



**HAL**  
open science

# Contribution à la modélisation informatique des milieux complexes naturels, implémentée dans des environnements parallèles et distribués

Cyrille Bertelle

► **To cite this version:**

Cyrille Bertelle. Contribution à la modélisation informatique des milieux complexes naturels, implémentée dans des environnements parallèles et distribués. Modélisation et simulation. Université du Havre, 2002. tel-00429163

**HAL Id: tel-00429163**

**<https://theses.hal.science/tel-00429163>**

Submitted on 1 Nov 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.

Université du Havre  
Laboratoire d'Informatique du Havre

**Dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches**

**Spécialité : Informatique**

par

**Cyrille BERTELLE**

**Contribution à la modélisation informatique  
des milieux complexes naturels  
implémentée dans des environnements  
parallèles et distribués  
Application aux écosystèmes aquatiques**

Soutenue le 5 décembre 2002, devant le jury composé de :

François Bourdon,	Professeur à l'Université de Caen,	Rapporteur
Omar Knio,	Professeur à l'Université Johns Hopkins,	Rapporteur
Jean-François Perrot,	Professeur à l'Université de Paris VI,	Rapporteur
Alain Cardon,	Professeur à l'Université du Havre,	Directeur
Serge Huberson,	Professeur à l'Université du Havre,	Examineur
Daniel Krob,	Professeur à l'Université de Paris VII,	Examineur
Edith Perrier,	Chargée de Recherche à l'IRD,	Examineur

# Remerciements

Selon Serge Frontier [103], les écosystèmes sont des lieux où une grande diversité de phénomènes peuvent être observés. Avec un soupçon de dérision, il est agréable de comparer l'entropie générée par un travail de recherche comme le résultat d'un réseau d'interactions entre des constituants matériels et immatériels. Il s'agit bien d'une dynamique conduisant parfois à des attracteurs étranges ou à du chaos déterministe et, dans tous les cas, d'un système ouvert en constante réorganisation dynamique, traversé par des flux énergétiques. Je tiens ici à remercier les différents protagonistes de ces flux qui ont contribué, entre autres, au cycle de matière concrétisée par les quelques pages qui suivent.

Tout d'abord, je remercie l'ensemble des évaluateurs de ce travail, S. Huberson et G. Duchamp pour leur avis concernant mon inscription en HDR, F. Bourdon, O. Knio et J.-F. Perrot pour leur rapport, A. Cardon et E. Perrier pour leur participation au jury. Sans eux, la finalisation du processus n'aurait pas vu le jour. Une démarche scientifique n'a de valeur que lorsqu'elle est évaluée et je les remercie sincèrement d'avoir accepté d'effectuer cette évaluation et d'y avoir ainsi consacré une partie de leur temps.

Ma reconnaissance va également particulièrement aux professeurs qui m'ont accordés leur confiance en me confiant des co-encadrements de doctorants, à savoir S. Huberson et A. Cardon. Ce travail d'encadrement est, en règle générale, la clé d'un développement durable d'actions de recherche et pour les cas particuliers qui me concernent, il a permis de renforcer significativement, voire d'initier des thématiques de recherche (en parallélisation ou en simulation). Vis à vis de ces directeurs de thèses, ces co-encadrements ont été bien au-delà de simples démarches traditionnelles administratives, liées à un fonctionnement normal de laboratoire, et se sont traduits par des échanges et discussions scientifiques suffisamment riches pour compter lourdement dans ma démarche actuelle.

Ma démarche de recherche s'inscrit de manière volontaire dans la collaboration avec de nombreux membres du laboratoire, comme ce rapport le mettra en valeur, je l'espère. Historiquement, il a été nécessaire de déployer des énergies pour faire émerger une structure de recherche significative en informatique au Havre. J'ai participé activement avec certains collègues, à cette action. L'ensemble des membres du laboratoire y a contribué collectivement et a permis ainsi de prendre des marques, mon HDR en est l'une d'elles et j'espère qu'elle ouvrira la porte aux suivants ... Je remercie d'abord l'ensemble des membres du laboratoire pour avoir contribué à permettre ces marquages émergents. Puis, plus particulièrement, je remercie les membres de mon équipe avec qui je partage une certaine passion humble et constructive, mes collaborateurs proches toujours disponibles sur tous les grands et petits chantiers, ceux qui acceptent le

travail ingrat de reprendre des charges pédagogiques et administratives et permettent une réussite collective ... Ils sauront se reconnaître. Hors des laboratoires auxquels j'ai appartenu, je tiens à remercier les personnes avec qui j'ai eu des collaborations constructives dont certaines ont marqué durablement ma carrière de chercheur, je pense notamment à Gérard et Omar.

D'autre part, je n'oublie pas ceux qui sont l'essence même du travail que je défends aujourd'hui, à savoir les étudiants que j'ai eu l'occasion d'encadrer sur des petits ou grands projets, mais avec qui une certaine alchimie d'échanges scientifiques réciproques s'installe d'une manière particulière et propre à chacun. Je pense notamment à Christophe, Bernard, Fred, Caroline, Pierrick, Thomas, Antoine, Marc, Sylvain, Guillaume et ceux avec qui j'ai discuté plus ponctuellement au détour d'un code résistant, d'un projet ou d'un cours de DEA. J'espère qu'ils ont partagé avec moi le caractère créatif que suscitent directement ou indirectement ces échanges.

Bien évidemment, je n'oublie pas ma famille et ceux qui aux côtés de l'éclairage scientifique, m'apportent tant, malgré ma disponibilité qui est sans doute parfois défaillante. Une pensée particulière pour Sophie, Sarah, Marilyn et Laurène pour leur éclairage fondamental, celui du cœur.

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Situation, activités pédagogiques et administratives</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Etat civil, situation et formation</b>	<b>5</b>
1.1	Etat Civil . . . . .	5
1.2	Diplômes de l'enseignement supérieur . . . . .	5
1.3	Déroulement de carrière . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Activités pédagogiques et administratives</b>	<b>7</b>
2.1	Introduction . . . . .	7
2.2	Vacataire, allocataire puis ATER à l'IUT du Havre (de 1987 à 1991) .	7
2.3	Maître de Conférences en Informatique à la FST du Havre (depuis Oc- tobre 1991) . . . . .	8
2.4	Animateur de la Commission Informatique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre (1992 à 1995) . . . . .	8
2.5	Mise en place et déploiement du deuxième cycle en informatique à l'Université du Havre (de 1995 à 2000) . . . . .	8
2.6	Développement d'une offre de formation complète en informatique (1999) . . . . .	9
2.7	Participation au développement d'un serveur Web pédagogique DILI- WEB (1999-2001) . . . . .	9
2.8	Mise en place du troisième cycle informatique à l'Université du Havre (de 2000 à 2002) . . . . .	9
2.9	Fonctions électives et encadrement de la recherche . . . . .	10
<b>II</b>	<b>Travaux de recherche</b>	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>Problématiques de recherche</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Modélisation d'écoulements de fluides</b>	<b>17</b>
2.1	Environnement, encadrements et collaborations de l'action de recherche	17
2.2	Description de l'action de recherche . . . . .	19
2.2.1	Modélisation numérique de la houle . . . . .	19
2.2.2	Modélisation d'écoulements de fluides par des méthodes parti- culaires . . . . .	20
2.2.3	Parallélisation de codes particuliers . . . . .	22
2.2.4	Couplage des modèles d'écoulements fluides et de transport de sédiments dans le cadre des estuaires . . . . .	25

<b>3</b>	<b>Modèles décentralisés de milieux complexes</b>	<b>29</b>
3.1	Environnement, encadrements et collaborations de l'action de recherche	29
3.2	Description de l'action de recherche . . . . .	32
3.2.1	Un projet global de recherche : la modélisation des écosystèmes estuariens . . . . .	32
3.2.2	Les bases et les concepts scientifiques : les systèmes complexes	34
3.2.3	Déploiement du projet . . . . .	35
3.2.4	Les aspects méthodologiques : des modèles comportementaux à base d'automates à multiplicités . . . . .	35
3.2.5	Les aspects liés à la mise en œuvre : la distribution dynamique de systèmes multi-agents . . . . .	41
3.2.6	Les aspects conceptuels : le passage à l'échelle par clustering dynamique . . . . .	47
3.3	Travaux en cours, devenir et perspectives . . . . .	52
3.3.1	Des simulations multi-échelles . . . . .	52
3.3.2	Investir le domaine du vivant dans les modèles d'écosystèmes aquatiques . . . . .	54
3.3.3	Développement de l'équipe MIV . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Conclusions</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>Publications personnelles et encadrées</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie générale complémentaire</b>	<b>65</b>

Ce dossier est complété par un document annexe "Extrait de publications récentes (2000-2002)"

# Introduction générale

Ce dossier défend une habilitation à diriger des recherches et développe mes activités d'enseignant-chercheur à l'Université du Havre, mon Université de rattachement.

