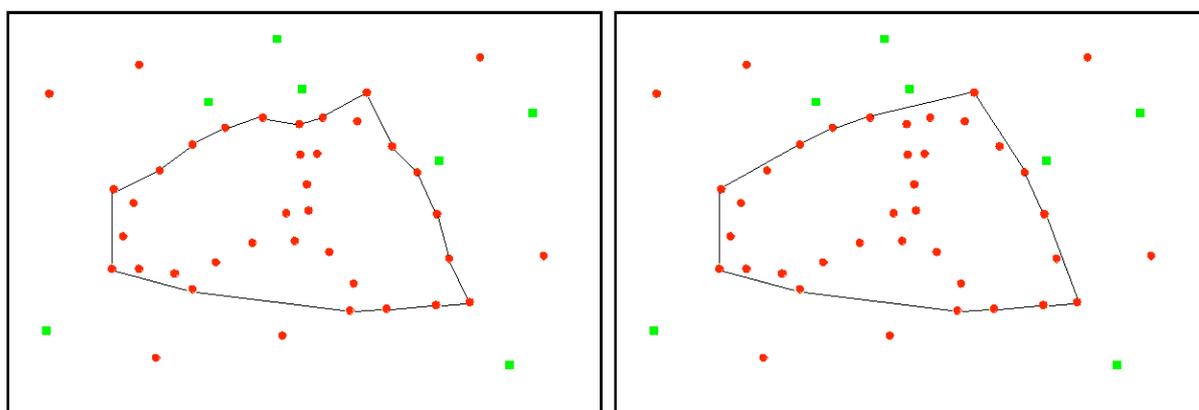


Figure 66 : Rapport des aires

Ce cluster est formé des particules générées sur la frontière de chaque ellipse et peut aussi contenir des particules de même rotationnel que les structures se trouvant dans l'une des deux

zones d'interactions. Enfin, à partir de l'enveloppe convexe du cluster, nous faisons une identification par une ellipse, comme le montre la Figure 67.

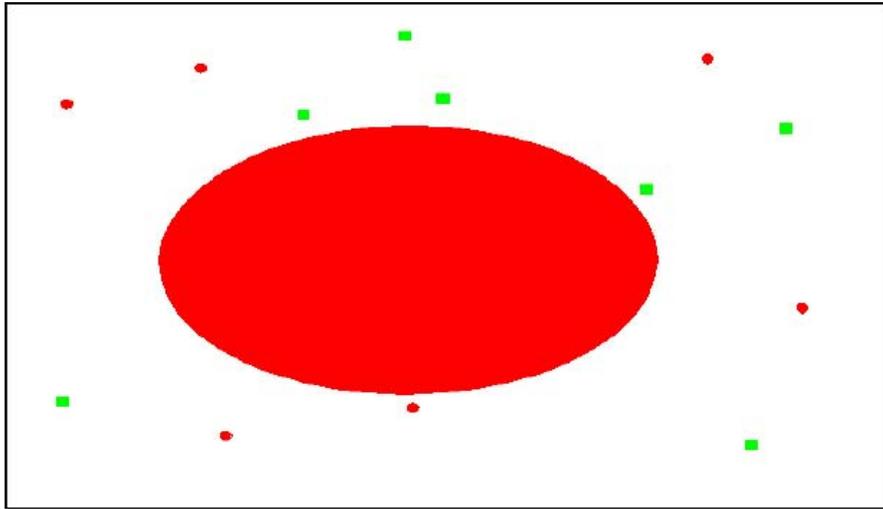


Figure 67 : Fusion réussie

Nous obtenons ainsi une nouvelle structure dont la vorticité est la somme des vorticités des deux structures et des particules absorbées. Les particules se trouvant dans les deux zones d'interactions des structures en collision qui n'ont pas été absorbées constituent les particules voisines de la nouvelle structure.

Voyons à présent ce qui se passe si on a trouvé 0 ou au contraire au moins deux clusters.

Dans ce cas, l'ensemble composé des particules générées sur la frontière de chaque ellipse ne représente pas une nouvelle structure cohérente dense en formation. Nous considérons donc ces deux structures comme deux structures de rotationnel opposé (voir la perception "Percevoir des gêneurs"). Ainsi chaque structure applique-t-elle l'action "Fuir" jusqu'à ce qu'elles ne soient plus en collision.

5.4.6 Déplacements

Si l'éco-agent règle la vie sociale du Tourbillon, qui correspond notamment à sa stabilité, celui-ci possède également des caractéristiques mécaniques. Il se déplace notamment linéairement comme une particule de vorticité placée au centre de l'ellipse (intersection des diamètres). Il tourne en plus autour de ce centre à une vitesse angulaire égale à la vorticité.

Les particules voient ces Tourbillons comme des particules, et leur trajectoire en est affectée en fonction des lois de Biot Savart. Les Tourbillons eux ont un rapport plus compliqué aux particules. On a vu (5.4.5.4) qu'ils se nourrissent des particules de même sens de rotation qu'eux. Les lois de Biot Savart vont faire que le vortex va avoir tendance à repousser les particules de rotationnel opposé, mais elles ne garantissent pas l'absence de contact, a fortiori si la structure a un grand diamètre par rapport à sa vorticité. Si une particule du signe opposé pénètre un Tourbillon, on la dissipe et baisse la vorticité du Tourbillon d'autant. Cela peut éventuellement mener à sa dissipation.

Quant aux autres structures, on a vu dans les paragraphes comment leurs éventuelles collisions étaient gérées (agression ou satisfaction suivant les signes des vorticités). De manière générale, nous essayons de respecter notre ligne directrice d'un changement d'échelle « infiniment » itérable, en créant par exemple des structures de plus grandes ou plus petites tailles suivant les actions de l'éco-agent. Néanmoins, nous « bootstrapons » cette itération au niveau particulière, ce qui coûte de petites entorses à la métaphore (les particules sont parfois, comme dans l'exemple ci-dessus, traitées d'une manière particulière).

5.4.7 Obstacles

Nous gérons dans la simulation certains obstacles non fluides. Ceux-ci sont étanches et indéformables. Les obstacles implémentés sont soit plans (bord d'un écoulement par exemple) soit elliptiques, parce que ce sont les formes les mieux étudiées dans la littérature.

Les obstacles ont une zone d'interaction qui les entoure, d'une manière tout à fait similaire à celle des Tourbillons (cf. Figure 59). Quand une entité porteuse de vorticité (particule ou structure) pénètre dans cette zone, l'Obstacle génère une particule virtuelle, de vorticité de même valeur absolue mais de signe contraire à celle de l'entité entrante, située au symétrique par rapport au bord de l'obstacle de ce porteur de vorticité entrant (pour les structures on suppose une vorticité concentrée en son centre : c'est par rapport à celui-ci qu'on génère la particule virtuelle). L'introduction de ces particules virtuelles correspond à la matérialisation de la condition aux limites sur l'obstacle qui doit satisfaire à une composante normale (à la frontière) nulle pour la vitesse.

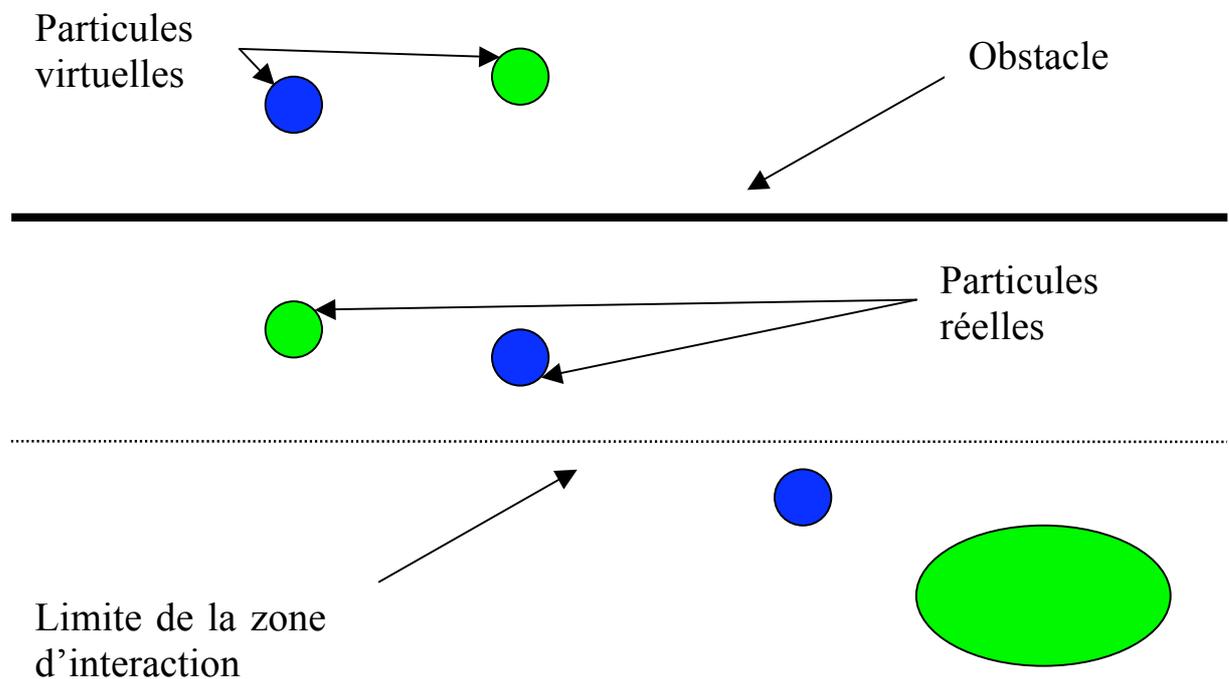


Figure 68 : Gestion d'un obstacle plan

Limite de la zone
d'interaction

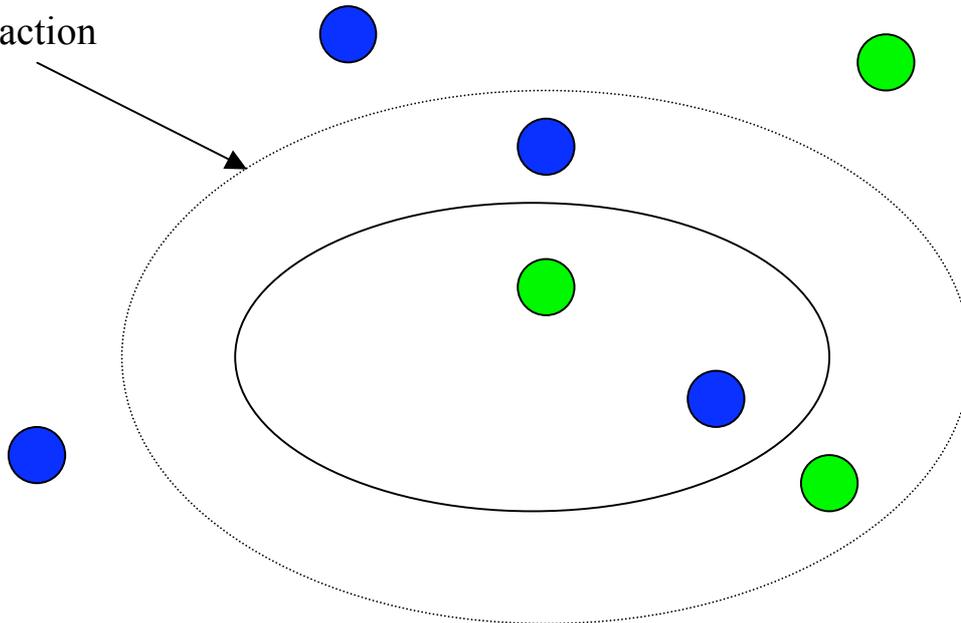


Figure 69 : Gestion d'un obstacle elliptique

Un Tourbillon générera comme on l'a dit une particule virtuelle importante destinée à le repousser. Si néanmoins il reste sur une trajectoire de collision avec l'Obstacle, celui-ci le fera fuir (au sens de l'éco-agent). Ceci se produit néanmoins peu souvent, les lois de Biot Savart faisant que deux particules proches de rotationnels opposés annulent la composante de leur vitesse colinéaire au vecteur qu'elles forment. Ainsi par exemple si une particule s'approche de l'obstacle plan, sa composante normale au plan sera annulée : la particule ou la structure auront ainsi tendance à « rouler » sur le plan. On observe la même chose sur un obstacle elliptique.

5.5 Perception et environnement

5.5.1 Gestion dynamique par grille : les N-trees.

Les êtres vivants, comme tout système complexe ouvert, sont en interaction avec leur environnement. Une de ces interactions est la perception. Ainsi par exemple un chat peut voir une souris au loin, l'entendre de moins loin et la sentir d'un peu plus près.

Les agents informatiques sont des métaphores calculables de l'approche biologique « individu centrée ». Ils sont donc généralement dotés d'une « perception ». Une approche entièrement locale consiste pour un agent en la perception de son environnement par la communication potentielle avec tous les autres agents, puis l'élimination de ceux par exemple situés trop loin. Mais ce n'est ni efficace, ni plus cohérent avec le paradigme du situé : les individus biologiques ne procèdent pas ainsi ; ils baignent dans des flux porteurs d'informations, tels que la lumière pour la vue ou l'air ou l'eau pour l'ouïe ou l'odorat.

Aussi, même si notre approche est plutôt locale, utilisons-nous des entités globales de gestion de l'environnement. L'espace de simulation est ainsi découpé en grilles imbriquées les unes dans les autres. Plus précisément, nous utilisons une version à dimension variable des octrees / BSP trees, baptisés *N-trees*. Nous allons les décrire formellement avant de donner un exemple simplifié de leur fonctionnement pour mieux comprendre celui-ci. Si on préfère commencer par un exemple avant de lire la description, qu'on se reporte au paragraphe ci-dessous avant de revenir ici.

Les feuilles rectangulaires de cet arbre hébergent chacune un certain nombre d'entités de la simulation, en fonction des coordonnées spatiales de celles-ci. Lorsqu'un certain seuil de population d'une feuille est atteint, on divise celle-ci en un certain nombre de sous-feuilles. L'ancienne feuille devient au moins temporairement un *pétiole*, un nœud dont tous les fils sont des feuilles, et qui connaît la population totale de toutes ses feuilles. Si tous ses fils restent des feuilles, quand cette population redescend sous un certain seuil, il dissout ses feuilles filles et réincorpore les entités qu'elles géraient, devenant au passage une feuille. Si au moins une de ses filles est devenue pétiole voire nœud ordinaire, lui devient un nœud ordinaire. Il se peut qu'il reste ainsi, ou bien redevienne pétiole ou feuille suivant l'évolution de la simulation.

On peut voir une capture d'écran affichant ces grilles Figure 70 ³⁶. On y devine la racine qui recouvre tout l'espace de simulation. En son sein on distingue des zones peu peuplées à gauche, dont les cases sont grandes, alors qu'une densité de particules en spirale entraîne une bien plus grande densité de cases autour du centre.

³⁶ Cette capture a un style graphique différent de celles précédemment incluses dans ce mémoire, car elle provient d'une autre implémentation.