Je présente mon investissement personnel et ma participation au renforcement de ma discipline, l'informatique, à l'Université du Havre et à l'émergence d'une activité de recherche significative dans le cadre de la montée en puissance d'un laboratoire, le LIH (Laboratoire d'Informatique du Havre), et d'une formation doctorale, le DEA ITA (Informatique Théorique et Applications) de l'école doctorale SPMI (Sciences Physiques et Mathématiques pour l'Ingénieur) des Universités du Havre et de Rouen.

La présentation qui suit est très orientée par une vision collective des travaux qui y sont exposés. Ainsi je mets en avant le travail d'équipe avec mes collègues ainsi que celui des différents étudiants que j'ai eu l'occasion d'encadrer et de co-encadrer, depuis ma nomination en tant que maître de conférences à l'Université du Havre.

La problématique de recherche développée concerne la modélisation de milieux complexes sous différentes approches. Initialement centré sur la simulation d'écoulements fluides implémentés sur des systèmes informatiques parallèles, ma thématique a évolué vers des conceptions et des domaines d'applications plus vastes et notamment la modélisation des écosystèmes aquatiques dans leur complexité naturelle. Les aspects liés à l'implémentation se sont également réorientés vers des systèmes distribués plus généraux et abordent quelques problèmes liés à la migration dynamique de codes.

Le travail présenté ici traduit un instantané d'une recherche qui s'inscrit dans une dynamique. Il n'a pas pour ambition de présenter un ensemble achevé et il laisse donc une part importante aux multiples avancées et prolongements que suscitent nos travaux actuels.





## **Première partie**

# **Situation, activités pédagogiques et administratives**



# Chapitre 1

## Etat civil, situation et formation

### 1.1 Etat Civil

- Cyrille BERTELLE
- Né le 25 Septembre 1960 à Sainte Adresse (76)
- Marié, 3 enfants
- Nationalité française
- Adresse personnelle :  
25 rue Edmond Rostand  
76620 Le Havre
- Téléphone personnel : 02 35 46 03 35
- Situation :  
Maître de Conférences au Laboratoire d'Informatique du Havre de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre
- Adresse professionnelle :  
LIH - Faculté des Sciences et Techniques  
Université du Havre  
25 rue Ph. Lebon - BP 540  
76058 Le Havre Cedex
- Téléphone professionnel : 02 32 74 43 17
- Email : *cyrille.bertelle@univ-lehavre.fr*

### 1.2 Diplômes de l'enseignement supérieur

- 1977 : Baccalauréat série C, Le Havre.
- 1979 : Deug des Sciences des Structures et de la Matière, Le Havre.
- 1980 : Licence de Mathématiques, Rouen.
- 1981 : Maîtrise de Mathématiques (Options : enseignement des mathématiques, analyse numérique et informatique), Rouen.
- 1982 : DEA d'Analyse Numérique, Paris VI.

- 1991 : Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, spécialité Analyse Numérique, soutenue le 16 janvier 1991, mention très honorable.

Titre : “Simulation numérique d'une houle de canal, appliquée à un modèle simple de transport de sédiments”

Jury :

- C.F. Ducateau, PU Paris VI, rapporteur
- J.C. Paumier, MC J.Fourier-Grenoble, rapporteur
- M. Belorgey, PU Le Havre, examinateur
- J. Chauché, PU Le Havre, examinateur
- M. Leduc, PU Le Havre, directeur
- J.F. Lhuissier, MC Le Havre, co-directeur

### 1.3 Déroutement de carrière

- 1982/1983 : Service National.
- 1984-1987 : Maître auxiliaire au Lycée Françoise de Grâce et vacataire à la Faculté des Sciences et Techniques du Havre.
- 1987-1991 : Allocataire d'Enseignement Supérieur puis Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche au département informatique de l'Institut Universitaire Technologique de l'Université du Havre.
- Octobre 1991 : Maître de Conférences, 2<sup>ème</sup> classe, à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre.
- Janvier 1994 : Maître de Conférences, 1<sup>ère</sup> classe, à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre.
- Depuis octobre 2001 : Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche.
- Année universitaire 2002-2003 : Congé pour Recherche pour une année, obtenu sur le contingent CNU.

## Chapitre 2

# Activités pédagogiques et administratives

### 2.1 Introduction

Mes activités pédagogiques ont été importantes durant les premières années de ma nomination en tant que maître de conférences. J'ai participé activement à la création des second et troisième cycles en informatique qui n'existaient pas alors à l'université du Havre. De nombreuses activités administratives ont accompagné ces responsabilités pédagogiques et ont permis de les soutenir, en offrant à la jeune université du Havre, une filière informatique cohérente, préambule nécessaire à un développement pérenne de la recherche dans cette discipline. Ensuite, ces responsabilités se sont concentrées vers la participation à la politique de recherche de l'université du Havre, à la fois comme membre élu du conseil scientifique et comme directeur adjoint du laboratoire d'informatique du Havre.

### 2.2 Vacataire, allocataire puis ATER à l'IUT du Havre (de 1987 à 1991)

Les enseignements assurés sont :

- Travaux dirigés d'algorithmique en première année de DUT informatique
- Cours, TD et TP de mathématiques appliquées à l'infographie en année post-DUT informatique

**Vacations dans d'autres composantes de l'université du Havre** Les enseignements assurés sont :

- Cours de mathématiques appliquées en formation de Techniciens Supérieurs Spécialisés en implémentation et maintenance de micro-systèmes
- Cours de méthodes numériques en DEUG A
- Cours d'informatique-programmation en cycle A au CNAM (Pascal, CAML et ADA)
- Cours d'analyse numérique en cycle B au CNAM

### **2.3 Maître de Conférences en Informatique à la FST du Havre (depuis Octobre 1991)**

En Octobre 1991, la Faculté des Sciences et Techniques de l'université du Havre recrute ses deux premiers maîtres de conférences en Informatique, dont je fais partie. Les enseignements assurés sont :

- TD et TP en informatique en 2<sup>ème</sup> année de DEUG A
- Cours de programmation scientifique en licence et maîtrise de technologie mécanique
- Cours, TD et TP d'informatique en Maîtrise EEA
- Cours et TD d'analyse numérique matricielle en Maîtrise de mathématiques appliquées
- Cours et TD de modélisation en Maîtrise de Biologie

### **2.4 Animateur de la Commission Informatique de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université du Havre (1992 à 1995)**

La Commission Informatique de la FST, que j'anime pendant cette période, se charge de définir et mettre en place l'équipement pédagogique en informatique à la FST qui doit être polyvalent et utilisable par l'ensemble des disciplines. Il sera constitué de serveurs, de terminaux X et de PC répartis sur plusieurs salles de Travaux Pratiques et connectés en réseau interne, dont l'accès extérieur vers Internet en sera l'enjeu principal. Cette architecture sera ensuite déployée sur l'ensemble de l'université du Havre.

A cette époque, la commission informatique se charge d'animer des présentations et formations aux nouvelles techniques de l'information, aux réseaux et à Internet dont l'utilisation était encore inconnue de nombreux collègues non informaticiens.

### **2.5 Mise en place et déploiement du deuxième cycle en informatique à l'Université du Havre (de 1995 à 2000)**

La discipline informatique à la FST doit alors trouver sa place dans les filières d'enseignement et notamment par la création d'un second cycle dont j'assure la mise en place avec l'aide de quelques collègues, en rédigeant le dossier d'habilitation. Je suis nommé responsable pédagogique de la Licence d'Informatique dès sa création à la rentrée 1996.

Les cours que j'y dispense sont :

- Cours, TD et TP d'analyse numérique en Licence d'Informatique
- Cours, TD et TP de calcul scientifique en Licence d'Informatique
- Cours et TD de l'option Infographie en Licence d'Informatique

## **2.6 Développement d'une offre de formation complète en informatique (1999)**

Autour du rassemblement de l'ensemble des enseignants-chercheurs dans la nouvelle restructuration du laboratoire d'Informatique du Havre, je suis chargé d'animer un groupe de travail qui s'intéresse à redéfinir et compléter un plan de formation cohérent sur l'ensemble des filières informatiques de l'Université du Havre. Les projets principaux qui en résulteront seront une Licence Professionnelle, un DESS et un DEA en Informatique qui viendront finaliser les filières déjà en place et qui sont proposés dans le cadre du renouvellement du contrat d'établissement de l'université du Havre, fin 1999.

## **2.7 Participation au développement d'un serveur Web pédagogique DILIWEB (1999-2001)**

J'ai participé au développement d'un site Web pédagogique de formation à la recherche bibliographique <http://www.diliweb.org>. Ce développement soutenu par un financement spécifique ministériel, était coordonné par P.Y. Cachard, conservateur de la section Sciences de la Bibliothèque Universitaire du Havre. Il propose une démarche innovante d'auto-formation et s'est appuyé sur un travail collaboratif associant bibliothécaires, enseignants-chercheurs et étudiants. Il est souvent référencé comme une initiative innovante dans la communauté nationale ou internationale (on pourra consulter par exemple, les références des sites du SCD de l'Université de Bretagne sud, de la bibliothèque cantonale et universitaire de Lausanne, de l'IUFM d'Alsace, des rencontres FORMIST, du bulletin des bibliothèques de France T. 46, n°5, 2001, ...).

## **2.8 Mise en place du troisième cycle informatique à l'Université du Havre (de 2000 à 2002)**

Suite au projet global de renforcement du plan de formation en informatique à l'université du Havre, les deux diplômes de troisième cycle ouvrent à la rentrée 2000.

J'interviens dans la formation du DESS informatique qui s'intitule SRO (Systèmes Répartis à Objets) :

- Cours, TD et TP sur les objets distribués et CORBA en DESS SRO

## **Co-responsabilité du DEA Informatique Théorique et Applications (depuis 2000)**

En Septembre 2000, on me sollicite pour coordonner, au niveau de l'Université du Havre, le nouveau DEA Informatique Théorique et Applications, co-habilité pour les deux Universités Rouen et Le Havre. Au côté de Gérard Duchamp, responsable sur l'Université de Rouen, je mets en place cette formation pendant l'année 2000/2001 en co-organisant les journées-séminaires et en suscitant des échanges et des collaborations scientifiques entre les deux laboratoires LIFAR (Rouen) et LIH (Le Havre), selon

les recommandations émises par le Ministère, lors de l'habilitation de cette formation doctorale.

Je participe à l'enseignement dispensé dans ce DEA [33] :

- Cours de Tronc Commun D “Modélisation et Implémentation des Systèmes Complexes”

## 2.9 Fonctions électives et encadrement de la recherche

Lors du renouvellement des différents Conseil de l'Université du Havre en Janvier 1999, je présente ma candidature avec succès au Conseil Scientifique. Dans le même temps, je suis élu directeur adjoint du laboratoire d'Informatique du Havre : il s'agit de donner à la discipline informatique les moyens de mettre en place et de confirmer une véritable politique scientifique de recherche. J'essaye par ces fonctions administratives de participer activement à cet objectif.

### **Membre du Conseil Scientifique de l'Université du Havre (depuis 1999)**

Comme membre du Conseil Scientifique de l'Université du Havre, je participe à la politique scientifique générale de l'université, j'essaye d'y agir pour défendre les conditions de travail de ses chercheurs actifs : demande d'efforts supplémentaires pour l'encadrement technique et administratif des laboratoires mais également pour accroître leurs locaux parfois très exigus. Je cherche aussi à y défendre une politique plus ambitieuse en terme de recherche en intervenant régulièrement pour relancer les débats de création d'une école doctorale de site, encore inexistante au Havre à la fin de l'année 2002.

### **Directeur adjoint du LIH (depuis 1999) : restructuration du laboratoire pour l'amener à une reconnaissance comme Equipe d'Accueil (EA 3219)**

En Janvier 1999, l'Informatique à l'Université du Havre se donne les moyens de définir une véritable politique de recherche en restructurant le Laboratoire d'Informatique du Havre autour de son nouveau directeur, Alain Cardon, que je seconde comme directeur adjoint. Dans ces fonctions, mon travail consiste à accompagner la mise en place de la restructuration du laboratoire et de son positionnement dans l'établissement au niveau des filières de formations, du CPER et de sa politique de recherche. Une dynamique importante se met en place et conduira à une reconnaissance du laboratoire par le ministère comme Equipe d'Accueil dès l'année 2000.

Depuis septembre 2001, le directeur du laboratoire, Alain Cardon, en délégation à l'IRD, me sollicite pour assurer sous ses conseils et sa direction, diverses tâches administratives :

- Dossiers CPER : montage d'un dossier de financement pour l'année 2002 (financement obtenu : 14,8 kEuros ) dans le cadre du GIS CRIHS (Groupement d'Intérêt Scientifique - Centre de Recherche en Ingénierie Homme-Système) avec EADS/Matra. Participation au dossier de renouvellement du GIS CRIHS à mi-parcours du CPER en 2001.
- Obtention de 3 financements de thèses en 2001 :



- Une allocation MNESR : Aurélia Rabia ;
- Une bourse régionale doctorale : Antoine Dutot ;
- Une bourse régionale industrielle avec EADS/Matra : Xavier Denis.

J'ai participé au montage et au soutien de la BRD. Je me suis occupé de mettre en place la convention de la BRI en collaboration avec EADS/Matra.

- Obtention de 3 financements de thèses en 2002 <sup>1</sup> :

- Une allocation MNESR : Jérôme Haubert ;
- Une bourse régionale doctorale : Guillaume Prévost ;
- Une bourse du Luxembourg sur une thèse en co-tutelle : Luc Hogie.

J'ai élaboré et soutenu la BRD. Par ailleurs, un dossier de convention CIFRE pour Sylvain Lerebourg (originaire du DESS IMOI de l'Université d'Orléans) est actuellement en cours de montage avec la société INFOSAT (Petit Quevilly).

### **Membre de jurys de thèses**

- B. Adouobo "Simulations numériques des méthodes particulières et particules-maillage sur machines parallèles", spécialité mathématiques appliquées, soutenue le 30/09/1998.
- C. Olivier "Modélisation numérique des phénomènes de transport de matières en estuaire fluvial", spécialité mécanique des fluides, soutenue le 05/04/2001.

---

<sup>1</sup> au jour de la rédaction de ce rapport. D'autres dossiers de financement sont en cours



**Deuxième partie**

**Travaux de recherche**



# Chapitre 1

## Problématiques de recherche

La problématique essentielle développée dans mes travaux de recherche concerne la modélisation des milieux complexes. Des approches multiples seront exposées dans ce mémoire, suivant l'évolution des travaux de recherche présentés. En partant d'approches équationnelles centralisées, j'ai suivi une trajectoire qui m'a conduit vers des modèles décentralisés.

Je vais ainsi présenter une évolution à trois facettes qui concrétise la trajectoire de ma réflexion au travers de l'ensemble des travaux de recherche que j'ai menés :

- Le domaine de simulation abordé trouve sa place progressivement dans le cadre des milieux complexes. Partant d'une simulation d'un phénomène aquatique unique, la houle, nous avons ensuite abordé des modèles particuliers aptes à coupler des écoulements fluides avec des dynamiques de transport sédimentaire. Puis nous sommes tournés vers des approches complètement décentralisées qui doivent permettre à terme de traiter de l'hétérogénéité des constituants fondamentaux d'un milieu estuarien dans toute sa complexité.
- Les méthodologies de conception ont donc été amenées à évoluer parallèlement à l'enrichissement des domaines d'applications traités. Partant de résolutions à base de maillages et de systèmes différentiels, nous nous sommes orientés vers des méthodes particulières distribuées par nature et sans maillage pour finalement nous tourner vers des techniques inspirées de l'intelligence artificielle distribuée et plus particulièrement les systèmes multi-agents.
- Les méthodes d'implémentations et de mises en œuvre effectives ont évolué parallèlement. Initialement les simulations s'effectuaient sur un ordinateur unique, puis nous avons travaillé sur des implémentations parallèles. Les développements informatiques se sont donc fait sur des ordinateurs scientifiques parallèles puissants ou encore sur des réseaux de stations avec un protocole de transmission de messages (PVM ou MPI). Finalement, le paradigme agent que nous abordons aujourd'hui, nous oriente vers des techniques de concurrence de processus ayant chacun une certaine autonomie d'exécution. Le support d'exécution correspond alors aux middlewares de type CORBA avec éventuellement de la migration de codes (ou d'agents).

Le triple aspect de l'évolution des recherches (domaines traités, méthodologies utilisées et techniques d'implémentation) est dû à une démarche scientifique personnelle mais aussi à l'environnement dans lequel s'est effectuée cette recherche. Cet environnement a été conditionné par le développement de la recherche en informatique au

sein de l'université du Havre, comme cela sera précisé dans la suite. Mes travaux de recherche au Havre ont démarré en 1987 (inscription en doctorat) dans le cadre de simulations informatiques au sein du laboratoire de mécanique du Havre. En effet, le LIH, laboratoire d'informatique du Havre, n'a été reconnu par le ministère sous le label d'équipe d'accueil qu'en 2000.

## Chapitre 2

# Modélisation d'écoulements de fluides

En 1987, l'Université du Havre vient d'être créée et peu de structures de recherche sont en place. Je rejoins le laboratoire de Mécanique qui est en pleine phase de développement pour y préparer ma thèse de Doctorat. J'y assurerai un rôle actif d'encadrement doctoral pendant plusieurs années en initiant le développement de méthodes de parallélisation de codes, en participant à l'encadrement de stagiaires et doctorants et notamment au co-encadrement de la thèse de B. Adouobo.

### 2.1 Environnement, encadrements et collaborations de l'action de recherche

#### Thèse de doctorat

Je soutiens ma thèse en janvier 1991 sur une simulation numérique d'un canal à houle [1]. Plusieurs communications dans des congrès accompagnent ce travail [25, 26, 27, 28].