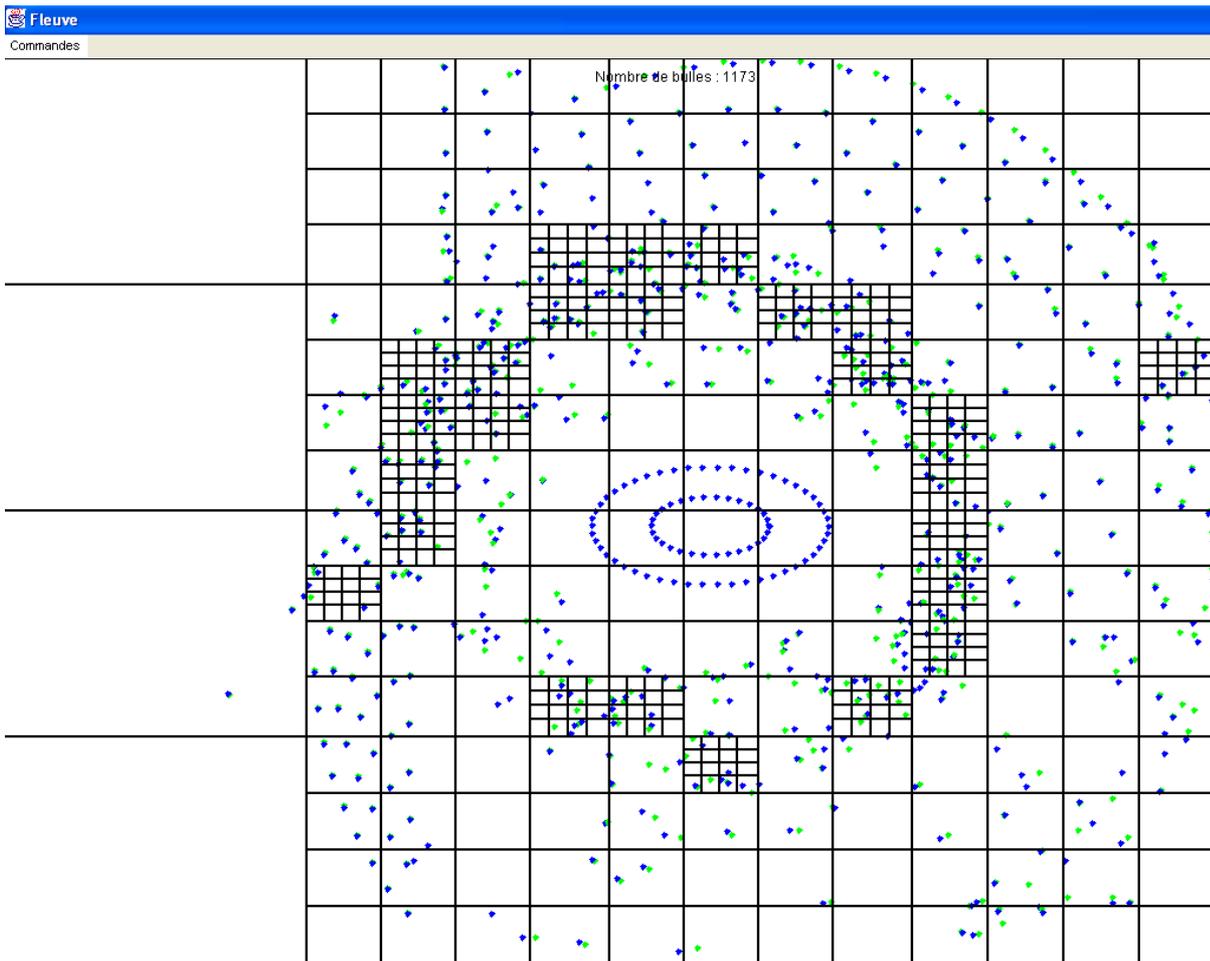


Figure 70 : Exemple de N-Tree

On a donc trois types de nœuds :

- les feuilles, nœuds sans enfants, qui gèrent des entités de simulation
- les *pétiotes*, nœuds dont tous les enfants sont des feuilles, qui connaissent la population totale gérée par celles-ci
- et les ordinaires, nœuds dont les enfants sont au moins un pétiote ou ordinaire.

Tant qu'une entité ne change pas de case, la gestion au tour par tour de celle-ci par le N-tree est peu coûteuse, puisque ne dépendant pas d'autres entités. Cette partie est donc de complexité algorithmique linéaire par rapport au nombre d'entités.

Quand une entité change de case, il faut la réattribuer à une nouvelle case, ce qui se fait en un temps proportionnel à la hauteur de l'arbre, qui vaut au pire cas moins de $\log_N(\text{nombre d'entité de simulation})$.

5.5.2 Exemple simple de Ntree

| | | | | |
|----------|----------|--------------|--------------|------------|
| a | c | d | e | |
| | f | i j k | | l m |
| | | n o | p q r | |
| b | | | | |

Figure 71 : Représentation simplifiée d'un Ntree

Considérons l'exemple ci-dessus. Les lettres y figurent différentes particules, les cases des nœuds du Ntree, qui est en l'occurrence un 4tree. L'arbre en question est alors le suivant :

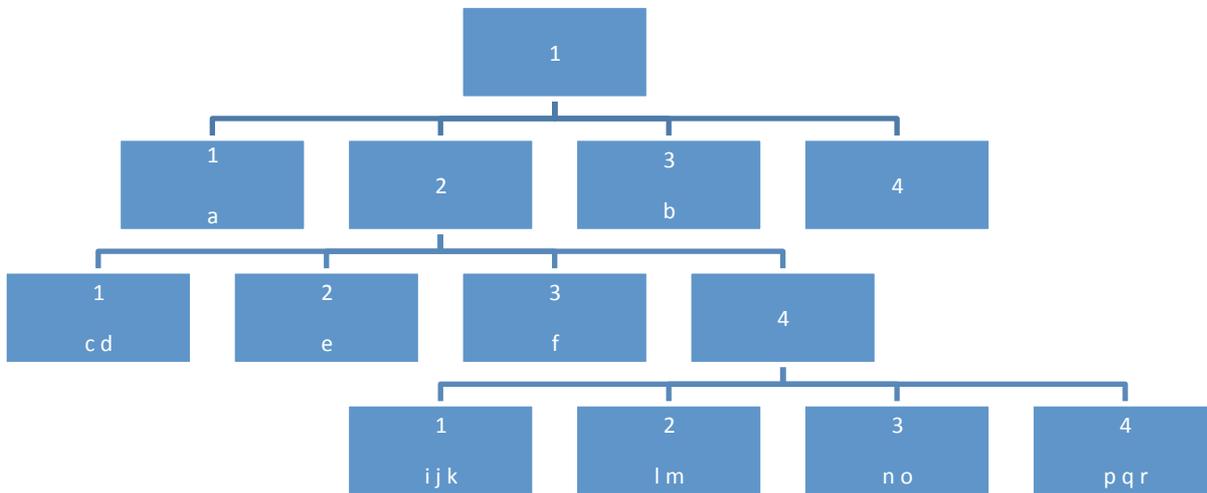


Figure 72 : Ntree résultant

Le nœud 1. 1 est une feuille, car il n'a pas de descendant, et qu'il est en charge d'entités de simulation (la 'a' en l'occurrence). 1.2.4 est un pétiole, puisque tout ses enfants sont des feuilles. 1.2 est un nœud ordinaire, puisque certaines de ses enfants sont des feuilles mais d'autres non.

Si on a commencé par lire l'exemple, on peut à présent retourner à la définition ci-dessus.

5.5.3 Une perception heuristique mais rapide pour les entités.

On cherche donc par ces N-trees à permettre aux entités de la simulation de percevoir leurs alentours d'une manière plus rapide que proportionnelle au carré du nombre total d'entité de la simulation.

Prenons l'exemple d'une particule qui aurait besoin de connaître les particules « suffisamment » proches d'elles. La méthode brutale consiste en calculer la distance la séparant de toutes les particules, puis de ne conserver que celles qui soient à une distance inférieure à une certaine borne. La méthode que nous proposons consiste à rechercher les particules qui sont dans des *cases* suffisamment proches. On a alors un tri sur bien moins d'élément à faire.

Concrètement, la particule demande à la case qui la prend en charge de chercher ses particules voisines, en lui fournissant une définition numérique de ce voisinage. La case transmet alors

5.6 Utiliser les N-trees pour détecter des organisations denses : DOD

la demande à la Mère de Toutes les Cases, qui recherche par subdivision les cases dont le centre est suffisamment proche de la particule.

La recherche est rapide, car non seulement il y a un ordre de magnitude entre le nombre de cases et celui de particules, mais aussi parce que la subdivision élimine des branches entières de cases qui n'auront jamais à être explorée. On passe alors d'une recherche en O (nombre de particules) à une en approximativement $O(\log_N(\text{nombre de particules}))$.

La réponse sera par contre heuristique, puisqu'elle dépendra de la finesse des cases. Néanmoins, plus l'entité a de voisines, plus la réponse sera précise (car alors les grilles seront plus finement subdivisées), ce qui correspond à ce qu'on cherche.

La Figure 73 illustre ce procédé, dans un écoulement peu dense. La particule rouge plus grosse au centre du disque noir est la particule dont on cherche le voisinage. Le disque noir est l'ensemble des points du plan situés à moins de la distance recherchée. Les particules rouges sont celles estimées « suffisamment près » par l'algorithme.

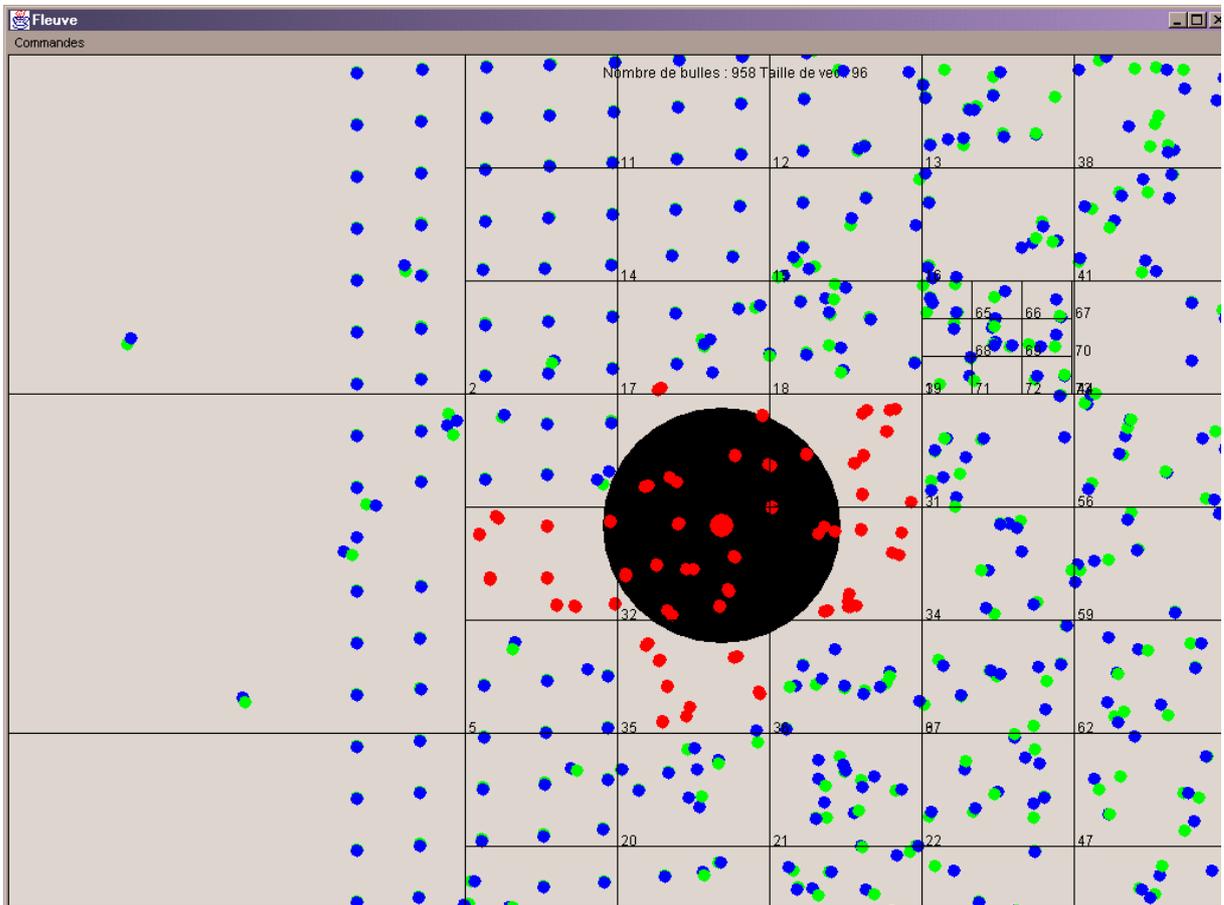


Figure 73 : Perception heuristique d'une entité

5.6 Utiliser les N-trees pour détecter des organisations denses : DOD

Lorsqu'on observe la Figure 70 on s'aperçoit que les grilles des N-trees, lorsqu'elles sont dessinées, mettent visuellement en évidence les distributions de densité en entités de simulation dans l'espace de simulation. Nous avons alors créé une méthode de détection

Chapitre 5 Simulation d'écoulement fluide

d'organisations denses, DOD, qui tente de calculer ces regroupements que l'œil perçoit. Voyons comment elle fonctionne.

On cherche à identifier un groupe relativement compact d'entités dense dans l'espace de simulation, ou bien encore d'entités situées dans des régions de cet espace où les entités sont plus nombreuses que dans les régions les entourant. Une méthode intuitive serait de rechercher les gradients de densité lorsqu'on en a besoin : on lui a préféré une méthode répartissant le travail sur la gestion au tour par tour de la simulation, plutôt que lors d'un pic de calcul.

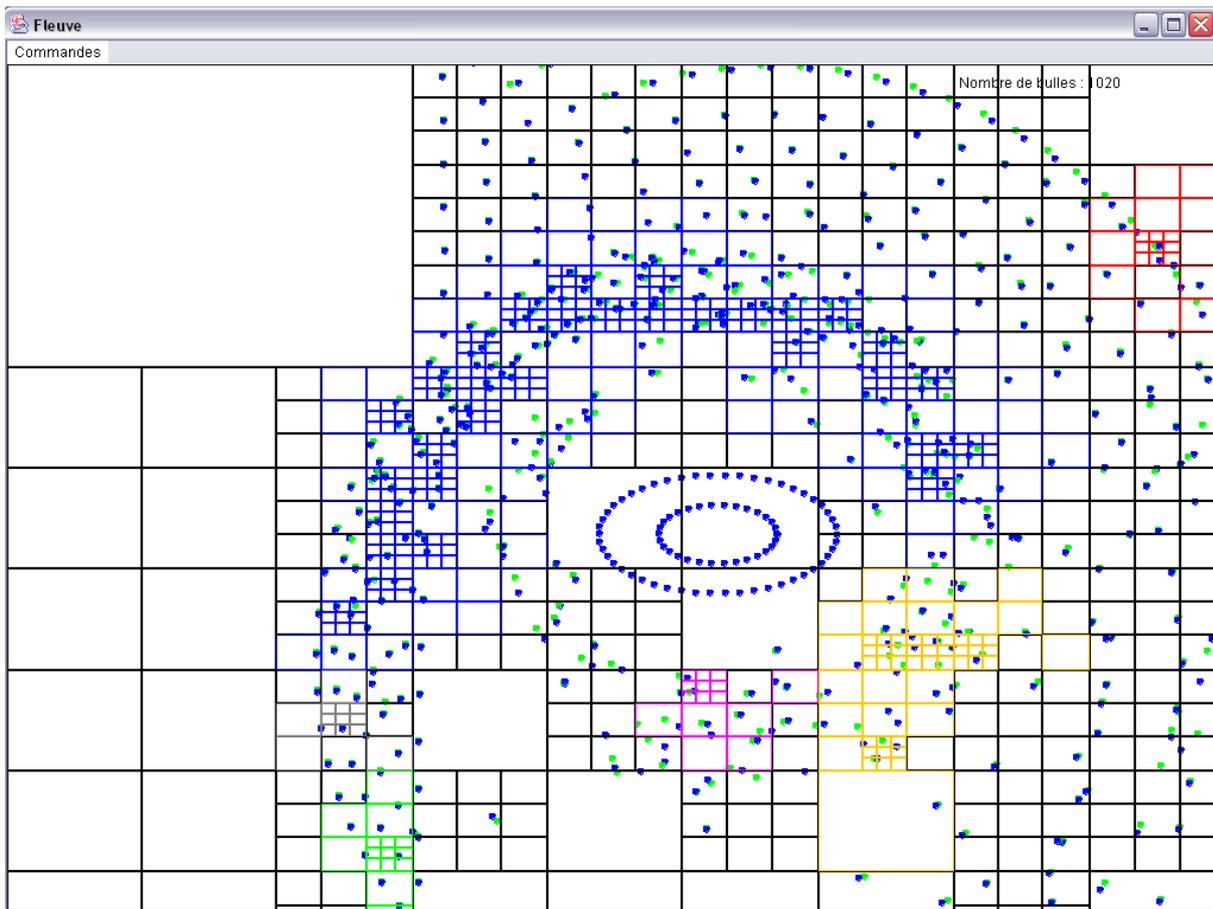


Figure 74 : Organisations détectées par DOD

A chaque création de grille, celle-ci est inscrite dans une courbe de niveau correspondant à sa hauteur dans l'arbre. On se souvient de plus qu'une plus grande densité en entités de simulation entraîne une plus grande densité de grille : ces grilles sont donc plus hautes dans le N-arbre. On a alors immédiatement les données de répartition de densité dans l'espace que l'on souhaite : les populations les plus denses sont dans les feuilles des courbes de niveau les plus hautes. Cela ne suffit bien sûr pas : toutes les entités appartenant à une population de même densité ne sont pas nécessairement membre d'une même organisation. On peut avoir des pics de densité simultanément à différents endroits de l'espace de simulation. Il reste