#### Encadrement de deux stages de maîtrise et d'un stage de DEA

- Ma thèse se verra prolongée par des travaux que j'encadre partiellement et qui font l'objet du stage de DEA de A. Rolland [47]. Ce travail a fait partie d'une étude préliminaire en vue d'un contrat MRE avec la Région Haute-Normandie.
- Je participe à des travaux de traitement informatique de données expérimentales [4] qui me conduiront à encadrer le stage de maîtrise d'informatique de C. Broult [42] sur ce sujet.
- Une première étape de prospectives sur la parallélisation de codes de dynamique des fluides est réalisée dans le cadre du stage de maîtrise d'Ingénierie Mathématique de G. Houry [44] dont j'assure l'encadrement.

#### Co-encadrement principal de la thèse de B. Adouobo

En 1993, je propose une nouvelle orientation de recherche au laboratoire de Mécanique sur la parallélisation de codes de calcul de dynamique des fluides. Le directeur de ce

laboratoire, S. Huberson, me propose alors de co-encadrer la thèse de B. Adouobo sur la parallélisation de méthodes particulières. Elle sera soutenue en Octobre 1998 [40] et sera accompagnée de plusieurs communications dans des congrès [21, 22, 7, 23, 31].

### **Collaboration avec O. Knio de l'Université Johns Hopkins (Baltimore - USA)**

Le développement de méthodes de parallélisation de codes particuliers m'amène à collaborer avec O. Knio, de l'Université de Johns Hopkins à Baltimore (USA), pendant les années 1996 et 1997 [35].

### **Participation à l'encadrement de deux thèses**

- Je participe à l'encadrement de la fin de la thèse de F. Hauville, fin 1997, sur la parallélisation d'un code de calcul qui a été développé dans le cadre de ses travaux [39].
- Je participe ponctuellement à l'encadrement de la thèse de C. Olivier qui porte sur une modélisation lagrangienne de l'estuaire de la Seine [143].



## 2.2 Description de l'action de recherche

### 2.2.1 Modélisation numérique de la houle

Nos premiers travaux de recherche [1] à l'Université du Havre ont porté sur la modélisation d'un phénomène hydrodynamique naturel, la houle. La houle est un phénomène naturel dont la naissance est généralement due à l'action des vents ou à une dépression météorologique unique. Si, dans le second cas, le phénomène se construit directement sous son apparence définitive, il en est autrement dans le premier. En effet pour celui-ci, une complexité originelle importante régit de nombreux phénomènes qui diffèrent par leur longueur d'onde, leur sens de propagation et leur amplitude. A une distance plus éloignée de la perturbation originale, des réorganisations opèrent pour aboutir, au loin, à un phénomène unique.

Notre travail a consisté à reproduire numériquement ce phénomène de houle par intégration de sa formulation différentielle sur un domaine à géométrie variable et à comparer nos résultats avec ceux obtenus par des expérimentations physiques dans des canaux.

La méthodologie retenue a été alors de résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes, capables de modéliser des écoulements fluides avec une précision qui est plus limitée par les méthodes de discrétisation retenues, qu'elles engendrent nécessairement, que par le modèle analytique lui-même.

L'expression analytique de ces équations est celle des écoulements fluides visqueux incompressibles. Elle s'écrit de la manière suivante :

– équation de conservation de la masse

$$\text{Div} \vec{U} = 0 \quad (2.1)$$

– équation d'évolution de la quantité de mouvement

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = \frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}} P + \nu \overrightarrow{\Delta} \vec{U} + \vec{F} \quad (2.2)$$

où

$\vec{U} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$  est la vitesse du fluide ;

$P$  est la pression ;

$\nu$  est la viscosité cinématique ;

$\vec{F}$  correspond aux forces extérieures par unité de masse (forces de pesanteur, notamment) ;

$\frac{D\phi}{Dt}$  est la dérivée particulière d'une fonction scalaire ou vectorielle  $\phi$  qui suit le mouvement du fluide :

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2.3)$$

$\overrightarrow{\text{grad}}$ ,  $\overrightarrow{\Delta}$  et  $\text{Div}$  sont respectivement les opérateurs gradient, laplacien et divergence.

La résolution numérique se fait classiquement avec des méthodes de maillage, de type différences finies, volumes finis ou éléments finis. Dans le cas d'un écoulement à

surface libre, comme cela est le cas pour une houle, on utilise un maillage qui doit se dilater dans la direction de cette surface libre. Les alignements des mailles ne sont donc plus respectés et la méthode de différences finies n'est pas bien adaptée à la résolution sauf si l'on introduit des calculs de transformations géométriques. Notre étude avait conduit à l'utilisation de la méthode des volumes finis dont la discrétisation des équations revient à traduire les équations analytiques en terme de flux au travers des faces des mailles, l'incompressibilité supposée du fluide conduisant à un bilan de flux nul sur chaque maille.

Les inconvénients majeurs de ce type de résolution sont les suivants :

- Ces méthodes génèrent des diffusions numériques. Elles sont basées sur des décompositions de domaine par éléments simples de maillage et elles projettent les grandeurs continues des équations en des polynômes de degré donné sur chacune des mailles. Un fort gradient d'une des grandeurs caractéristiques calculées de l'écoulement, génère alors une diffusion numérique lors de son déplacement sur le maillage.
- Le nombre d'équations augmente en fonction des conditions particulières sur la frontière du domaine (par exemple, la sortie libre du fluide). Le problème différentiel se complique encore si l'on introduit des corps étrangers au fluide (obstacles, sédiments, ...) dans le domaine de résolution.
- Ces résolutions initialement réduites à des problèmes "bien posés" sur un domaine de résolution, n'ont pas la possibilité de s'adapter à des transformations dynamiques du domaine lui-même.

Une alternative à cette approche, consiste à modéliser l'écoulement par des méthodes particulières, comme cela est décrit dans le paragraphe suivant.

### 2.2.2 Modélisation d'écoulements de fluides par des 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 [78, 132, 156]. 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.

Dans une méthode particulière, le fluide est décomposé en  $N$  particules tourbillonnaires de position  $(\vec{X}_i)_{1 \leq i \leq N}$  chargées chacune d'un tourbillon  $\vec{\Omega}_i$  traduisant leur propre aptitude à tourner sur elles-mêmes.

Un ensemble suffisamment dense de telles particules décomposant artificiellement le

fluide permet de représenter avec précision son écoulement.

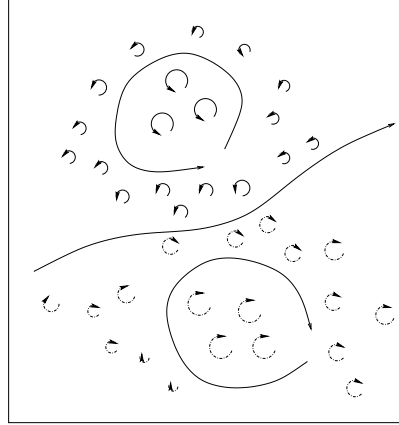


FIG. 2.1: Décomposition d'un écoulement par des particules tourbillonnaires et lignes de courant associées

L'algorithme de ce calcul consiste, à chaque instant  $t$ , à calculer la vitesse de chaque particule induite par la rotation de toutes les autres particules grâce à la formule de Biot-Savart qui s'écrit, dans un domaine bidimensionnel :

$$\vec{U}_p(\vec{X}_i, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq i} \vec{\Omega}_j \wedge \frac{(\vec{X}_i - \vec{X}_j)}{\|\vec{X}_i - \vec{X}_j\|^2} \quad (2.4)$$

Si, de plus, l'ensemble des particules du domaine est transporté par un écoulement global irrotationnel de vitesse moyenne  $\vec{U}_\infty(t)$ , alors la vitesse d'une particule 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 :

$$\vec{U}(\vec{X}_i, t) = \vec{U}_p(\vec{X}_i, t) + \vec{U}_\infty(t) \quad (2.5)$$

Dans l'hypothèse où le fluide n'est pas visqueux, l'étude de l'écoulement se ramène à une convection simple de ces particules et il n'y a pas de diffusion :

$$\vec{\Omega}_i(t) = Cste = \vec{\Omega}_i(0) \quad (2.6)$$

On obtient alors la position des particules par intégration de leur vitesse :

$$\frac{d\vec{X}_i}{dt}(t) = \vec{U}(\vec{X}_i, t) \quad (2.7)$$

On peut utiliser pour cela une méthode d'Euler ou une méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, par exemple.