5.6 Utiliser les N-trees pour détecter des organisations denses : DOD

ensuite à regrouper les entités au sein de leur courbe de niveau par leur proximité spatiale relative, grâce à un algorithme de clustering hiérarchique par agglomération adapté à la situation (on pourra consulter [The 00] pour une présentation de cette famille d’algorithmes). Toujours à des fins d’efficacité, c’est la notion de distance de perception décrite dans 5.5.2 qui est utilisée.

```
public static Vector chercheAmas() {

    Vector bigMess, shrinkingMess;
    Vector groupeCourant;
    Vector lesAmas;

    bigMess = Grid.courbeNiveau(Grid.allCourbes.size() - 1);
    for (int i = 0; i < bigMess.size(); i++) {
        if (!(Grid) bigMess.elementAt(i).feuille) {
            bigMess.remove(bigMess.elementAt(i));
        }
    }
    shrinkingMess = new Vector(bigMess);
    lesAmas = new Vector();

    /* Maintenant qu'on a un bigMess bien propre, on va le parcourir. Pour
    chaque Grid qu'il contient, on va chercher les Grids voisines de celle-ci.
    On ajoute aux amas le groupe de Grid obtenue. Pour chacun des éléments de
    celle-ci, on cherche s'il n'y a pas un Amas la contenant (par construction,
    il ne peut en avoir deux), et si oui on recopie les éléments de cet amas
    dans notre groupeCourant. Sinon on enlève l'élément en question de
    shrinkingMess*/

    for (int décompte = 0; décompte < bigMess.size(); décompte++) {
        Grid courant;
        courant = (Grid) bigMess.elementAt(décompte);
        groupeCourant = courant.grillesProches(bigMess);
        lesAmas.add(groupeCourant);
        for (int i = 0; i < groupeCourant.size(); i++) {
            if (shrinkingMess.contains(groupeCourant.elementAt(i))) {
                shrinkingMess.remove(groupeCourant.elementAt(i));
            } else {
                for (int j = 0; j < lesAmas.size(); j++) {
                    if (lesAmas.elementAt(j) == groupeCourant) {
                        continue;
                    }
                    if ((Vector)
lesAmas.elementAt(j)).contains(groupeCourant.elementAt(i)) {
                        ((Vector)lesAmas.elementAt(j)).removeAll(groupeCourant);
                        groupeCourant.addAll((Vector)lesAmas.elementAt(j));
                        lesAmas.remove(j);
                        j--;
                    }
                }
            }
        }
    }
    return lesAmas
}
```

Figure 75 : Extrait du code de clustering

Chapitre 5

Simulation d'écoulement fluide

Le nombre de courbes de niveaux qui composent les plus grandes hauteurs, celles retenues, peut être fixé comme on le désire, pour trouver un équilibre entre le signal et le bruit. Le niveau généralement utilisé est une proportion de la hauteur de l'arbre des N-trees.

5.7 Combiner DOD et DSE

Au cours des versions de la simulation utilisant DSE, se déroulent deux grandes catégories de changement d'échelle. Une a lieu lors de l'utilisation de DSE, quand les particules sont examinées pour voir si certaines d'entre elles sont composées en une structure elliptique. L'autre a lieu au sein des agents Tourbillons, au fur et à mesure de leurs satisfactions et de leurs fuites. Un problème de réglage important qui s'est posé à nous est celui du tempo de DSE : à quelle régularité fallait-il refaire une détection ?

Il faut en effet un certain temps à une structure pour se composer. Aussitôt après une étape de détection DSE/réification, les particules restantes ne sont pas structurées. On ne peut néanmoins laisser alors toute la prise en charge des futures structurations aux seuls agents Tourbillons : au cours du temps peuvent se rapprocher des particules initialement distantes qui se structurent alors dans une zone de l'espace distante de tout agent. Il faut alors relancer DSE.

Ainsi, ne pas exécuter DSE assez souvent amène à une gestion de l'échelle insuffisante (des structures émergent et ne sont pas détectées/réifiées). L'exécuter trop souvent par contre alourdi la simulation, puisque, si on appelle N le nombre de particules de la simulation, DSE est d'une complexité algorithmique en $O(N \log N)$.

DOD de son côté s'exécute rapidement : les N -trees qui le sous-tendent augmentent la constante multiplicative de la complexité de la simulation, mais ne lui font pas franchir une catégorie. La détection elle-même qui s'y ajoute est également en $O(N \log N)$, mais à la différence essentielle que N est alors le nombre de cases d'une certaine profondeur, nombre substantiellement inférieur à celui de particules.

Par contre DOD paye une plus grande généralité par une moindre efficacité dans la détection de structures tourbillonnaires elliptiques. Aussi essayons-nous actuellement de combiner ces deux méthodes, en ne lançant DSE que dans des zones et à des moments où DOD a détecté des organisations denses : celles-ci sont possiblement des structures tourbillonnaires, ce sur quoi DSE nous renseigne alors.

Cette coordination est en cours de développement par Sylvain Lerebourg et moi-même.

CHAPITRE 6

A MODELLING METHODOLOGY TO HANDLE ESTUARIAL ECOSYSTEM COMPLEXITY

Résumé

Nous incluons dans ce chapitre un article collectif soumis à la revue Hydrobiologia décrivant les rapports entretenus par la partie hydrodynamique de nos travaux et celle plus générale sur les écosystèmes.

A Modelling Methodology to Handle Estuarial Ecosystem Complexity

Cyrille Bertelle Sylvain Lerebourg Damien Olivier Guillaume Prévost Pierrick Tranouez

L'article débute par un abstract. Il contient sa propre bibliographie (qui est bien sûr à intersection non vide avec la générale)

6.1 Abstract

We use a model of estuarial ecosystems where we represent them as complex systems where interactions of various nature and space time scale take place. It is indeed an ecosystem under a strong human influence, consisting in entities of various natures, for instance biological or chemical, interacting in non trivial ways (e.g. non linearly, with many feedback loops). This is why ecosystems are often described as having properties of self-organization, meaning that properties of higher levels of description "emerge" from interactions taking place at lower scales, the link between both being at best uneasy to describe. Using law-based approach, most of the time, differential equations, is therefore difficult and rules-based approach, individual-based models or multi-agent systems, may give a better local description of spatial phenomena. We based our model on the holarchic (e.g. non directional hierarchic) nature of the ecosystems. First, aquatic ecosystems are crossed by structuring fluxes (energy, mass transport, etc.) which are mainly conveyed by fluid flows. So, we propose to model these fluid flows with a multiscale simulation detecting emergent formation and managing them on different scales. Second, a part of aquatic ecosystems are species organizations called food chains. These ones are themselves interacting complex subsystems with multi non-directional retro-actions between them and their environment. These retroactions can be modeled at different levels. Thus, we propose an hybrid holarchic compartmental model. This one aims at providing the framework for multi-model, multi-level simulation of parts of ecosystems. Based on these conceptual descriptions, we propose a methodology which leads to build a virtual laboratory where biologists can describe a specific situation (an interaction network of aquatic animals living in estuarial environment) with an adapted interface. We use a middleware called Protégé 2000 to build a meta-ontology as a classical three-part ecosystem based on the following behaviors: producers, consumers and detritivors. A hierarchic description of entities is used, following the holarchic and compartmental model, to build individuals or different type of aggregations, super-individuals, compartments or emergent systems. The building of an effective ontology using this tool by biologists provides a virtual world which is then implemented over a computer network. We propose for this distributed computation using Pro-Active library which is conceived for the dynamic migration of code. We finally present a first elementary simulation for a food chain simulation using this methodology and based on the proposed models.

6.2 Ecosystem are complex multi-scale system

The crafting of the word *ecosystem* is owed to botanist Tansley (Tansley, 1935), who defines them so : "The more fundamental conception is ... the whole system (in the sense of physics) including not only the organism- complex but also the whole complex of physical factors forming what we call the environment. We cannot separate them (the organisms) from their special environment with which they form one physical system ... It is the system so formed which [provides] the basic units of nature on the face of the earth ... These ecosystems, as we may call them, are of the most various kind and sizes."

Usually, ecosystems are described as a biotope and a biocenosis in mutual interaction. They are crossed by fluxes (mass transport or energy) which dynamically structure them. An exceedingly reductionist approach fails in modeling such mutual interactions and feed-back processes. New approaches based on General System Theory concepts have therefore been tried to produce more efficient models.

6.2.1 *Studying ecosystems using general system theory concepts*

Ecosystems are systems as described in the General System Theory (Bertalanffy, 1968) and can be seen as a set of interacting elements which are characterized by the following aspects:

- **Mutual dependence.** Each element is directly linked with other elements in structure or dynamic. Therefore, its evolution depends on the other elements in interaction with it. Finally, separating an element from its neighborhood modifies it.
- **Emergence of organizations.** The interaction of elements leads to the emergence of natural organizations which generate “new entities”. Those entities differ from their components in their structure and dynamic.
- **Feed-back processes.** This is a retroaction of the emerged organizations on its components.

Emergence processes act recursively and generate hierarchical systems organization. Koestler (Koestler and Smythies, 1969) describes this kind of systems as SOHOS, which stands for Self Organized Holarchic Open Systems. A holarchy is a kind non-directional hierarchy whose members are "relative wholes" called holons. This hierarchy is based on inclusions, such as from cells to organ to organism, or simply functional relationships, like predator and preys. One can read (Kay, 2000) for more details on the modern use of SOHOS for ecosystem modeling.

If we consider the previous characteristic aspects of ecosystems, an adapted definition of ecosystems could be: “biotope+biocenosis”, natural multi-level holarchic systems, crossed by structuring fluxes.

Ecosystems as holarchic systems, must be studied at many levels of time and space (each level is significant) and are crossed by fluxes. Many tools exist to model and to simulate ecosystems (Grim, 1999). Those tools differ by the nature of the model they use, the level they describe and the phenomena they directly take into account. Thus, they mainly focus on one aspect of the ecosystem. Therefore, gathering all these models is a hard task due to structural differences between these tools. Mixing these models is seldom theoretically feasible, and when it is, the computation of the resulting simulation is often crippled by a terrible computation time.

Unfortunately, raising the number of interactions modeled is the concern of most modelers. We aim at providing a model which would facilitate the gathering of models for simulating aquatic ecosystems in a multi-scale description.

6.2.2 *Law-based models vs. Rule-based models*

We give in the following part, a possible classification by considering two main categories of models: law-based and rule-based ones. Then, we explain why we finally proposed a mixed model.

Law-based models are the most classical models in sciences. Koyré defines a law as “what does not change when everything does”. In fact, law-based models are often continuous in

6.2 Ecosystem are complex multi-scale system

space and time and rely upon mathematical tools, mostly differential equations and analytical models. The level of description is always global with global variables on which we apply the equations of the model. For example, in ecology, population models using the well-known Malthus or Verhulst equations are law-based.

Other approaches use rule-based models. This class of models doesn't sum up a global behavior of the phenomenon in a few equations. With this approach, some entities and their behaviors are described by a set of rules. Well-known models of this class are systems of formal deduction and compilers. These models are also used in simulation. In this context, to apprehend the whole trajectory of the global behavior, we have to compute all the concurrent rules concerning a set of constitutive entities of the phenomenon. The level of description is in this case local, so that spatial aspects of the model can be considered. Finally, rule-based models naturally take into account local variation and adapt to those changes. This approach is well adapted with computing simulation and less adapted to analytic resolution, unlike law-based. The rule-based models have been popularized with game theories and are now frequently used in biology or social sciences. With improvements of computer technologies, ecology found efficient models in such approaches and developed more recently Individual-Based Models (IBM) (DeAngelis and Gross, 1992a) which can be classified as Rule-based models.

6.2.3 *Mixed models for ecological purposes*

Both types of models are very useful in ecology depending on what phenomena and environments are represented. Moreover, they present particular features making them complementary.

- Global events occurring with little variability due to environmental changes are precisely modeled with law-based model. The discretization of rule-based model would induce a loss of information when applied to those phenomena.
- Environmental dependent events and especially spatial ones can't sometimes be correctly modeled with law-based methods. Owing to their nature, rule-based models may cope better with the local and environmental variations.

In IBM, individuals can be represented (Haefner, 1992) as a set of i-state (individual state or values). Moreover, in law-based models, global variables are used and could be seen as environmental states (e-state). Therefore, an ecosystem could be globally described as a set of e-states. Most of the time, IBMs use those variables to modify their own states according to their rules. That way, we unify the two kinds of models with a single representation. Finally, some law-based models don't consider e-states but p-states (for population state). Thus, they model some features of a population on a global level. The global state is a linear combination of its own individual states. Therefore, we consider each element of our model as a set of states (e-states, i-states or p-states).

6.2.4 *Changing the scale: means and goals*

Ecosystems are multi-scale by nature and links (or interactions) between those scales are as important as what they contain (individuals for example). Thus, when studying an ecosystem,

one should choose many levels of description, define the interactions between those levels and ideally redefine the scales during the simulation.

We may insist on two advantages of using multi-scale models. First, realistic simulation of ecosystems or at least parts of ecosystems should include an important number of simulation entities. This can prove difficult to handle properly. Distinguishing organizations among these entities can reduce the number of these lower-level components, and thus decrease the complexity of managing this wealth of entities. Second, multi-scale model gives pertinent information to describe systems in term of general system theory. As we described before, organizations emerge from the interaction between the entities of the systems. The structures, their behaviors, the relations of those systems differ from their constitutive elements. Most of the time, they are relevant on a different scale. Taking into account this new description level gives precious information to understand the ecosystem as a complex system and to represent it in its whole in the simulation. In this scale description, they can retro-act on their constitutive components.

Rule-based models allow many ways to change the scale, depending of the tools used to 7 define the rules. It is frequent that individual-based simulations contain two levels of description and define rules to compose system and decompose it into elements if necessary.

6.3 Methodology and meta-modeling

The methodology proposed for the modeling is based on a cyclic approach described in Figure 77. We model a natural phenomenon with the help of an ontology descriptor, using the tool "Protégé 2000". Then the model specification is implemented on a distributed platform, using the Pro-Active library. A simulation can be run. Based on holarchic systems representation specified by the ontology, this simulation includes automatic detections of organizations which compose the multi-scale management, operating during the simulation. The goal of the simulation is to understand and to predict the evolution of some scenarios in the natural environment constituted by an estuary. The virtual laboratory we try to design can be used for environment management and specifically allow to give some element for a decision support system (DSS) associated to this management. In that way, the simulation helping managers for decision making, can be considered in mutual interaction with the environment and the phenomena represented.

6.3.1 Conceptual basis : An holarchic hybrid model for ecosystems

We represent ecosystems with a multi-level model. Some level are fixed "a priori". We shall describe them later. The determination of the level lays on the following concepts.

Ecosystems are systems as described in the general system theory. They are made of elements in interaction. In ecology, the basic elements are individuals. We should therefore introduce individuals in our model. Clearly, we should use an individual based model on that level. Moreover, ecosystems are thermodynamic systems. We should take into account flows between ecosystems on a different level than the individual's one (as they operate on a different scale).

Finally, ecosystems are SOHOS. That induces we shall define non-directional relations between levels and furthermore, and add dynamic scaling for emerging entities.

While studying the information available concerning several natural aquatic ecosystems (the Seine estuary, for example) it was noticed that these ecosystems could be separated into different compartments, each one being a particular ecosystem.

Clearly, that description is space-oriented depending of the localization of the compartment and its inner space. A level corresponding to those compartments should be adopted.

Following the previous concepts, we propose a model suiting ecosystems features and allowing reuse of already existing model different by nature (law or rule-based, different scales).

The model is individual-based in the way it represents the different entities of an ecosystem. As a consequence, each entity has states (e-states, i-states or p-states) and behaviors. The behaviors correspond to the model used to model the dynamic of the entity. It could be rule-based or law-based.

Our model presents three levels defined “a priori”:

- **Individual level.** That level is the lower one in the holarchy of our system. It embodies entities that could not be decomposed further. We introduce individuals and *superindividuals* at that level. A super-individual (Scheffer et al., 1995) is a set of individuals which are seen as similar upon many aspects (age, behavior or other significant properties). This aggregative entity is used to represent fishes shoal. Moreover, the elements of that individual level are described following the consumer-producer-decomposer model. Thus, one should question what are the links between a particular entity and the ecosystem. That level is clearly individual-based so behaviors of the entities are rule-based and entities have i-states.
- **Compartment level.** The space is a critical data in ecosystem modeling. We introduce the space at that level. Thus, a compartment is a single entity in interaction with other 9 compartments (exchanging flows) and containing individuals. Individuals and compartments influence each other. The compartments have law-based behaviors and e-states. The e-states of the compartment correspond to global values considered homogeneous in all the space of the compartment.
- **System level.** Systems are non-spacialized entities corresponding to a set of entities. The link between those entities could be defined “a priori” or during the simulation. The first example of a system is the ecosystem itself. It is made of compartments and defines their relations. Moreover, events occurring at the scale of the ecosystem itself influence all the compartments. The systems have e-states and law-based behaviors. During the simulation, different kind of systems could emerge, each one corresponding to a new scale. Moreover, phenomena with particular scales should be modeled through systems. It is important to understand that the phenomena occurring on the ecosystems level directly modify the compartment and thus influence too the individuals of the compartment themselves. Simultaneously, individuals modify their compartment and thus influence the ecosystem.

6.3.2 *Meta-ontology to describe general ecosystem*

As we propose a model, we also provide a tool to ease the modeling of ecosystems using our work. That tool comes as an ontology of our model. First, let's remind what's interesting in making an ontology. 'Ontology' stands for a formal definition of the terms and concepts of a domain. While making an ontology, we start by enumerating the crucial concepts of the domain. Then, we give a definition of each one.

Thus, we obtain a collection of concepts. Therefore, links and relations between those concepts have to be established. We can distinguish different types of links. A concept could be a precision of another one. In that case, it is said that one of them "inherits" from the other. Concepts could have relation when a concept "has something to do" with another. That formal link determines what other concepts should be considered when you think about one of the concepts. Finally, ontology precises the view of a domain, gives an explicit definition for each concept and highlights the assumption of our view. We use Protege2000 (Pro 2000) to design our ontology. Understanding and following the assumption of our model is natural while using that ontology to study a particular case of ecosystem.

We adopt a classical description of the biotope based on a classification of the organisms. That classification is made of three parts:

1. **Producers.** Producers are responsible for the production of organic mass by consuming inorganic materials (mineral salt or carbon dioxide for example). They are eaten by consumers.
2. **Consumers.** Consumers increase their own organic mass by consuming other organisms. They participate to the layout of the environment
3. **Detritivors or decomposers.** Organism releases organic mass reused by detritivors to produce raw materials needed by the producers. They thus maintain the ecosystem resources.

Producers, consumers and decomposers are models of the functional aspect of the ecosystem and participate to the life cycle. That classification constitutes the base of the representation of the biotope in our model.

6.3.3 *Application to an example of an aquatic ecosystem*

We now follow the process of modeling using the meta-ontology as a regular user would do. The case we will study is a trivial example one. The ecosystem we consider is an aquatic food chain composed of four species:

- The first population is made of phytoplankton which constitutes the producer component. They consume mineral salt and produce oxygen depending on the light.
- Two populations of fish which constitute the consumer component. The first of them feeds on planktons. The second feeds on plankton and the first species of fish. Both of them consume oxygen.

- Bacteria constitute the last population. They decompose organic mass and release mineral salt. They are decomposers.

Schematic views of the functional description of these populations are given by the figure 78, figure 79 and figure 80.

The previous components are linked by the materials they produce (oxygen, mineral salt or organic material) and the material they consume. For example, fishes eat planktons but depends on the oxygen produce by phytoplankton to survive. In similar way the light intensity and the phytoplankton development interact in a feed-back process

In the hybrid model proposed, this previous materials produced or consumed constitute the homogeneous elements of each compartment.

6.3.3.1 Using the Ecosystem part of meta-ontology

The final users of meta-ontological description have to derivate general components in specific ones. They have to classify for example, the previous element (phytoplankton, fishes and bacteria) in term of the meta-ontology (producer, consumer and decomposer).

For example, phytoplankton are producers so we open the producers class of the ontology (see Figure 81).

Questions arise from applying the meta-ontology. According to his knowledge of the domain, the user answers to the questions and naturally converts them into classes proposed by the meta-ontology. If we carry on with the previous example, we inspect each slot of the producers class:

- produce: What materials are produced ? That slot has a multiple cardinality meaning phytoplankton can produce different types of materials. For the phytoplankton, we distinguish oxygen and organic matter. Those new data are represented in the ontology by objects inheriting of the base-model class described in a next paragraph (2.3.2).
- consume: That slot is used as previously for consuming.
- production model: That slot contains a production model for the materials generated by a producer. In our example, we choose a simple mathematical object (linear equation based on time) linking the production of oxygen to the light intensity.
- consumption model: That slot is used as previously.is modeled as: This particular slot is the base of the components description of the holarchy. At this level, the meta-ontology allows individual and super-individual model. When fulfilling that slot, the user will pass to the class corresponding to his choice and therefore go to the next step. In our example, we will model Phytoplankton as individuals. So on, they will make part of the individual-based level of the simulation.

6.3.3.2 Using the Entities of meta-ontology (individual, compartment, ...)

User has to fill the slots of the individual class described in the Figure 82. We sum up their major constitutive slots in the following :

Chapitre 6

A Modelling Methodology to Handle Estuarial Ecosystem Complexity

- name, age, state are individual characteristic properties. State slot allows to define particular inner state that differ from the age and can be fixed by the user.
- is localized: correspond to a slot associated to another specific class of the ontology, called "Localization" (see Figure 83). The derivated classes from "Localization" currently defined allow a 2-D space decomposed into elementary cells and their neighborhood fixed by the user.
- is behaving: Once an entity is defined, the way it is evolving depends on its behaviors. Behaviors are mathematical or IT objects describing the actions or changes of an entity. Generic behaviors have been incorporated to the meta-ontology (and implemented in the simulation framework) corresponding to different kind of models. To add a behavior, the user needs to explore the behavior branch of the meta-ontology (see Figure 84). In our case, we choose a photosynthesis behavior and an aging behavior. We also choose to model the reproduction of phytoplankton by associating a level to each individual. When an individual is doing the photosynthesis, the level increases. Once it reaches a fixed limit, another plankton individual is created and the progenitor lowers its level.
- evolve in: makes reference to a compartment that surrounds each individual. So the compartment constitutes its environment. The compartment class corresponds to the objects that gather the model objects of population, the environment states and the space. Now, we sum up the major slots of this class (see Figure 85).
- is spacialized: refers to the "Localization" model used.
- homogeneous criterion: That slot defines the quantities that can be considered as homogeneous through the compartment (light intensity for example).
- states: As before with the individual, we must fix the e-states and p-states of the compartment. We previously highlight oxygen, mineral salt and organic matter ratios.
- contains: refers to entities embodied.
- is behaving: As we did before, we associate behaviors to our compartments. The behavior can be modeled, for example, as a linear equation representing oxygen fluxes between our different compartments.
- evolve in: refers to the place of the compartment (eventually in term of hierarchy/holarchy description)

6.3.3.3 Sum up

Using all this methodology to the four-species ecosystem, we can sum up the description of each component in term of the major previous concepts structuring the ontology.

- Phytoplankton and fishes are individuals. Phytoplankton have photosynthesis behavior model as a linear equation based on light and reproduce due to a level of energy. Fishes seek preys and feed on them. Thus, they increase their mass which is an i-state

6.4 A three-part framework for the implementation of simulations

of each fish. They have respiration as a behavior. If their environment is deprived of oxygen, they try to escape in another environment and die if they fail, releasing organic matter in the environment.

- Bacteria are super-individual. They have a decomposition behavior and implement a development based on a population dynamic law.
- Compartments manage global values of states as light intensity and oxygen, mineral salt and organic matter concentration. They exchange fishes and oxygen fluxes. The fluxes are currently modeled as a linear equation based on the contact's surface between compartments

6.4 A three-part framework for the implementation of simulations

A simulation framework has been developed corresponding to the concept used in the ontology. This framework is based on active objects and every instance of a class of the meta-ontology has a corresponding projection. To be able to represent a significant problem the simulation must be distributed to be spread over networks of computers. For this, we use a java library called ProActive (Caromel et al., 1998) which is conceived for dynamic code migration.

In the following, we present the first part of the framework which consist on an elementary implementation of the previous application. Some graphical results show global population evolution inside each compartment of the simulation. More over, our concern is to develop a tool, able to simulate with accuracy an aquatic ecosystem in which the fluid component has an important influence over the self-organization emerging during the simulation. For this purpose, we develop in the second part of the framework, a fluid flow model whom distributed formulation, using vortex methods, is able to combine fluid organizations or structures dynamic with individual displacements inside or outside their own compartments. We explain how we use an original approach to represent multi-scale description inside the fluid flow model. In the third party of our framework, we focus our attention on distributed computing. Even if we use an adapted library as Pro-Active, the code distribution strategy has to be managed. We use for this purpose, dynamic strategies which are able to adapt the entities repartition over the computer network, during the simulation, even when major reorganizations in the holarchic systems occur. Finally we show an illustration of the distribution method for the effective computation of swarm displacements based on elementary interactions between entities.

6.4.1 *Three compartments aquatic ecosystem*

We present an elementary implementation of the previous application which is composed with three compartments, as described in the Figure 87. The three compartments exchange flux composed with global values like oxygen or living individuals.

The interface of the simulation and some first results are presented in the Figure 88.

Some first qualitative results are given in the following. The relevance of such results still need to be confronted with the specialists knowledge of the aquatic ecosystem ecology. We

only pretend in the following to show what kind of significant results the framework is able to give:

- In many case, a compartment specializes itself in producing oxygen (see Figure 89) meaning populations of fish disappear from this one and planktons multiply drastically. Therefore, the compartment provides oxygen to the other compartment thanks to fluxes. Most of the time, those compartments are compartments with average light intensity. They first undergo a period of lack of oxygen with a very little number of planktons. That makes the fishes die (and therefore increasing the organic matter quantity) or fly away. Then phytoplankton multiplies with no predator.
- As compartments assume the production of oxygen, we distinguish compartment containing very few phytoplankton but much more fishes of population 1 and population 2. As they mostly encounter fishes from the population 1, fishes of the population 2 almost feed exclusively on fishes from the population 1. Therefore, planktons are mainly preys for population 1's fishes. The equilibrium sometime is broken with the disappearance of the population of fishes of the population 1 or of the phytoplankton. In this case, the compartment can evolve into an oxygen provider or simply be deprived of beings.
- Some case show compartments with equilibrium (see Figure 90) concerning the population effective. It is mostly the case when light intensity is very high inducing a massive reproduction for the phytoplanktons. Therefore, fishes feed on that population allowing fishes from the population 1 to resist to the loss due to the predation from fishes of the population 2.

6.4.2 *Simulation of a multi-scale fluid flow model*

6.4.2.1 Fluid mechanic model

Hydrodynamics usually deal with scales where fluids can be considered continuous. The usual set of laws used to describe continuous fluid behavior is the well-known Navier-Stokes equations. Their classical differential formulations lead to global descriptions which need at least complex formulations to take into account some local phenomena. Numerical approximations have then to be used for the computation of trajectories that have to be fully expressed in the global description. Our purpose is to present fluid flow as the mass transport of energetic flux crossing aquatic ecosystems. This energetic flux is responsible for dynamic organizations which emerge and evolve inside ecosystems. We have to manage an efficient formulation letting us formulate possible interaction between local fluid particles and individual-behaviour models of various entities, such as living ones. Our goal is to allow retroactions of these entities on the fluid flow. A local description of the fluid flow would be adapted, as it would allow such interactions. The Navier-Stokes equations can be expressed with Biot-Savart formulation and can lead to an approximation formulation called vortex method (Leonard, 1980).

In vortex methods, the flow is separated in a number of abstract particles, each being a local descriptor of the flow. These particles indicate the speed, vorticity, etc. of the flow where they are located. These particles are not fixed (like on a grid): the fluid they describe conveys

6.4 A three-part framework for the implementation of simulations

them. They can in fact be seen as mobile interpolation points, from whom the cinematic characteristics of the fluid can be computed anywhere.

This model is of interest to us as it is a local model, hence better able to deal with local heterogeneities.

The vortex method we use is of $O(n^2)$ complexity. Finding ways of lightening this calculus is therefore important. One lead is through making our model multi-scale, and to only compute entities at the scale we need them. This is our second motivation for our using different levels of description.

6.4.2.2 Multi-level description based on emergent structures detection

The simulation entities come and go during the simulation, and thus we need a method to change the level of their description *during* the simulation, and not beforehand the way it is usually done. So, we use a model with three levels of description.

The first one, called microscopic, contains all elementary entities of the fluid flow. In our case, the elementary entities are the abstract particles. In our fluid flow, the main structures are vortices. When one of them is detected, the entities of the microscopic level composing it are replaced by a bigger entity in the second description level, called macroscopic. The detection process is iterative as smaller vortices can combine to give bigger ones.

After we create the macro-entities, we must make these live in the simulation, interacting with its various inhabitants (most notably particles, other vortices). This is the third level of description, called mesoscopic. Through it, the macro-entities evolve, whether it is growing or decaying to its possible disintegration.

More accurate description and numerical experiments of these multi-level computations can be found in previous papers ((Bertelle et al., 2002), for example). We give with this approach a constructive model for the study of estuaries where multi-level of description have to be simultaneously managed. For example the consequence of a local phenomenon such as the influence of pollution diffusion on living species on the stability of a large-scale food chains can disturb irreversibly the global stability of the estuary.

6.4.3 *Dynamical distribution*

In order to obtain significant results, simulation with a huge number of interacting entities should be considered. This will be too much for a simulation running on a single processor system. To overcome this problem, distributed simulation systems should be considered. Spreading the entities over many machines could speed up the entire simulation considerably if the communication overheads are curbed. Due to the dynamics of such applications, the distribution of the entities has to be continuously examined and migration decisions may be proposed in order to improve performances.

We are in front of a problem where the processes must obtain resources in a dynamically changing environment and be designed to collaborate despite a variety of asynchronous and unpredictable changes. In such a context, applications are computational ecosystems analogous to biological ecosystems and human economies. The components are considered as constituting an artificial ecosystem. This analogy suggests tackling the problem as a complex

Chapitre 6

A Modelling Methodology to Handle Estuarial Ecosystem Complexity

system, in particular for the emergent aspects and the self-organization. Thus we detect organizations, in the computing process, by a bio-inspired algorithm which handles the dynamic side, load balancing of the processes and minimization of the impact of the interactions between them. The simulation application is modeled as a set of interacting entities within an environment. It is constituted by a community of cooperative/competitive entities mapped to concurrent processes.

The simulation is represented by a graph which evolves in time, using a one-to-one mapping between vertices and entities and between edges and communications. We use competing colonies of ants, each depositing distinctly colored pheromones, to find clusters of highly communicating entities which constitute organizations. Ants are attracted by communications and their own colored pheromones, while repulsion interactions between colonies allow to preserve a good distribution. Colors are mapped to processing resources and colored entities are placed on them, allowing to put highly communicating clusters on the same processing resource without overloading it (Bertelle et al., 2004).

The Figure 91(a) shows the effective positions of entities in a simulation run whereas the Figure 91(b) shows the associated dynamic graph. The left image represents the initial situation whereas the right one shows the positions (respectively the communications) after several iterations (step 92 of the simulation). On these snapshots, we can see the effect of the fluid flow which transports the living entities.

One can easily see that the left-hand side figure is constituted of a lot of isolated entities. However, later on, they form different clusters with heavy communication connections. These communications may represent, for example, the spatial interactions.

On Figure 92(a) and Figure 92 (b), ants are let out to populate this dynamic graph corresponding to the simulation and detect the different clusters. There are four different ant populations. Some clusters are colonized by two or more different populations. This is due to the agitated nature of the graph. Thus clusters join and split very fast.

Our approach based on the detection of organization at a low level, can also be used, to a higher level, to detect localized contamination chains. Data-processing representation of the instantiation of the different levels is mapped on the graph (i.e the individuals, the compartments and systems correspond to the vertices) and the weighted edges represent the contaminant flux. With the algorithm, we search the highly connected vertices and we find clusters which are the translation of contamination chain.

6.5 Conclusion

Some aspects of complex organizations in aquatic ecosystem can be modeled according to the approach previously presented.

The next step of our work is thus to confront in-situ experimental behaviors with some computer based behaviors obtained with the proposed simulation. Using more complex descriptions for the biodiversity, we will be able to produce some explicative and predictive modeling for auto-organization phenomena in biological systems.

To realize these perspectives, we have already obtained much scientific information on the Seine estuary which is a very complex ecosystem in the north of France. Last years, many studies have been made to give precious information for understanding the complexity of this natural environment (Guézennec et al., 1999). Next years of our studies will concern the development of concerted models taking into account information from specialists of the Seine estuary ecologist.