Le calcul de la vitesse de la formule (2.4) devient singulier si les positions des deux particules  $i$  et  $j$ , notées  $\vec{X}_i$  et  $\vec{X}_j$ , sont très voisines. Il est alors nécessaire d'utiliser une fonction de régularisation qui peut être calculée de différentes manières. On peut, par exemple, remplacer la formule (2.4) par une formulation régularisée du type :

$$\vec{U}_p(\vec{X}_i, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq i} \vec{\Omega}_j \wedge \frac{(\vec{X}_i - \vec{X}_j)}{(\|\vec{X}_i - \vec{X}_j\|^4 + \epsilon^4)^{1/2}} \quad (2.8)$$

où  $\epsilon$  est un petit paramètre dont la valeur peut être prise comme étant voisine de  $h^{3/4}$ ,  $h$  étant la distance minimale entre deux particules voisines.

Pour prendre en compte les phénomènes de viscosité du fluide, on doit calculer la diffusion du tourbillon entre les particules, supposée nulle sinon. Il faut alors recalculer à chaque pas de temps les nouvelles valeurs de  $\vec{\Omega}_i$  en intégrant l'équation différentielle, d'après [77] :

$$\frac{d\vec{\Omega}_i}{dt} = \frac{1}{4\pi\nu(\Delta T)^2} \sum_j (V_i \vec{\Omega}_j - V_j \vec{\Omega}_i) \exp\left(-\frac{\|\vec{X}_i - \vec{X}_j\|^2}{4\nu\Delta T}\right) \quad (2.9)$$

On peut remarquer que la complexité en temps de calcul est élevée ( $\mathcal{O}(n^2)$ ) pour ce type de méthode, d'autant plus que de nombreuses simulations numériques d'écoulements de fluides nécessitent un nombre élevé de particules (couramment plusieurs milliers) afin de pouvoir représenter des phénomènes avec une précision suffisante. Il était donc nécessaire de rechercher à paralléliser ces méthodes comme nous l'expliquons dans le paragraphe suivant.

### 2.2.3 Parallélisation de codes particuliers

Afin de réduire le coût des méthodes particulières, on peut procéder de deux manières :

- rechercher des algorithmes moins coûteux ;
- paralléliser le code de calcul.

La première solution ne peut conduire qu'à substituer les calculs d'interactions mutuelles de type Biot-Savart dont la complexité peut difficilement être réduite, par des calculs approchés. Plusieurs méthodes ont été proposées dans ce sens et les deux principales classes de méthodes sont :

- les méthodes particules-maillage, appelées aussi PIC<sup>1</sup> [116] qui consistent à effectuer un couplage entre le déplacement lagrangien des particules et les résolutions des champs vectoriels dans une grille projetée sur le domaine. Ces dernières résolutions se ramènent à des équations de Poisson et permettent effectivement une réduction de complexité grâce à des algorithmes efficaces de type FFT. Cette complexité peut ainsi être réduite à  $\mathcal{O}(n) + \mathcal{O}(m \log(m))$ , où  $m$  est le nombre de nœuds de la grille utilisée.
- les méthodes multipôles (Fast Vortex Methods) [110] qui consistent à décomposer le domaine en sous-domaines et à calculer globalement les interactions avec les sous-domaines éloignés comme s'il ne s'agissait que d'une seule *meta*-particule. Les sous-domaines s'agrègent en domaines de plus en plus grands en fonction de leur éloignement suivant une procédure arborescente. Les méthodes appelées de corrections locales [48], basées aussi sur une décomposition entre particules voisines ou éloignées peuvent être considérées comme en étant des variantes. La complexité de ces méthodes est annoncée comme étant en  $\mathcal{O}(n)$ .

Dans la suite, nous commençons par exposer la parallélisation directe des méthodes particulières puis nous présentons la méthode de parallélisation des méthodes PIC.

<sup>1</sup>Particle-In-Cell

### Parallélisation directe des méthodes particulières

La parallélisation directe de méthodes particulières s'est faite dans le cadre d'une collaboration avec O. Knio de l'université de Baltimore (USA). Une variante des méthodes particulières, la méthode des filaments tourbillonnaires [127], a été utilisée. Celle-ci discrétise le domaine fluide en segments tourbillonnaires qui permettent un calcul simplifié de l'évolution du rotationnel (cf. équation 2.9).

Pour cette étude, nous disposons de moyens de calcul important, à savoir une machine parallèle Cray T3D, de type MIMD à mémoire distribuée, reliant 512 processeurs de type DEC Alpha et gérant de manière logicielle une mémoire virtuelle partagée.

Les particules étaient réparties entre les différents processeurs disponibles et un système de circulation de données par voisinage<sup>2</sup> était mis en œuvre pour le calcul des formules d'interaction mutuelle. En prenant en compte la symétrie des formules d'interaction, on ramenait la circulation des données à un nombre de communications deux fois moins important que le nombre de processeurs.

Deux techniques de programmation ont été utilisées :

- le "Work Sharing" qui est basé sur l'utilisation de directives spécifiques au T3D gérant la mémoire virtuelle partagée ;
- la librairie d'échange de messages PVM qui était implémentée efficacement sur le T3D.

Il est à noter que les deux techniques donnaient des performances similaires, malgré la couche logicielle de PVM qui permet un portage aisé du code sur de nombreuses architectures différentes, contrairement aux directives spécifiques du Cray T3D.

Des résultats obtenus en fonction du nombre de particules et du nombre de processeurs, sont donnés sur les figures 2.2 et 2.3.

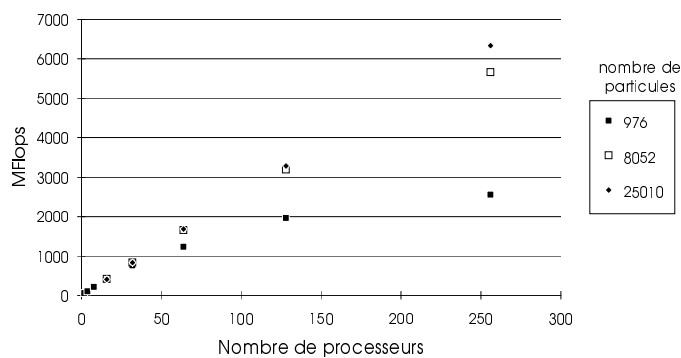


FIG. 2.2: Performances pour différentes configurations du T3D

<sup>2</sup>le coût d'une communication de voisinage étant considérablement moins coûteux que les autres

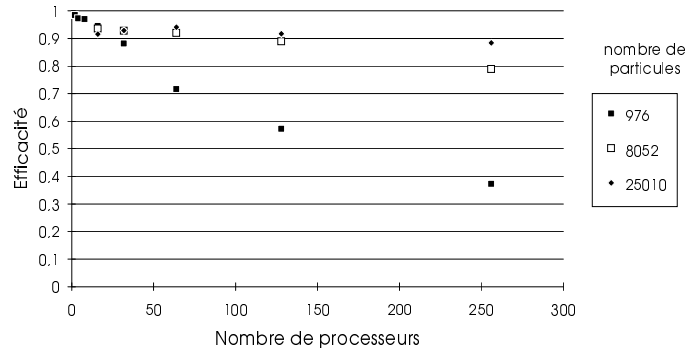


FIG. 2.3: Efficacité pour différentes configurations du T3D

### Parallélisation de méthodes particules-maillage

Cette étude a été développée dans le cadre du travail de thèse de B. Adoubo que j'ai encadré. Elle consiste à superposer une grille de calcul sur le domaine particulaire. La résolution détaillée est décrite dans [40, 5], cette dernière référence étant en annexe du présent mémoire.

Pour résumer la méthode, elle se déroule en 4 étapes :

1. On projette les particules sur la grille ;
2. On résout sur la grille de calcul, par différence finie, l'équation de Poisson donnant le potentiel des vitesses en fonction de la vorticité. On en déduit alors la vitesse aux noeuds puis la variation de vorticité (membre droit de l'équation 2.9).
3. On interpole les vitesses et les variations de vorticité sur les particules.
4. On déplace les particules et on met à jour leur vorticité par résolution des équations différentielles 2.7 et 2.9.

Différents schémas de projection sont possibles. Celui qui a été retenu dans notre étude est le schéma TSC qui consiste à répartir la quantité particulaire sur les  $3^d$  noeuds les plus proches ( $d$  étant la dimension de l'espace dans lequel se fait la résolution).

Deux méthodes de parallélisation ont été implémentées. Dans les deux méthodes, les particules supposées être en nombre important sont distribuées entre les différents processeurs.

- Dans la première méthode la grille de calcul est également distribuée entre les processeurs. Toutefois une zone de recouvrement est définie pour chaque sous-grille (cf. figure 2.4) et permet d'éviter des communications coûteuses entre les processeurs lors des calculs de projection, par exemple.
- Dans la deuxième méthode, la grille de calcul est dupliquée dans sa totalité sur chaque processeur. Ce procédé se justifie lorsque le nombre de noeuds de la grille est largement inférieur au nombre de particules.

Nous donnons quelques résultats obtenus par B. Adoubo lors de la préparation de son doctorat. La machine utilisée était alors une Origin 2000<sup>3</sup> possédant 64 processeurs MIPS 10000.