6.6 References

(Pro 2000). *The protege project*. <http://protege.stanford.edu>.

Baude, F., Caromel, D., Huet, F., and Vayssier, J. (2000). Communicating mobile active object in java. In *Proceedings of HPCN Europe*.

Bertalanffy, L. V. (1968). *General System Theory foundations development applications*. George Brazille Inc., New York.

Bertelle, C., Dutot, A., Guinand, F., and Olivier, D. (2004). Colored ants for distributed simulations. In LNCS, editor, ANTS04, Bruxel. Dorigo et al. to appear.

Bertelle, C., Jay, V., Lerebourg, S., Olivier, D., and Tranouez, P. (2002). Dynamic clustering for auto-organized structures in complex fluid flows. In ESS 2002 Conf., Dresden (Germany).

Caromel, D., Klauser, W., and Vayssiere, J. (1998). Towards seamless computing and metacomputing in java. In Fox, G. C., editor, *Concurrency Practice and Experience*, volume 10, pages 1043–1061. Wiley ans Sons, Ltd. <http://www-sop.inria.fr/oasis/proactive/>.

Coquillard, P. and Hill, D. (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes*. Masson.

DeAngelis, D. L. and Gross, L. J., editors (1992a). *Individual-based models and approaches in ecology*. Chapman Hall.

DeAngelis, D. L. and Gross, L. J. (1992b). Which individual-based approach is most appropriate for a given problem. In DeAngelis, D. L. and Gross, L. J., editors, *Individual-based models and approaches in ecology*, pages 67–87. Chapman Hall.

Drogoul, A. and Dubreuil, C. (1992). Eco-problem-solving: results of the n-puzzle. In Demazeau,

Y. and Werner, E., editors, *Decentralized Artificial Intelligence III*, pages 283–295. North Holland.

Frontier, S. and Pichot-Viale, D. (1998). *Ecosystème*. Dunod.

Grim, V. (1999). Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future. *Ecological Modelling*, (115):129–148.

Guézennec, L., Romana, L., Goujon, R., and Meyer, R. (1999). *Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes*. Programme scientifique Seine-Aval. Ifremer editions. ISBN : 2-84433-026-6.

Chapitre 6

A Modelling Methodology to Handle Estuarial Ecosystem Complexity

Haefner, J. W. (1992). Parallel computers and individual models: an overview. In DeAngelis, D. and Gross, L., editors, *Individual-based models and approaches in ecology*, pages 126–164. Chapman Hall.

Kay, J. (2000). Ecosystems as self-organising holarchic open systems : narratives and the second law of thermodynamics. In S.E.Jorgensen and Müller, F., editors, *Handbook of Ecosystems Theories and Management*, pages 135–160. Lewis Publishers.

Koestler, A. and Smythies, J. (1969). *Beyond reductionism*. Hutchinson.

Le Moigne, J.-L. (1994). *Modélisation des systèmes complexes*. Dunod.

Leonard, A. (1980). Vortex methods for flow simulation. *journal of computational physics*, 37:289–335.

Scheffer, M., Baveco, J.-M., Angelis, D., Rose, K., and van Nes, E. (1995). Super-individuals a simple solution for modelling large populations on an individual basis. *Ecological Modelling*, 80:161–170.

Tansley, A. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16(3):299.

Tranouez, P., Bertelle, C., and Olivier, D. (2001). Changing the level of description of a fluid flow in a agent-based simulation. In *ESS 2001 Conference*, Marseilles (France).

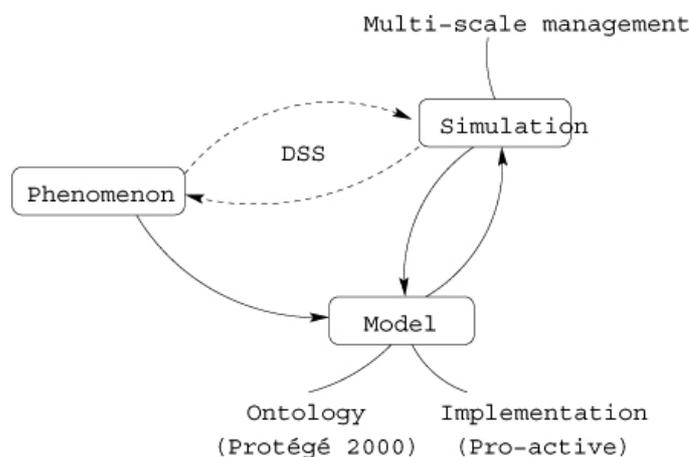


Figure 77 : A methodology based on a cyclic development

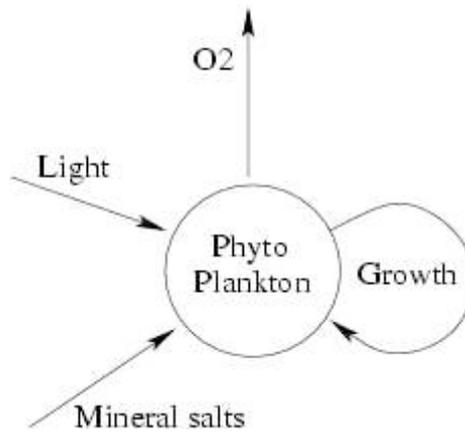


Figure 78 : Producer - phytoplankton

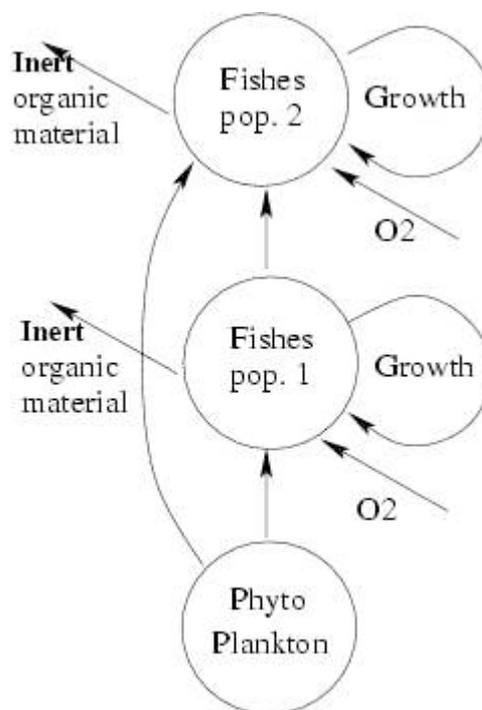


Figure 79 : Consumer - food chain

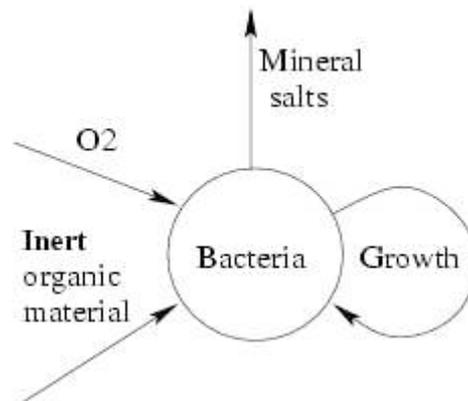


Figure 80 : Decomposer - bacteria

| Name | Type | Cardinality | Documentation |
|---------------------|----------|-----------------|----------------------|
| S production model | String | multiple | |
| S consumption model | String | multiple | |
| S consume | Instance | multiple | classes={base model} |
| S produce | Instance | multiple | classes={base model} |
| S is model as | Instance | required single | classes={Entity} |

Figure 81 : Ecosystem parts: producers

| Name | Type | Cardinality | Documentation |
|-----------------|----------|-----------------|------------------------|
| S is localized | Instance | single | classes={Localization} |
| S age | Integer | required single | minimum=0 |
| S states | String | multiple | |
| S name | String | single | |
| S evolve in | Instance | single | classes={Entity} |
| S is behaving I | Instance | multiple | classes={behavior} |