<sup>3</sup>avec le soutien du CRIHAN, Centre de Ressources Informatiques de Haute Normandie

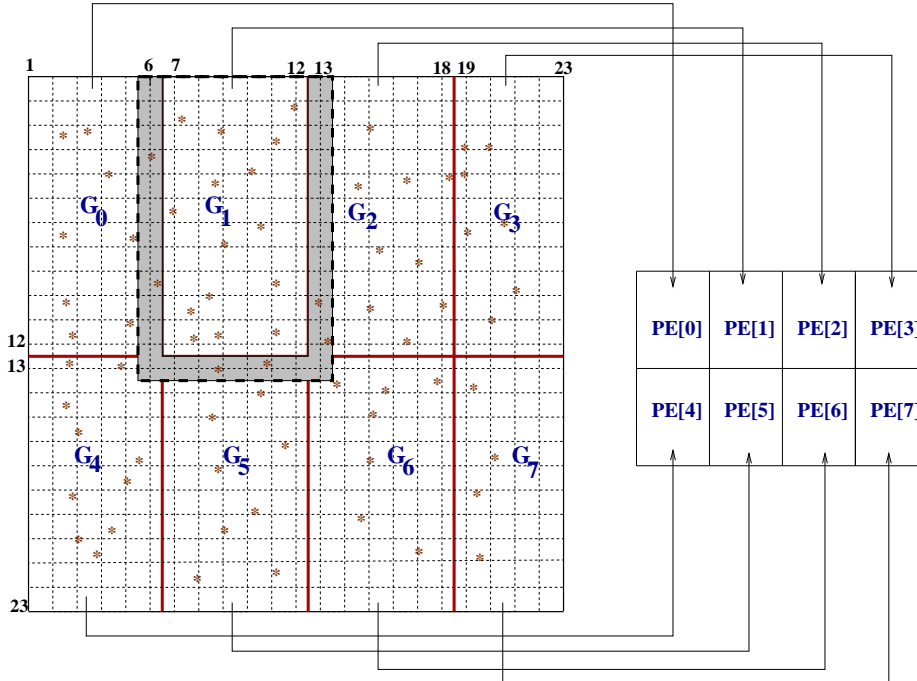


FIG. 2.4: Répartition de la grille avec chevauchements

La figure 2.5 donne des résultats de temps d'exécution lors de l'utilisation simultanée de 8 processeurs et en fonction du nombre de particules et de la taille de la grille de calcul. On peut comparer le temps d'exécution séquentiel avec le temps d'exécution des deux algorithmes.

La figure 2.6 donne l'efficacité (c'est-à-dire l'accélération du code parallèle <sup>4</sup> sur le nombre de processeurs) en fonction du nombre de particules, de la taille de la grille et de la méthode de parallélisation utilisée.

#### 2.2.4 Couplage des modèles d'écoulements fluides et de transport de sédiments dans le cadre des estuaires

Nos travaux de thèse se sont terminés en développant un travail sur l'étude de la modélisation du transport de sédiments dans un écoulement de houle simulé. La résolution y était séquentielle, le transport des particules étant calculé après le calcul global de l'écoulement. Le couplage complet des interactions réciproques des sédiments avec le fluide lui-même n'était donc pas réalisé.

Par ailleurs, l'utilisation de méthodes particulières permet de proposer des modèles plus riches. En effet, elle permet non seulement de modéliser des écoulements, mais aussi de modéliser le transport de matière en suspension au sein même des écoulements.

<sup>4</sup>l'accélération étant elle-même le rapport du temps d'exécution séquentielle sur le temps d'exécution parallèle

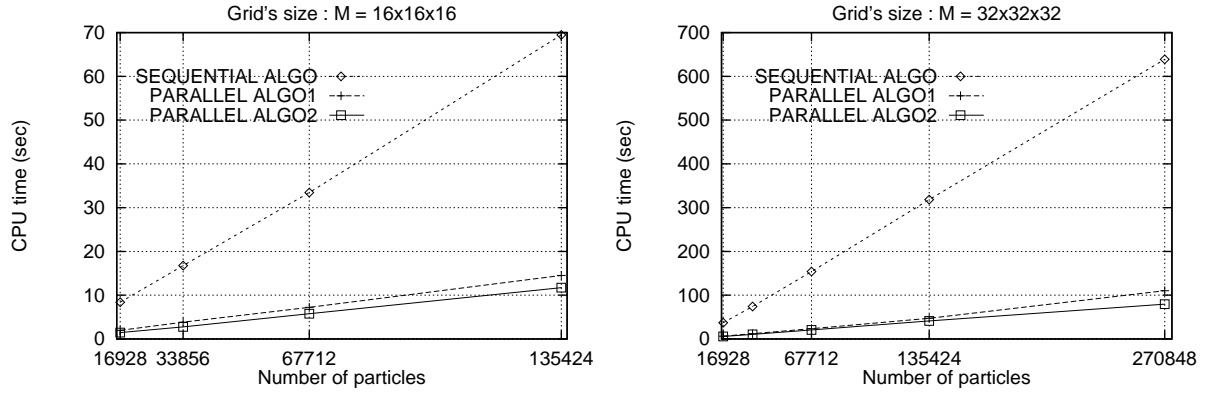


FIG. 2.5: Temps CPU des différents algorithmes

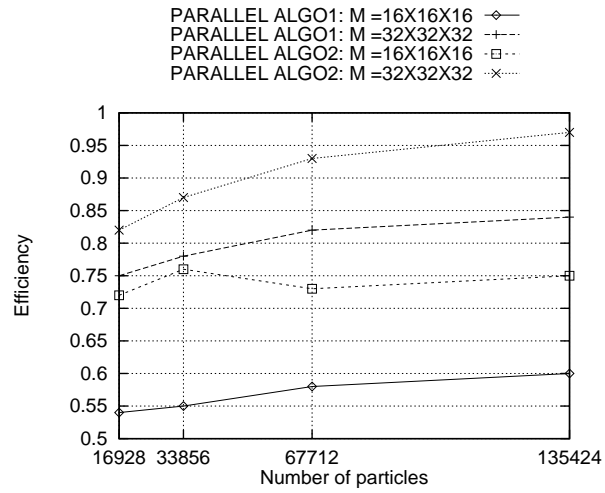


FIG. 2.6: Efficacité des algorithmes parallèles



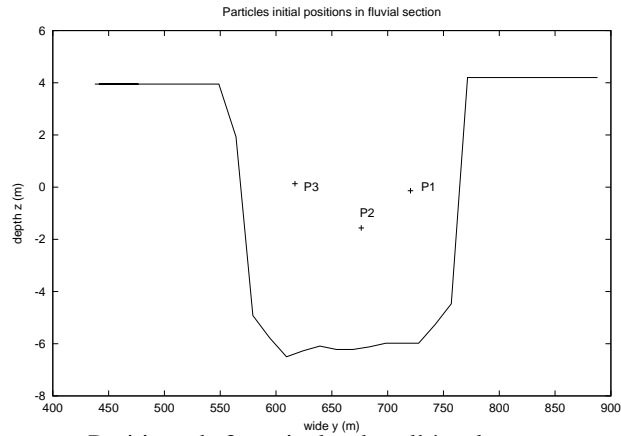
Dans le travail de thèse de Caroline Olivier et notamment dans [143], on développe un modèle mixte qui comporte :

- un écoulement fluvial prenant en compte les effets de marée et basé sur une méthode eulérienne. Une simulation basée sur cette méthode est alors implémentée sur des données topographiques décrivant une partie de l'estuaire de la Seine.
- un modèle de transport de particules en suspension s'appuyant sur des méthodes particulières. Le poids de chacune des particules de calcul correspond à une concentration de sédiments en suspension.

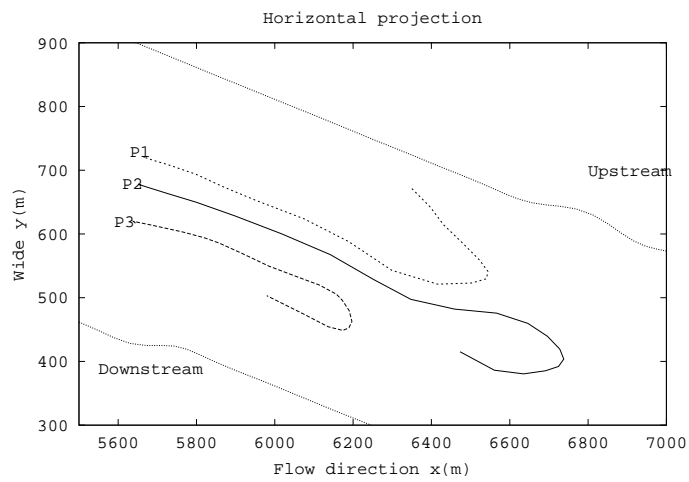
Les résultats obtenus pour l'étude de sédiments dans l'estuaire de la Seine, extraits du travail de thèse de C. Olivier sont schématisés dans la figure 2.7.

Là encore, ce modèle de couplage ne peut permettre de prendre en compte l'action de la dynamique des particules de sédiments sur la dynamique de l'écoulement lui-même. En effet, on suppose par hypothèse que la densité de matière en suspension est faible et que la modification de la dynamique de l'écoulement par les sédiments est négligeable. La connection de ce couplage avec un système multi-agent est alors proposée dans [143]. Une telle approche peut permettre alors d'introduire une plus grande richesse comportementale des constituants du système constitué des particules fluides et des matières en suspension.

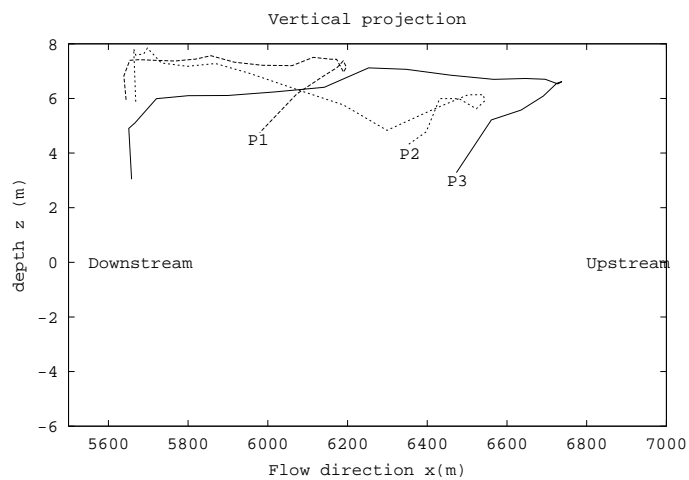
Le travail présenté ici permet de montrer les différentes approches que nous avons été amenées à développer pour simuler des écoulements fluides, vecteurs de transport des milieux estuariens aquatiques. Des premières approches permettent de proposer un couplage avec des matières en suspension qui peuvent être des entités externes au fluide et de nature variée. On obtient ainsi des premières techniques capables de traiter de la complexité de systèmes et notamment des milieux estuariens.



Positions de 3 particules dans l'écoulement



Projection horizontale des trajectoires des particules



Projection Verticale des trajectoires des particules

FIG. 2.7: Simulation de la dynamique de matières en suspension dans une portion de l'estuaire de la Seine

## Chapitre 3

# Modèles décentralisés de milieux complexes

A la restructuration du LIH, en 1999, une dynamique se met en place et des nouvelles orientations sont prises de façon à pouvoir dégager des thèmes fédérateurs qui permettront de structurer le laboratoire. La thématique synthétisée pour ce mémoire, dans l'intitulé "Modèles décentralisés de milieux complexes" répond à cette préoccupation collective. Elle permet de fédérer des travaux de chercheurs initialement issus de domaines variés (analyse numérique, intelligence artificielle, informatique théorique, ...) pour les valoriser dans un axe porteur du laboratoire.

On développera dans ce chapitre, un premier paragraphe qui résume les actions d'encadrements que cette thématique a suscitées et que j'ai animées ou auxquelles j'ai participé. Puis on en donnera le développement scientifique. Finalement on conclura sur les actions en cours restant en développement ainsi que sur le devenir et les perspectives de mon travail au sein de mon équipe de recherche.

### 3.1 Environnement, encadrements et collaborations de l'action de recherche

#### Responsabilité d'un axe de recherche sur la simulation d'écosystèmes estuariens par des SMA

Fin 1999, je prends la responsabilité de l'équipe Agents que j'anime en suscitant des actions de recherche [32, 38]. Je quitte cette fonction en Septembre 2000 alors qu'on me demande de prendre la co-responsabilité du nouveau DEA ITA. Je conserve, toutefois, une activité de coordination d'un axe de recherche dans l'équipe Agents du LIH qui porte sur la simulation des écosystèmes estuariens [24, 16, 17, 19, 20, 15].

#### Co-encadrement principal de la thèse de P. Tranouez

En Septembre 1999, A. Cardon me propose de co-encadrer la thèse de P. Tranouez, boursier régional sur le thème des systèmes multi-agents adaptatifs avec application

aux écosystèmes. Cet encadrement de thèse a donné lieu à plusieurs communications dans des congrès internationaux [16, 17, 20, 15].

### **Participation à l'encadrement de la thèse d'O. Marin - collaboration inter-laboratoires LIH-LIP6**

A partir de la fin de l'année 2000, je participe à la mise en place d'une convention d'échanges scientifiques avec le LIP6 sur la distribution et la fiabilité dans les systèmes multi-agents. Cette convention est appuyée par le démarrage de la thèse d'O. Marin, boursier MNESR pour laquelle je participe partiellement à l'encadrement.

### **Co-responsabilité d'un groupe de travail sur les agents et les automates**

A partir de 2001, je participe à la mise en place d'une collaboration entre les laboratoires LIH et LIFAR (Rouen) sur le thème de l'application des automates aux systèmes multi-agents. Un groupe de travail réunissant des chercheurs des deux laboratoires se met en place et donne lieu à plusieurs communications dans des congrès [12, 13, 34, 14].

### **Co-responsable du stage de DEA de T. Paranthoën - collaboration inter-laboratoires LIH-LIFAR**

J'ai participé à l'encadrement du stage de DEA ITA de T. Paranthoën en collaboration avec J.-M. Champarnaud (LIFAR) dans le cadre de la représentation par automates du comportement des agents dans un SMA.

### **Participation à l'encadrement de la thèse d'A. Dutot**

A partir d'octobre 2001, un financement régional de thèse est accordé à A. Dutot sur la problématique de la distribution et du routage dynamiques avec application au problème du transport urbain.

### **Responsabilité du stage de M. Auzou**

J'ai co-encadré avec M. Flouret et au sein d'un groupe de travail, le stage de DEA de M. Auzou dont le sujet portait sur les modèles de négociations évolutives entre agents à base d'automates.

### **Responsabilité du stage de S. Lerebourg, puis co-encadrement de sa thèse**

J'ai encadré le stage de DESS Ingénierie Mathématiques et Outils Informatiques (Université d'Orléans) de S. Lerebourg sur le clustering dynamique dans des écoulements complexes. Depuis début Novembre 2002, je co-encadre avec Alain Cardon sa thèse financée dans un premier temps sur contrat et qui devrait évoluer vers une convention CIFRE actuellement en négociation.

### **Convention CIFRE avec l'entreprise INFOSAT**

Je m'occupe de l'élaboration d'une convention CIFRE avec l'entreprise INFOSAT sur des applications de plate-formes de broadcast satellitaire pour le problème de la gestion intelligente du transport de marchandises en ville. L'étudiant concerné est S. Lerebourg.

### **Co-encadrement de la thèse de G. Prévost**

Depuis la rentrée 2002, une nouvelle bourse régionale doctorale a été obtenue pour G. Prévost que je co-encadre avec Alain Cardon. Le sujet est la modélisation individu-centrée en milieu estuarien avec des applications aux modèles de contamination microbienne et aux modèles de chaînes trophiques aquatiques dans l'estuaire de la Seine.

### **Développement d'une nouvelle équipe de recherche "Modèles Informatiques du Vivant" (MIV)**

Je participe à la mise en place d'une nouvelle équipe de recherche qui est dirigée par F. Guinand et qui s'intéresse au rapport dual entre l'informatique et le vivant : les modèles informatiques pour le vivant (Bioinformatique, écosystèmes, ...) et le vivant modèle pour l'élaboration d'algorithmes (intelligence collective, auto-organisation, ...)

### **Participation au projet européen TIM**

Le projet Européen TIM (Tactile Interactive Multimedia computer games for visually impaired children) s'intéresse à la mise en place de plate-formes multimodales de développement de jeux pour les enfants mal ou non voyants. Ces jeux doivent pouvoir s'adapter aux niveaux variés de développement psychomoteur des utilisateurs visés. Ce projet a donné lieu à des collaborations internationales avec des universités européennes (University de Halmstad - Sweden, Sunderland University - UK, Tomtebod Resource Centre - Sweden, Université Pierre et Marie Curie - France), ainsi qu'à un financement de 100kEuros pour le LIH.

### **Proposition de participation au réseau européen NEMO (Network of European Marine Organisations), projet REX du 6ème PCRD**

Nous participons à ce réseau européen en phase de construction. Notre action annoncée est la modélisation des environnements marins avec des approches innovantes de types individus-centrés ou agents pour la gestion organisationnelle.

## 3.2 Description de l'action de recherche

Avec la restructuration du laboratoire d'informatique, un recentrage des activités s'est opéré. Ces dernières se sont alors positionnées plus clairement dans la discipline informatique. Cette discipline, souvent mal perçue comme discipline scientifique fondamentale mérite qu'elle soit clairement définie par ses propres acteurs, ses enseignants chercheurs, avec un parti pris de fait. Pour nous, elle correspond à la science des modèles et des systèmes calculables. La recherche en informatique vise un double objectif. Tout d'abord, elle conduit à de nouvelles modélisations calculables, ensuite, elle enrichit la conception, la spécification, le codage et la validation des systèmes fonctionnant sur des ordinateurs.