Figure 82 : Individuals in this meta-ontology

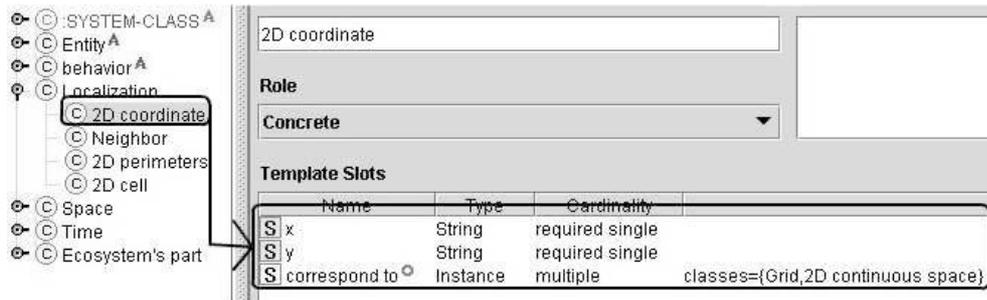


Figure 83 : localization in our meta-ontology

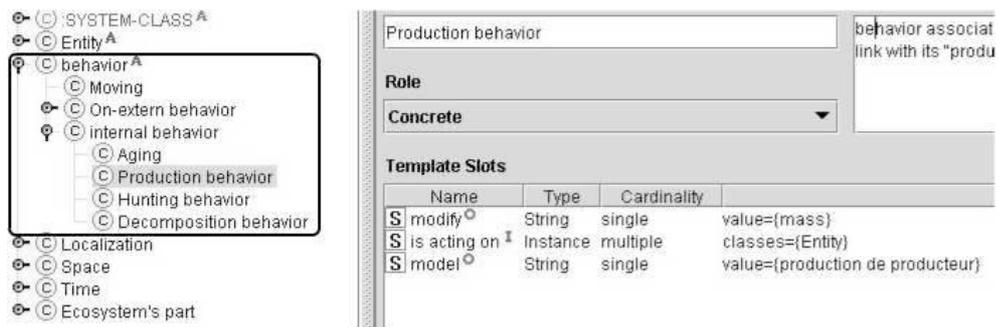


Figure 84 : Behaviors in our meta-ontology

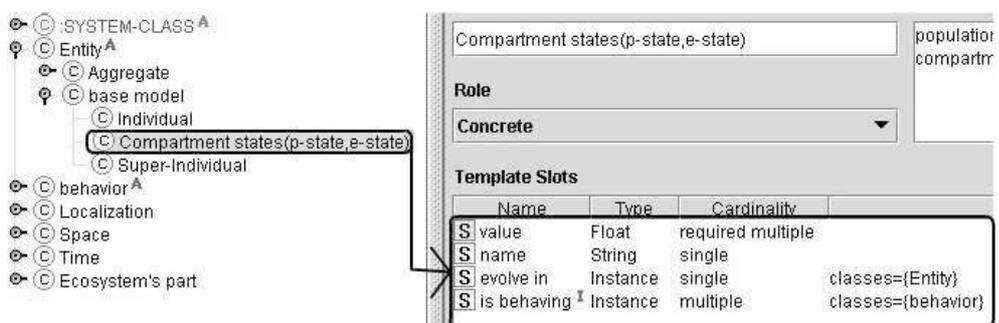


Figure 85 : Compartments in our meta-ontology

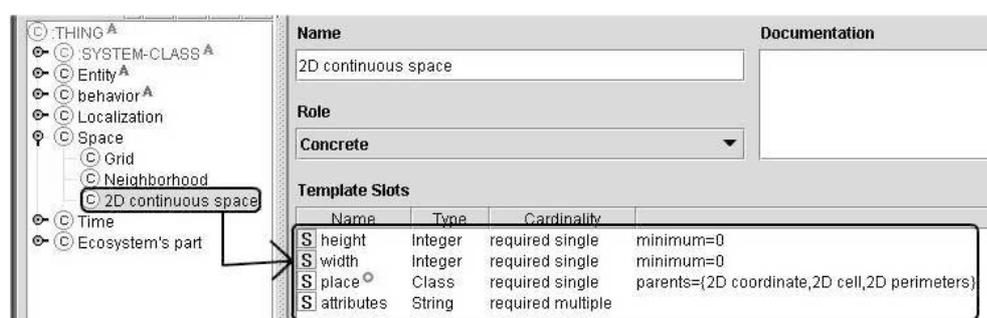


Figure 86 : Space in our meta-ontology

Chapitre 6
 A Modelling Methodology to Handle Estuarial Ecosystem Complexity

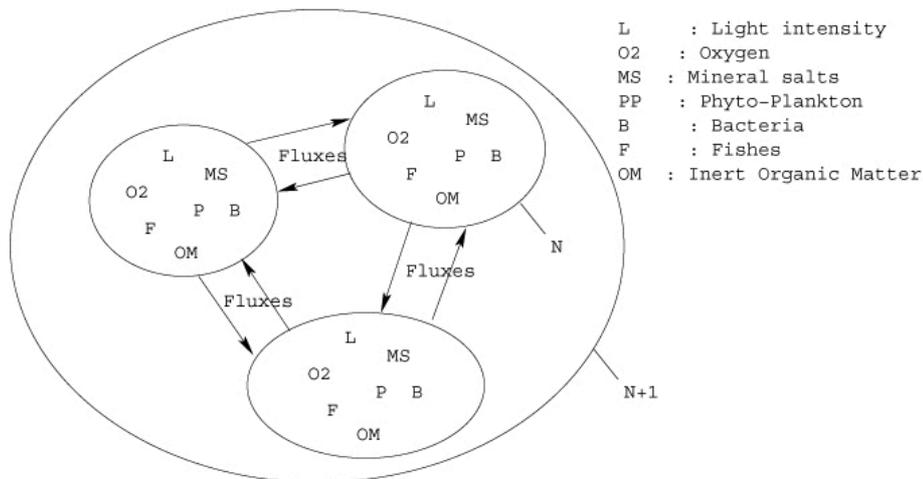


Figure 87 : A holarchic ecosystem with three compartments

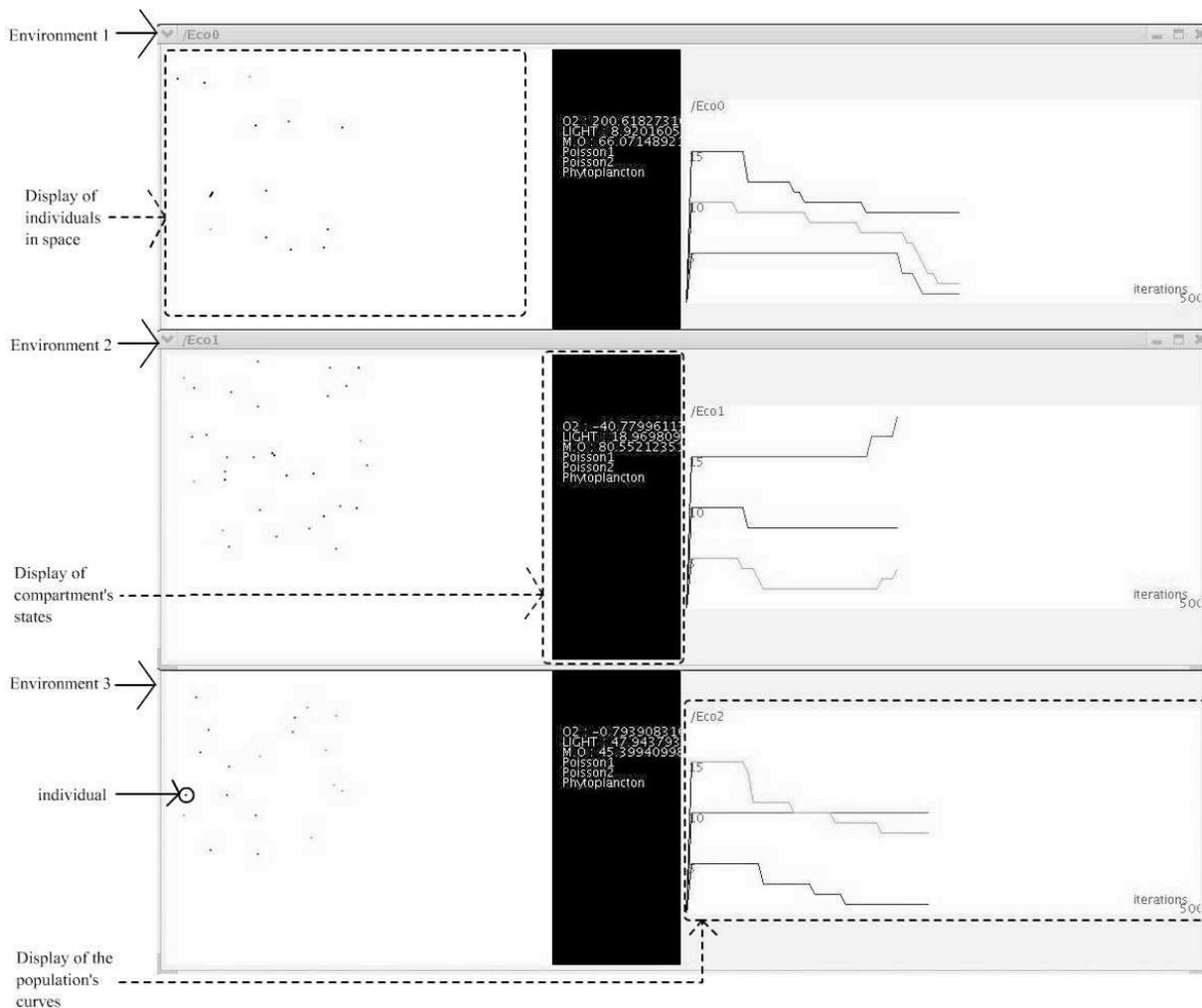


Figure 88 : The example simulated with three compartments

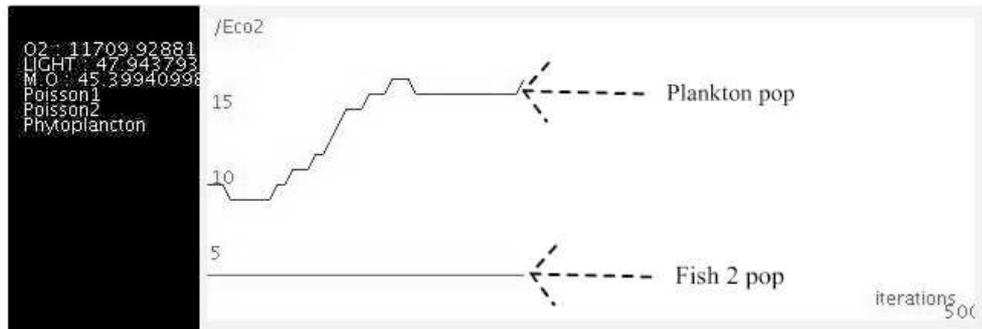


Figure 89 : Compartment Eco2 specializes in producing oxygen

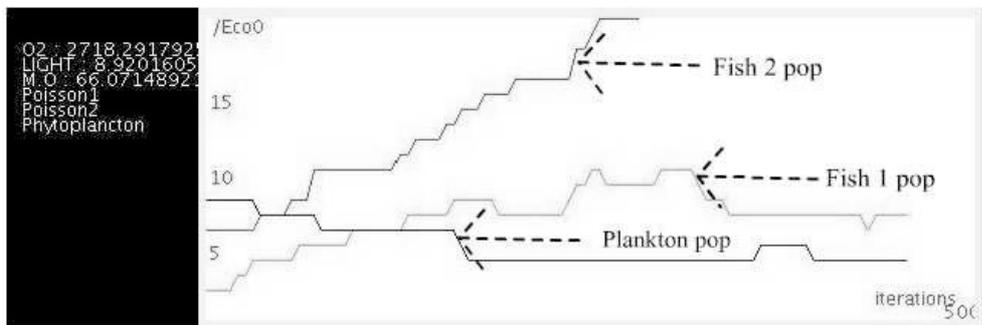
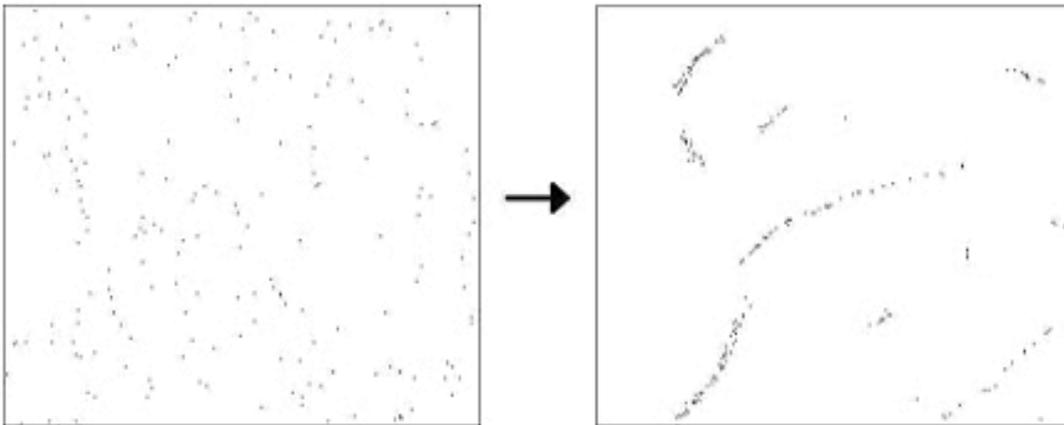
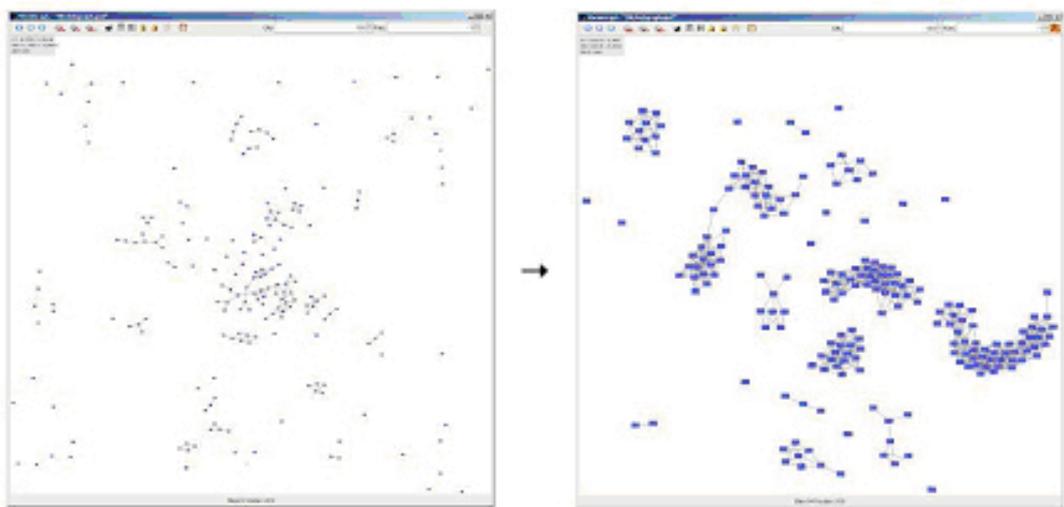


Figure 90 : Compartment Eco0 reaches equilibrium

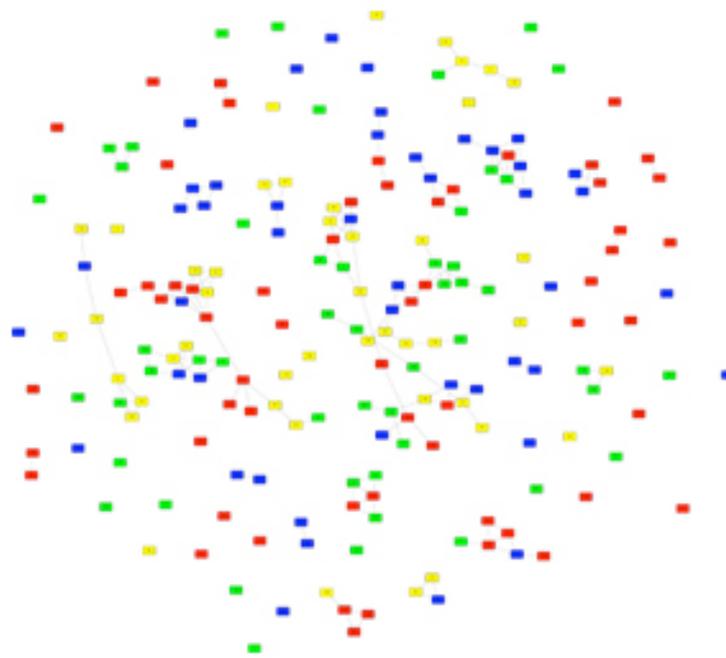


(a) Simulation

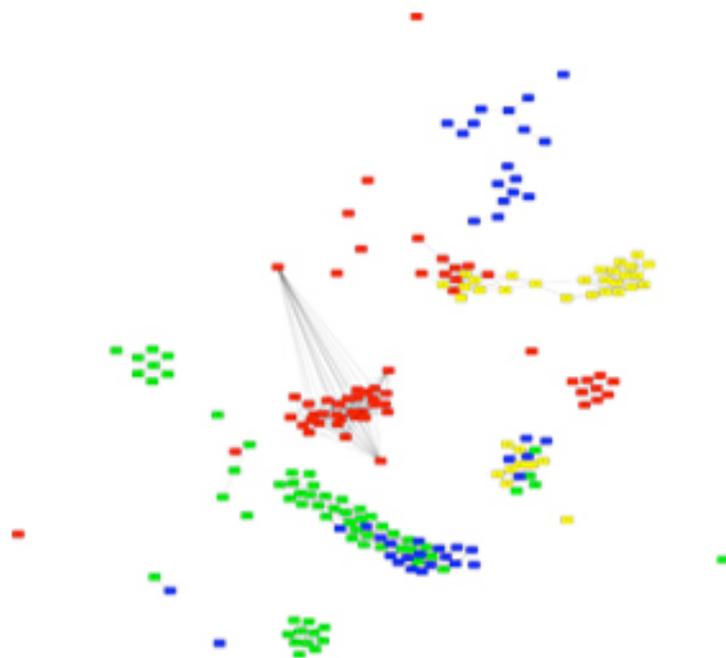


(b) Distribution

Figure 91 : Visualization of the simulation



(a) Step 1



(b) Step 213

Figure 92 : Coloration of the graph.

CHAPITRE 7

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Résumé

Nous rappelons dans ce chapitre ce qui a été dit dans les précédents. Nous expliquons ensuite comment nos travaux peuvent être poursuivis ou connectés, à court ou moyen terme d'une part – couplage d'êtres vivants automobiles et du fluide, transport de différents fluides en un écoulement (polluants) – et à plus long terme d'autre part – réseaux invariants d'échelle, réification d'organisations moins spécifiques par de la génétique d'agent.

Préambule

Ce travail est une suite au problème de la formalisation générique des représentations à plusieurs niveaux de description qui ont trouvé une première phase d'expression dans les SIC (ABIS) et dans les écoulements hydrodynamiques.

Dans le cadre du projet plus global sur les modèles d'écosystèmes, il s'agit maintenant de déployer ces concepts dans des systèmes vivants organisés de type chaînes trophiques.

Ce travail est développé conjointement avec G. Prévost qui investit plus spécifiquement les ontologies du vivant dans les écosystèmes aquatiques estuariens.

On montre ici les différentes phases et une première approche de couplage vivant/fluide au coeur des organisations qui se développent dans les écosystèmes aquatiques. Ces travaux seront développés et finalisés dans le cadre des travaux de thèse de G. Prévost et S. Lerebourg.

7.1 Ce qui a été fait aujourd'hui

7.1.1 Trajectoire du mémoire

Nos travaux ont commencé avec notre participation à ABIS. Nous y avons été confrontés pour la première fois à des problèmes de niveaux de description multiples, pour essayer d'aborder une aide informatique à la communication non pas en se basant seulement sur la sémantique, mais en utilisant différentes approches pour utiliser la dynamique du discours pour en cerner les parties importantes.

Nous avons suivi ce début par une recherche sur la notion d'échelle et de niveaux de description en sciences en général et dans les simulations informatiques en particulier. Nous en avons synthétisé différentes classifications des modèles scientifiques et de leur gestion de niveaux de description multiples.

En nous appuyant sur ce travail théorique, nous avons construit une simulation d'écoulement fluide à changement dynamique d'échelle in medias res, et dont les changements sont itérables à volonté pour couvrir une large gamme d'échelles d'espace. L'augmentation d'échelle n'y a pas de limite théorique, la réduction par contre ne peut y descendre en deçà de briques hydrodynamiques de base, les particules, puisqu'on ignore dans la pratique comment passer de l'échelle inférieure qui serait moléculaire à celle des particules, celles-ci étant d'ailleurs une abstraction géométrique de la distribution de vorticité, et non une entité matérielle directement connectée au moléculaire. De plus, nous visons à simuler des écoulements pertinents relativement à la modélisation de parties d'écosystèmes, descendre plus bas ne nous paraît pas utile pour atteindre ces fins.

7.1.2 Forces et faiblesses des différentes méthodes.

Nous avons à présent vu trois méthodes de détections de structures et d'organisations apparaissant au cours de notre simulation. La plus ancienne est celle d'ABIS, celle dite morphologique. La deuxième est celle de détection de structure elliptique (que nous appellerons DSE) préalable à leur réification. La dernière enfin utilise les N-trees pour détecter des organisations denses de forme quelconque. Nous l'appellerons DOD.

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

Nous allons comparer ces méthodes suivant quatre axes : détection de structures vs d'organisations, nombres de structures/organisations détectées statique vs dynamique, prise en compte du temps et enfin détection ascendante ou descendante.

7.1.2.1 Structures et organisations

« Je dis parfois qu'il y a autant de définitions d'auto-organisation qu'il y a d'auto-organiseurs. »

Jean-Louis Deneubourg³⁷

Structures et organisations sont des mots couramment utilisés dans la littérature, avec des sens différents suivant les disciplines ou les auteurs. Définissons donc ce que ce que nous entendons ici par *structures* et *organisations*. Ces définitions n'ont bien sûr pas prétention à l'universalité : elles ne servent qu'à nous donner ici une assise opérationnelle.

Commençons d'abord par ce qui les rapproche : structures et organisations sont toutes deux des ensembles d'entités de la simulation. Dans les deux cas ces dernières ont des points communs. C'est dans la localité de ces points communs qu'il y a divergence. Pour une structure, un certain ensemble de variables des entités ont toutes des valeurs suffisamment proches (ce que « proche » et « suffisamment » signifient est défini au cas par cas.). Dans une organisation, cette proximité n'est nécessairement vérifiée que deux à deux (même si généralement ce maillage des proximités est tout de même plus dense). On peut donc remarquer que les structures sont des organisations, et pas réciproquement.

Prenons des exemples sociaux. Dans une soirée entre amis, si les gens se regroupent par profession, ces groupes seront des structures, dont le lien est une proximité de profession. De même si se forment des petits groupes par tranches d'âge (peut-être plus dans une réunion de famille par exemple). Par contre, l'ensemble de ces amis, ce groupe d'amis, sera une organisation, liée par différents critères : A, B et C ont des métiers proches, C et D se sont connus au Lycée, D vit avec E, E joue au golf avec F et G etc..... Plus généralement on peut considérer cette organisation comme multicritère (on trouve une chaîne de gens vérifiant une suite de critères (A, B et C ont critère1 en commun, C et D ont critère2 en commun etc.)), ou formuler un critère transversal (A, B et C ont une relation amicale, C et D ont une relation amicale etc.). Bien sûr on voit ainsi qu'au fil du temps ou en choisissant d'autres critères, on pourra percevoir cette organisation comme une structure : l'organisation est l'ensemble d'entité et l'ensemble des règles de lien entre ces entités, et non seulement l'ensemble.

Voyons comment ceci nous permet de discriminer entre nos méthodes, et d'ailleurs de les comparer à d'autres.

ABIS et DSE détectent des structures : caractéristiques morphologiques proches pour ABIS, particules fluides de même sens de rotation et de caractéristiques spatiales proches pour DSE. C'est aussi le cas des boules d'eau de Rivage, sur ses deux variables abstrayant un comportement cinématique, ou des algorithmes d'apprentissage compétitifs en général (carte de Kohonen, nuées dynamiques, classifieurs d'inspiration neuronale etc.).

³⁷ « Émergence et insectes sociaux » dans *La Complexité, vertiges et promesses*, Éditions Le Pommier

DOD détecte plutôt des organisations qui ne sont pas des structures. La simulation maintient à jour en permanence une cartographie de la densité en entités. On peut alors y voir des structures spatiales dont les éléments ont des densités dans un même palier. DOD perçoit une organisation multicritère d'entités ayant l'appartenance à une telle structure spatiale de densité comme critère commun et la proximité spatiale comme critère de chaîne (cf. 5.6).

7.1.2.2 Nombre d'organisations statique vs dynamique

Sur ce critère, on discriminerait essentiellement les algorithmes d'apprentissage compétitifs et les autres : la plupart de ces premiers ont un nombre fixé à l'avance de clusters, alors que ABIS, DSE, DOD ou ailleurs Rivage ont un nombre de groupes détectés en évolution dynamique.

7.1.2.3 Prise en compte du temps

Tous les systèmes de détection d'organisations ont une faiblesse par rapport au temps. Toutes ont tendance à ne travailler que sur au mieux très peu de pas de la simulation.

Une approche numérique est tentée par Rivage et ABIS, en utilisant des variables numériques qui essaient d'introduire des caractéristiques cinématiques avec une légère mémoire, par somme linéaire chez Rivage et dérivation temporelle chez ABIS (ce qui revient rapidement au même sur un ordinateur).

DOD prend en compte la dimension temporelle à travers l'inertie de ses grilles, qui garderont une trace d'une densité passée et limitant ainsi des fluctuations permanentes sur certains seuils de densité qui empêcheraient certaines détections.

DSE n'incorpore pas du tout le temps lors de sa détection. C'est ensuite, après la réification des structures détectées que le temps est pris en compte grâce au cycle de vie des agents Tourbillons. Son cas est un peu particulier : DSE est la seule méthode de détection couplée à une réification subséquente.

7.1.2.4 Détection ascendante ou descendante

La plupart des méthodes qui nous intéressent ici ont une composante hiérarchique : le regroupement des entrées en cluster procède par agglomérations ou divisions successives. On parlera alors respectivement d'approche ascendante ou descendante. En revanche, les algorithmes d'apprentissage compétitifs comparent en fait les entités à un ensemble virtuel de points d'attraction recouvrant tout l'espace de sélection : c'est une approche eulérienne qui n'a pas de composante hiérarchique.

DSE est clairement descendante : elle commence par une triangulation de l'ensemble des entités de la simulation.

ABIS et DOD ne comparent les entités entre elles que localement : elles sont ascendantes.

Les boules d'eau de Rivage se regroupent par voisinage : l'approche est donc ascendante.

L'approche par agglomération ou par division de la détection influe également sur l'impact de la détection sur la simulation. Les détections descendantes se font en une fois, sur toutes les entités de la simulation, et il se trouve qu'elles doivent être recommencées entièrement à

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

chaque fois (la connaissance de la détection précédente n'accélère pas la nouvelle détection). Les détections ascendantes voient le coût du calcul réparti sur tout le cycle de simulation.

7.1.2.5 Récapitulatif

Tentons un tableau récapitulatif :

- lignes et colonnes y figureront les axes structures/organisations et eulérien/ascendant/descendant,
- alors qu'*italique* et standard décriront la troisième dimension de la fixité ou non du nombre de groupes détectés, triomphant ainsi de l'exaspérante platitude de la feuille.
- Sur cette lancée, la prise en compte du temps est :
 - pas souligné, pas de prise en compte,
 - souligné d'un trait, prise en compte numérique,
 - souligné de deux traits, prise en compte dans la simulation.

| | Structures | Organisations |
|--------------|--|---------------|
| Eulériens | <i>Algorithmes d'apprentissage compétitifs</i> | |
| Descendantes | <u>DSE</u> | |
| Ascendantes | <u>ABIS</u> <u>Rivage</u> | <u>DOD</u> |

Tableau 3 : analyse des différentes méthodes de détection

7.2 Ce qui sera fait demain

7.2.1 Couplage vivant/fluide

Nous avons vu au Chapitre 6 que nous avons également entamé notre apport à la simulation d'écosystèmes sous l'angle des rapports entretenus entre les créatures vivantes de l'écosystème, notamment les rapports trophiques. Le déplacement des créatures mises en jeu dans leur biotope, bien qu'important du point de vue du réalisme de l'action trophique, y est

très simplifié. Il y est soit abstrait (concentration volumique en une espèce) soit simple (déplacement aléatoire puis ligne droite vers une proie).

Nous pensons pouvoir utiliser nos travaux sur les écoulements pour rendre plus subtils les déplacements de la biocoenose. Prenons l'exemple des copépodes, tel que développé dans 2.2.4.3. Copépodes et phytoplanctons sont très influencés par les mouvements turbulents du fluide dans lequel ils vivent. Les modèles actuels sont limités sur ce point. Nous pensons pouvoir peut-être l'améliorer. Guillaume Prévost a commencé à ces fins une collaboration avec Sami Souissi de la station marine de Vilmareux.

Dans ce développement nous pensons assimiler les organismes vivants à des structures ayant leur propre dynamique interne. Du point de vue du fluide, tout n'est que particules et structures. Celles-ci sont néanmoins de différents types : on a des Tourbillons, et on en a des vivantes. Parmi celles-ci certaines sont inertes, transportées entièrement par le fluide, d'autres sont automobiles, poussées par le fluide mais avec un déplacement additionnel propre. Le calcul exprime alors les contraintes que le fluide impose à ces entités (dans la continuation de [Oli 01b]), et l'influence en retour de celles-ci sur le fluide.

Outre les réseaux trophiques, une inter-influence mieux modélisée du fluide et de ce qu'il transporte ouvre la porte à d'autres améliorations comme une gestion plus détaillée de la turbidité (influençant de nombreux aspects du biotope (bouchon vaseux, polluants) comme de la biocoenose (prédation, reproduction)).

Enfin, nous espérons alors pouvoir dans ces simulations détecter des structures immergées émergentes, comme lors de floculations ou d'agrégation de planctons, structures qui seraient alors générées dans la simulation. Mais idéalement, il faudrait alors pouvoir créer des organisations génériques, dont le comportement serait calculé d'après celui de la structure détectée : c'est ce que nous esquissons en 7.3.

Voyons à présent comment réussir à calculer réellement tout ceci.

7.2.2 *Distribution du calcul*

Tout le programme ambitieux décrit ci-dessus aura faim de calcul. C'est pourquoi dès [Ber 00] nous exprimions la nécessité d'une distribution de la charge de calcul adaptée à nos besoins. C'est le travail de thèse d'Antoine Dutot.

L'approche retenue consiste en calculer dynamiquement une répartition de la charge de calcul qui utilise d'une part toutes les ressources disponibles, ce qui est assez standard, mais qui de plus minimise la consommation de bande passante réseau en rassemblant sur une même ressource de calcul les entités qui communiquent le plus.

Antoine utilise pour cela des algorithmes fournis, comme décrit dans [Ber 04]

7.3 **Après-demain ...**

Quand on considère le modèle utilisé pour actionner les agents Tourbillons (5.4.5), on peut trouver l'automate retenu inutilement formel par rapport à ce qu'on exige de lui. Ce formalisme est néanmoins bien nécessaire à long terme, afin de pouvoir se doter d'opérateurs de reproduction et plus généralement d'une génétique d'automate.

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

Ce travail a commencé dans [Ber 01] et [Ber 02b] notamment, mais est actuellement en suspens.

L'idée de développement après laquelle nous sommes est de pouvoir coder un comportement plus compliqué pour des organisations. Les structures tourbillonnaires sur lesquelles nous avons concentré jusqu'à présent nos efforts, si elles sont importantes dans le paysage des structures remarquables d'un écoulement hydrodynamique, ne sont pas les seules dans ce cas. Détecter ces nouvelles organisations n'est pas trivial, mais DOD par exemple en trouve quelques unes. Mais c'est la deuxième étape, créer une nouvelle entité de simulation se comportant comme la structure ou l'organisation détectée qui pose problème.

Pour les Tourbillons nous savions comment les structures étaient sensées se comporter et pouvions alors coder explicitement ce comportement. De même, si le changement d'échelle est bien itérable, les structures Tourbillons des différentes échelles ont un comportement identique. Nous voudrions aller au-delà de cette limitation.

Nous pouvons commencer cette amélioration en continuant notre typologie des structures fluides, et proposer des structures informatiques ad hoc. Mais de manière plus ambitieuse, nous voudrions pouvoir calculer un nouveau comportement à partir du comportement ou de certaines propriétés des éléments des structures observées. La piste que nous suivons actuellement est celle de l'algèbre d'automate. Des opérateurs correctement choisis doivent permettre de mélanger le comportement de différents automates pour en donner de nouveaux. Des opérateurs génétiques, et une fitness basée sur la comparaison entre l'ensemble observé et le comportement proposé, permettent alors de valider ou d'infirmer les nouveaux automates. Les articles cités plus haut décrivent cette démarche appliquée à un problème jouet³⁸, le dilemme itéré du prisonnier.

³⁸ Sur la base duquel des décisions économiques et politiques lourdes sont néanmoins prises... [Gue 03]

CHAPITRE 8 PUBLICATIONS ET BIBLIOGRAPHIE

Résumé

Les différentes publications et présentation des travaux précédemment décrits, suivis d'une partie importante des références de littérature qui ont été nécessaires à la réalisation des travaux et de la thèse.

8.1 Publications

8.1.1 *Articles en conférences internationales francophones*

DURAND S., LESAGE F., CARDON A., TRANOUEZ P. : "Représentation par des organisations d'agents des connaissances échangées dans un système de gestion des situations d'urgence"; JFIADSMA'99; pp 193-205 (1999)

BERTELLE C., LEREBOURG S., OLIVIER D., TRANOUEZ P. : "Contribution à la représentation multi-échelle des écosystèmes aquatiques dans « Déploiement des systèmes multi-agents : vers un passage à l'échelle »"; JFSMA 2003, RSTI/hors série 2003; (2003)

8.1.2 *Articles en conférences internationales*

LESAGE F., CARDON A., TRANOUEZ P. : "A multiagent based prediction of the evolution of knowledge with multiple points of view"; KAW' 99; (1999)

BERTELLE C., OLIVIER D., JAY V., TRANOUEZ P., CARDON A. : "A multi-agent system integrating vortex methods for fluid flow computation"; 16th IMACS Congress, Communication publiée dans les actes, Lausanne, Suisse; (2000)

BERTELLE C., OLIVIER D., TRANOUEZ P., JAY V. : "Agent-based simulation of water flow for environment modelling in estuaries"; In Workshop 2000 Agent-Based Simulation, Passau (Germany); pp 115-122 (2000)

TRANOUEZ P., BERTELLE C., OLIVIER D. : "Changing the levels of description of a fluid flow in a agent-based simulation"; ESS'2001, Marseille (France); (2001)

BERTELLE C., JAY V., LEREBOURG S., OLIVIER D., TRANOUEZ P. : "Dynamic clustering for auto-organized structures in complex fluid flows"; ESS 2002 Dresde, Allemagne; pp 93-97 (2002)

PREVOST G., TRANOUEZ P., BERTELLE C., OLIVIER D.: "Hybrid and hierarchical compartmental approach for ecosystem applied to estuaries modeling"; In ESMc'2003 Conf., Naples (Italy); (2003)

TRANOUEZ P., LEREBOURG S., BERTELLE C., OLIVIER D. : "Changing the level of description in aquatic ecosystem models: an overview"; In ESMc'2003 Conf., Naples (Italy); (2003)

BERTELLE C., LEREBOURG S., OLIVIER D., PREVOST G., TRANOUEZ P. : "Handling the complexity of an estuarial ecosystem, a modelling methodology"; ECSA 38th symposium; (2004)

PREVOST G., TRANOUEZ P., LEREBOURG S., BERTELLE C., OLIVIER D. : "Methodology for holarchic ecosystem model based on ontological tool"; ESMC 2004; pp 164-171 (2004)

Chapitre 8 Publications et bibliographie

PREVOST G., TRANOUEZ P., LEREBOURG S., BERTELLE C., OLIVIER D. : "Ecosystem complexity described with ontological tool for multi-scale, multi-model approaches in distributed environment"; JICCSE 2004; (2004)

8.1.3 Article en revue

BERTELLE C., LEREBOURG S., OLIVIER D., PREVOST G., TRANOUEZ P "A Modelling Methodology to Handle Estuarial Ecosystem Complexity" Soumis à *Hydrobiologia* Octobre 2004

8.1.4 Participations à des manifestations

Ces présentations sont téléchargeables sur www-lih.univ-lehavre.fr/~tranouez/research/presentations.

8.1.4.1 Présentations lors de conférences

- IMACS 2000
- ESS 2002
- ESMC 2003
- ESMC 2004

8.1.4.2 Divers

- Présentation pour la clôture du DEA ITA juin 2004
- Poster pour la journée des doctorants projet UMR STICHN

8.2 Bibliographie

- [Amb 03] Amblard F., « Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individuelles Application à des modèles de dynamiques d'opinions », Thèse de doctorat, 2003
- [Bor 93] Borodzicz E., Aragonés J., Pidgeon N., *Risk communication in crisis: meaning and culture in emergency response organizations*, *European Conference on Technology & Experience in Safety Analysis and Risk Management*, Rome, 1993.
- [Bau 04] Bauch C. et Anand M., *The Role of Mathematical Models in Ecological Restoration and Management*, *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 30: 117-122, 2004
- [Ber 00] BERTELLE C., OLIVIER D., JAY V., TRANOUEZ P., CARDON A., « A multi-agent system integrating vortex methods for fluid flow computation », *16th IMACS Congress 2000*, vol. 122-3, Lausanne (Switzerland), August 21-25 2000, electronic edition.
- [Ber 01] BERTELLE C., FLOURET M., JAY V., OLIVIER D., PONTY J.-L., « Automata with multiplicities as behaviour model in multi-agent simulations », *SCI'2001*, Orlando (USA), 22-25th July 2001.
- [Ber 02] BERTELLE C., JAY V., LEREBOURG S., OLIVIER D., TRANOUEZ P., « Dynamic clustering for auto-organized structures in complex fluid flows », *ESS 2002 Conf.*, Dresden (Germany), October 2002.
- [Ber 02b] C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier, J.-L. Ponty, "Adaptive behaviour for prisoner dilemma strategies based on automata with multiplicities", *ESS'2002*, Dresden, Allemagne, 2002.
- [Ber 04] C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand et D. Olivier, « Colored ants for distributed simulations », *ANTS 2004*, Bruxelles, Belgique.
- [Bou 97] BOURGEAT A., « Quelques problèmes de changement d'échelle pour la modélisation des écoulements souterrains complexes », BLASCO F., Ed., *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, Elsevier, 1997, p. 207-213.
- [Bou 98] H. Boukachour, A. Cardon, S. Durand, et F. Lesage, *conception d'un système multiagent adaptatif : application à la gestion de crise*, volume 1998/29, rapport de recherche LIP6, Paris, Février 1998.
- [Bou 99] Bouchon F., *Modèles sous-mailles et schémas multi-niveaux. Application à la simulation des grandes échelles d'écoulements turbulents*, Thèse de doctorat, 1999.
- [Bou 01] BOUSQUET F., LE PAGE C., « Chapitre 7 : Systèmes multi-agents et écosystèmes », BRIOT J.-P., DEMAZEAU Y., Eds., *Principes et architecture des systèmes multi-agents*, Hermès Science, 2001, p. 235-266.
- [Bou 02] Boukachour H., *Système de veille préventive pour la gestion de situation d'urgence: modélisation par agents*, Thèse de doctorat, 2002.

Chapitre 8 Publications et bibliographie

- [Can 32] Cannon W.B., *The wisdom of the body*, Norton & co, New York, 1939.
- [Car 98] A. Cardon, *Modélisation des systèmes adaptatifs par Agents : vers une Analyse conception orientée Agent*, Rapport de recherche LIP6 N° 1998/011, mars 1998
- [Car 00] A. Cardon, *Conscience artificielle et systèmes adaptatifs*, Eyrolles 2000
- [Car 03] Cardon A., *Modéliser et concevoir une machine pensante*, Automates intelligents édition, 2003
- [Cas 92] CASWELL H., JOHN A., « From the individual to the population in demographic models », DEANGELIS D., GROSS L., Eds., *Individual-based models and approaches in ecology*, Chapman et Hall, 1992, p. 36-66.
- [Che 01] Chen, S. & Doolen, G. D. "Lattice Boltzmann method for fluid flows." *Annu. Rev. Fluid Mech.* 30, 329-364
- [Che 83] Cherruault Y., *Biomathématiques* Collection Que-sais-je ?, P.U.F. n° 2052, 1983
- [Coq 97] COQUILLARD P., HILL D., *Modélisation et simulation d'écosystèmes*, Masson, 1997.
- [Cou 89] Cousteix J. *Turbulence et couche limite* collection aérodynamique, Cépaduès éditions, 1989.
- [Cow 98] Cowles H., *The Ecological Relations of the Vegetation on the Sand Dunes of Lake Michigan*, Thèse de doctorat 1898
- [Cru 92] CRUTCHFIELD J., « Discovering Coherent Structures in Nonlinear Spatial Systems », BRANDT A., RAMBERG S., SHLESINGER M., Eds., *Nonlinear Dynamics of Ocean Waves*, Singapore, 1992, World Scientific, p. 190-216.
- [Dea 92] DEANGELIS D., GROSS L., Eds., *Individual-based models and approaches in ecology*, Chapman et Hall, 1992.
- [Del 99] Delahaye J-P. *Information, complexité et hasard* Hermes 1999
- [Dem 96] Demailly J.P. *Analyse numérique et équations différentielles*, P.U.Grenoble, 1996
- [Den 96] Dennett D. Dennett, Daniel C *Darwin's dangerous idea : evolution and the meanings of life* 1st Touchstone ed. Publisher: New York : Simon & Schuster, 1996. Edition 1996
- [DRO 92] DROGOUL A., DUBREUIL C., « Eco-Problem-Solving : results of the N-Puzzle », DEMAZEAU Y., WERNER E., Eds., *Decentralized Artificial Intelligence III*, North Holland, 1992, p. 283-295.
- [DRO 93] « De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes" Drogoul A. PhD Thesis, University Paris 6, November 1993.
- [Dro 95] Drogoul A., Corbara B., Lalande S. « New experimental results on the emergence of (artificial) ants societies », *Artificial societies*, Conte et Gilbert eds, 1995.

- [Dub 04] Duboz R. « Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes - Application à la modélisation multi-échelles en écologie marine » Thèse de doctorat, 2004.
- [Dur 99] Durand S. « Représentation de points de vue multiples dans une situation d'urgence : une modélisation par agents » Thèse de doctorat, université du Havre, 2000.
- [Fav 76] A. Favre *La turbulence en mécanique des fluides*, Ed. Gauthier-Villars, 1976
- [Fer 95] J. Ferber, *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris 1995.
- [Fer 98] Jacques Ferber and Olivier Gutknecht. "A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agent systems." In *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS98)*, pages 128--135, Paris, France, 1998.
- [Fit 96] FITZGIBBON A., PILU M., FISHER R., « Direct least squares fitting of ellipses », rapport, 1996, Edinbourg University.
- [For 61] Forrester, Jay, *Industrial Dynamics*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 1961
- [Fox 94] G. Fox R. Williams P. Messina *Parallel Computing Works* Morgan Kaufmann Publishers
- [Fro 98] FRONTIER S., PICHET-VIALE D., *Ecosystèmes*, Dunod, 1998.
- [Fro 99] FRONTIER S., *Les écosystèmes*, N3483 Que sais-je ?, PUF, 1999.
- [Hol 59] C.S. Holling. *Some characteristics of simple types of predation and parasitism*. Canadian Entomologist, vol. 91, 1959, pp. 385-398.
- [Gan 94] GANDER W., GOLUB G., STREBEL R., « Fitting of circles and ellipses – Least squares solution », rapport, 1994, ETH Zurich.
- [Gas 92] GASSER L., « Boundaries, Identity and Aggregation : Pluralities issues in Multi-Agent Systems », WERNER E., DEMAZEAU Y., Eds., *Decentralized A.I.*, Elsevier, 1992.
- [Gri 99] Grim V. "Ten years of individual based modeling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future?" *Ecological Modeling* 1999
- [Gue 03] Guerrien B. "Théories économiques et idées reçues" dans *Petit bréviaire des idées reçues en économie*, Les Éconoclastes, La découverte 2003
- [Gue 96] Z. Guessoum *Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents*. Thèse de l'Université Paris 6, LAFORIA, mai 1996.
- [Gue 99] Guézennec, L., Romana, L., Goujon, R., and Meyer, R., *Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes*. Programme scientifique Seine-Aval. Ifremer editions. (1999)

Chapitre 8 Publications et bibliographie

[Gut 97] GUTKNECHT O., FERBER J., « Madkit : Organizing heterogeneity with groups in a platform for multiple multi-agents systems », rapport, 1997, LIRMM, Montpellier University, <http://www.madkit.org>.

[Hâr 00] HÂRI S., MÜLLER F., « Ecosystems as Hierarchical Systems », S.E.JORGENSEN, MÜLLER F., Eds., *Handbook of Ecosystems Theories and Management*, Lewis Publishers, 2000.

[Hum 05] A. de Humbolt, *Essai sur la géographie des plantes*, Paris, Schoell, 1805.

[Jor 00] JORGENSEN S., MÜLLER F., *Handbook of Ecosystems Theories and Management*, Lewis Publishers, 2000.

[Kay 00] KAY J., « Ecosystems as Self-Organising Holarchic Open Systems : narratives and the second law of thermodynamics », S.E.JORGENSEN, MÜLLER F., Eds., *Handbook of Ecosystems Theories and Management*, Lewis Publishers, 2000.

[Koe 67] KOESTLER A., *The Ghost in the Machine*, 1967, Arkana, Londres.

[Koe 69] KOESTLER A., SMYTHIES J., *Beyond Reductionism*, Hutchinson, 1969.

[Koe 78] Koestler A., *Janus. A Summing Up* 1978

[Kru 56] J. B. Kruskal, "On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem". In *Proceedings of the American Mathematical Society*, volume 7, pages 48-50, 1956.

[Lan 86] LANGTON C., « Studying Artificial Life with cellular automata », *Physica D*, vol. 22, 1986.

[Leo 80] LEONARD A., « Vortex methods for flow simulation », *Journal of Computational Physics*, vol. 37, 1980, p. 289-335.

[Ler 02] LERBOURG S., « Clustering dynamique appliqué aux écoulements fluides complexes », rapport, 2002, Le Havre University.

[Les 87] LESIEUR M., *Turbulence in fluids*, Martinus Nijhoff Publishers, 1987.

[Les 99] Lesage F. « Interprétation adaptative du discours dans une situation multiparticipants : modélisation par agents », Thèse de doctorat, Université du Havre, 2000.

[Lin 42] Lindeman R. L., *The trophic-dynamic aspect of ecology*, *Ecology*, no 23, no 4, 1942, p. 415.

[Lot 25] A. J. Lotka. *Elements of physical biology*. Baltimore : Williams & Wilkins Co, 1925.

[Mar 97] MARCENAC P., « Modélisation de Systèmes Complexes par Agents », *Techniques et Sciences Informatiques*, , 1997.

[Mar 91] R. Margalef *Teoria de los sistemas ecologicos* PUB, Barcelone, 1991

[Mat 87] Maturana, HR et Varela, F *The Tree of Knowledge*. Shambhala, Boston. 1987

- [Mat 97] MATARASSO P. « Quelques remarques sur l'intégration de modèles climatiques, biophysiques et économiques dans le cadre de recherches sur l'environnement » BLASCO F., Ed., *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, Elsevier, 1997, p. 207-213.
- [McC 65] McCulloch, Warren, ed.: *Embodiments of Mind*, MIT Press, Cambridge 1965
- [Meu 01] Meurisse T. et Vanbergue D., *Et maintenant à qui le tour ? Aperçu de Problématiques de Conception de Simulations Multi-Agents* . in *Actes de la conférence ALCAA 2001*, Bayonne, France
- [Mey 97] Meyer D. « Towards the global : complexity, topology and chaos in modeling, simulation and computation » in *Proceedings of the International Conference on Complex Systems* Nashua septembre 1997
- [Mou98] C. Moulin *Adaptation dynamique d'un système d'aide à l'apprentissage de la géométrie : modélisation par un système multiagent* Thèse de l'université de Rouen, juin 1998
- [Nic 77] Nicolis, G. and Prigogine, I. *Self-Organisation in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations* J. Wiley and Sons, New York (1977)
- [Odu 53] E. P. et H. T. Odum, *Fundamentals of ecology*, Philadelphia, W. B. Saunders Company, 1953
- [OLI 01] OLIVIER D., BERTELLE C., « Modèles d'identification et d'évolution de structures hydrodynamiques dans des flux complexes par des systèmes multi-agents », *XXVII Colloque de l'Union des Océanographes de France*, Villeneuve d'Asq, Septembre 2001.
- [Oli 01b] Olivier C., « Modélisation numérique des phénomènes de transports de matière en estuaire fluvial », Thèse de doctorat, Université du Havre.
- [PAL 92] PALMER J., « Hierarchical and concurrent individual-based modelling », DEANGELIS D., GROSS L., Eds., *Individual-based models and approaches in ecology*, Chapman et Hall, 1992, p. 36-66.
- [Per 95] E.Perrier, C.Mullon, M.Rieu, et G.de Marsily, 1995. Computer construction of fractal soil structures. Simulation of their hydraulic and shrinkage properties, *Water Resources Research*, vol31,no.12, pp.2927-2943
- [Pin 02] PINARDI N., WOODS J., Eds., *Ocean Forecasting*, Springer, 2002.
- [Pri 85] Prigogine, I. and I. Stengers, *Order out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature*. Harper Collins Publications. New York. (1985)
- [Qua88] Quarantelli E. L., *Disaster Crisis Management: a summary of research findings, Jr. of Management Studies*, 25, p. 373-385, 1988
- [Rob 01] Robert R., *L'effet papillon n'existe plus*, Pour la Science, Mai 2001
- [Ros 75] de Rosnay J., *Le Macroscopie*, Editions du seuil, Paris, 1975

Chapitre 8 Publications et bibliographie

[Rus 03] Russel S. et Norvig P. *Artificial Intelligence a modern approach* Pearson International Edition 1995-2003

[Ser 98] SERVAT D., PERRIER E., TREUIL J.-P., DROGOUL A., « When Agents Emerge from Agents: Introducing Multi-scale Viewpoints in Multi-agent Simulations », *MABS*, 1998, p. 183-198.

[Ser 00] SERVAT D., « Modélisation de dynamique de flux par agents », Thèse d'université, Paris 6, 2000.

[Shr 44] E. Shrödinger, *What is life*, New York, Mac Millan.

[Smu 26] Smuts J.C. *Holism and Evolution*, Macmillan & Co Ltd, London 1926

[STE 94] STEP, *Peut-on modifier les processus mentaux de représentation et de décision en situation d'urgence*, Contrat CEE STEP 90-0094, 1994.

[Tan 35] A. G. Tansley, *The use and abuse of vegetational concepts and terms*, *Ecology*, 16, no 3, 1935, p. 299.

[Tan 75] J.T. Tanner. *The stability and the intrinsic growth rates of prey and predator populations*. *Ecology*, vol. 56, 1975, pp. 855-867.

[The 00] Theodoridis S. et Koutroumbas K. « Pattern recognition » Academic Press 2000

[Tra 99] Tranouez P., « Changement d'échelle au sein de la couche de communication d'un SIC » Mémoire de DEA, DEA IARFA Université Pierre et Marie Curie, 1999

[Tra 01] TRANOUEZ P., BERTELLE C., OLIVIER D., « Changing the level of description of a fluid flow in a agent-based simulation », *ESS 2001 Conference*, Marseilles (France), October 2001.

[Tra 03] P. Tranouez, S. Lerebourg, C. Bertelle and Damien Olivier. Contribution à la représentation multi-échelle des écosystèmes aquatiques. JFSMA 2003 Hammamet, Tunisie

[Tur 50] Turing A. *Computing machinery and intelligence* *Mind*, 1959, 433-460

[Ula 62] Ulam S. "On some mathematical properties connected with pattern of growth of figures" *Proceedings of symposium of applied mathematics Vol. 14*, American mathematical society p 215-224

[Vol26] V. Volterra. *Variazioni e uttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi*. Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei. Ser. VI, vol. 2, 1926.

[Von 68] Von Bertalanffy L., *General System Theory foundations development applications*, Georges Brazille inc., New York 1968

[Von 66] VON NEUMANN J., BURKS A., Eds., *Theory of Self-Reproduction Automata*, University of Illinois Press, 1966.

[Wie 65] Norbert Wiener, "*Cybernetics, Second Edition: or the Control and Communication in the Animal and the Machine*", MIT Press, 1965.

[WJ 95] M. Wooldridge and N. R. Jennings, *Intelligent agents : Theory and practice*, Knowledge engineering review, 10(2), 1995.

[WJS 98] Nicholas R. Jennings, Katia Sycara, Michael Wooldridge "A Roadmap of Agent Research and Development" *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 1998

A-P. de Candolle, art. «Géographie botanique», *Dictionnaire des sciences naturelles*, Strasbourg, 1820, vol. XVIII, p. 359.

F. E. Clements, The development and structure of vegetation, *Nebraska botanical survey*, 1904, p. 5.

S. A. Forbes, On some interactions of organisms, *Illinois state laboratory of natural history bulletin*, Peoria, 1880.

V. E. Shelford, Some concepts of bioecology, *Ecology*, vol. XII, no 3, 1931, p. 455.

E. Warming, *Lehrbuch der ökologischen Pflanzengeographie*, Berlin, 1896, p. 2.

Contribution à la modélisation et à la prise en compte informatique de niveaux de descriptions multiples. Application aux écosystèmes aquatiques

Pierrick TRANOUEZ

Résumé :

Nombre de sciences utilisent la simulation comme outil de modélisation. Le but de notre travail est d'améliorer la prise en compte d'échelles multiples dans une simulation informatique. Il nous faut donc comprendre comment les sciences se construisent, et le rapport qu'entretiennent cette épistémologie et la simulation.

Cette thèse commence donc par un chapitre résumant différentes tendances épistémologiques et s'efforce de les rattacher à la tâche qu'on s'est fixé. Le deuxième chapitre présente de manière plus spécifique ce qu'on peut vouloir dire par « échelles multiples » ou « niveau de description » dans différents travaux scientifiques, en insistant plus particulièrement sur ce qui sera notre application principale, l'hydrodynamique et les écosystèmes.

Le chapitre 3 présente alors l'application qui a donné naissance au travail actuel, qui est un système destiné à améliorer l'intelligibilité dans un système de communications écrites entre gestionnaires d'une situation de crise, en utilisant la forme et la dynamique du discours pour aider à résumer sa sémantique.

Vient ensuite un résumé de ce dont traite l'écologie, de l'importance des flux dans les modèles actuels d'écosystèmes, et des tendances les plus répandues actuellement dans la modélisation d'écoulement fluide. Ceci nous amène dans le chapitre 5 à la description d'une application qui s'efforce de gérer différentes échelles dans une simulation d'écoulement fluide, en gardant à l'esprit une intégration ultérieure dans une simulation d'écosystème plus générale. Nous utilisons comme base un modèle dit particulière sur lequel nous appliquons deux méthodes pour détecter des structures ou des organisations au cours de la simulation. Une de celle-ci permet le remplacement des particules de bases qui se sont auto-organisées par une nouvelle entité qui représente la structure en question. La vie sociale subséquente de cette nouvelle entité de simulation peut ensuite mener à la création d'encore nouvelles échelles, et ce d'une manière itérative sans limite supérieure théorique.

Nous terminons avec un article en anglais qui commence à expliciter comment ce travail mènera à une simulation d'écosystème plus générale.

Mots-clefs : Simulation, modélisation, multiéchelle, niveaux de description, écosystèmes

A Contribution to modeling and managing multiple levels of description in a computer simulation Application to aquatic ecosystems

Abstract:

Most sciences use simulation in their usual cycle of self-construction. The focus of our work is improving the handling of multiple scales in computer simulations. We have therefore to understand how different sciences build themselves, and how this epistemology relates to simulation.

The present work therefore starts with a chapter summing up various epistemological tendencies and endeavors to link them to our present goal. The second chapter more specifically presents what is meant by multiple scales or level of description in different scientific work, with an emphasis on what is closer to our future main application, hydrodynamics in ecosystems model.

Chapter 3 presents the early application that in fact prompted the present work, a system meant to improve intelligibility in a written communication system during emergency situations, by using the shape and the dynamics of the discourse itself to help summing up the semantics.

Follows afterwards a summing up of what ecology delves into, the importance of fluxes in modern ecosystems model, and the main approaches of fluid flow modeling in current hydrodynamics. This leads to the relative novelty of our work, which is an application to handling different scales in a fluid flow simulation, with a view to integration in a more complex ecosystems simulation. We use a standard model called vortex based upon which we apply two different schemes to detect structures or organizations in the midst of the simulation. One of these leads to the replacement of the basic particles that self-organized to a new simulation entity that represents this organization or structure. The metaphorical social life of these entities can lead to the creation of still new scales of description, in a iterative theoretical upper open-ended way.

We conclude with the integration of an article (in English) that emphasizes how this work will lead to a more developed ecosystems simulation, and what the ties are.

Key words: Simulation, modeling, multiscale, level of description, ecosystems