Sous cet éclairage, nous allons développer comment s'est opérée l'évolution de nos thématiques de recherche en mettant en avant le projet de recherche sur les écosystèmes estuariens que nous soutenons principalement, même si nos actions s'étendent, au-delà de cette thématique, dans le cadre de notre équipe et de collaborations croisées dans les différentes équipes du laboratoire, ainsi qu'à l'extérieur du laboratoire.

La définition de notre projet principal, ses bases scientifiques, sa stratégie de déploiement, les différentes actions qui en résultent, son devenir et sa contribution à la thématique fédératrice de notre équipe de recherche "Modèles informatiques du vivant", sont développés dans la suite.

### 3.2.1 Un projet global de recherche : la modélisation des écosystèmes estuariens

La thématique de la simulation des milieux estuariens est développée au LIH dans le cadre de la modélisation et l'implémentation des systèmes complexes.

Par rapport aux travaux exposés précédemment, il s'agit ici d'étendre la nature du milieu jusqu'alors essentiellement limité au fluide, pour prendre en compte des composants hétérogènes, des sédiments, des contaminants, dont le comportement physique, chimique ou biologique est un des facteurs essentiels dans l'organisation à grande échelle des estuaires. Les transferts applicatifs de ce travail de recherche sont par ailleurs immédiats en terme d'intérêt régional, l'estuaire de la Seine étant un élément structurant dans l'organisation socio-économique de la Région Haute-Normandie. Par ailleurs, le projet scientifique Seine-Aval a permis de constituer une base de renseignements enrichie de connaissances pluri-disciplinaires confrontant expérimentations, analyses statistiques et modèles analytiques classiques. Nos objectifs sont alors de proposer des approches novatrices de simulations fondées sur des modèles décentralisés qui sont adaptés à s'enrichir par des connaissances locales de spécialistes sur chaque constituant. Il s'agit donc, en s'appuyant sur des approches de type individu-centré, de mettre en place, à moyen terme, un laboratoire virtuel d'expérimentation "in silico" dont l'utilisation est à vocation pluri-disciplinaire, comme l'explique la figure 3.1.

Les modèles que l'on souhaite mettre en place doivent gérer dynamiquement des organisations naissantes, se développant ou disparaissant dans le milieu naturel. Les simulations visées doivent avoir ainsi un caractère explicatif sur cet aspect. Le résultat final au terme des études proposées est donc de fournir des outils et des concepts sur

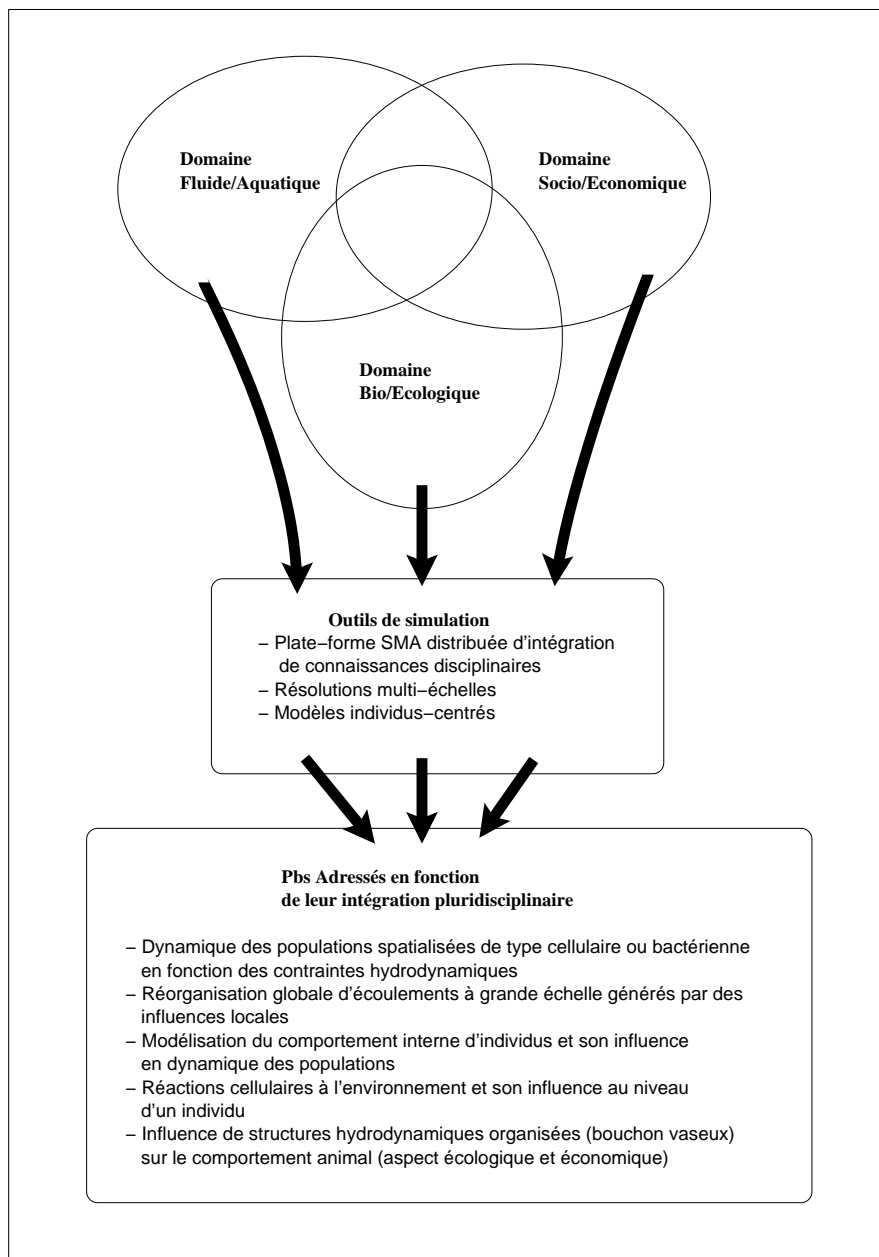


FIG. 3.1: Méthodologie de développement pluri-disciplinaire de simulations d'écosystèmes

les modèles décentralisés qui doivent permettre de faire émerger des organisations spatiales ou temporelles suite aux interactions multiples qui résultent du fonctionnement complexe et dynamique de l'écosystème. Les organisations émergentes doivent ensuite être gérées et intégrées dans les simulations : elles doivent évoluer en se renforçant ou en se déstabilisant. Ces évolutions dues essentiellement au système d'interaction organisations-organisations ou organisations-individus préfigurent des phénomènes de transfert d'échelles entre entités et organisations qui sont la clé de l'évolution dynamique de ces organisations émergentes. On sait que les écosystèmes naturels sont parfois sensibles à de tels phénomènes de transfert qui s'opèrent sur plusieurs niveaux d'échelles.

### 3.2.2 Les bases et les concepts scientifiques : les systèmes complexes

Nos travaux trouvent leur cadre conceptuel de base dans la théorie des systèmes [171], la systémique [85], le paradigme de système complexe [131].

Une représentation schématique simplifiée d'un système complexe est illustrée par la figure 3.2 qui propose un schéma d'émergence d'organisations à partir d'entités en interaction et de rétro-action des organisations sur leurs entités constituantes.

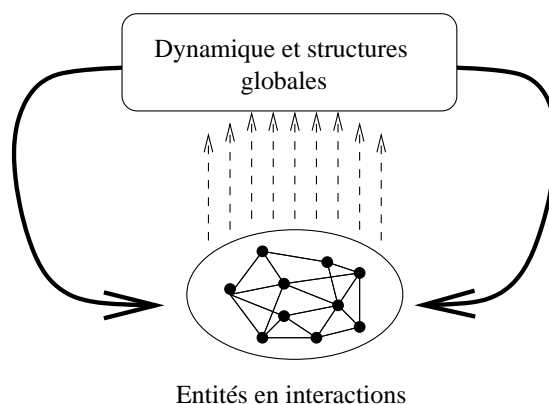


FIG. 3.2: Vue schématique d'un système complexe

En effet, un système - au sens de la systémique - est un ensemble constitutif et des propriétés le structurant en tant que tel.

- L'ensemble constitutif est formé d'entités en interactions mutuelles et en interaction avec un milieu extérieur ou environnement ;
- Les propriétés caractéristiques conférant la structure de système sont les suivantes :
  - des dépendances interactives des éléments/entités du système, indissociables de leurs dynamiques (la modification d'une interaction ou d'un élément peut se répercuter sur l'ensemble)
  - il y a existence ou émergence d'une organisation globale constitutive du système, identifiable et possédant une autonomie globale tout en étant en relation/dépendance avec son environnement. L'organisation émergente possède des



propriétés nouvelles par rapport aux entités dont elle est issue : *“le tout est plus que la somme des parties”*

- Il existe un phénomène de rétroaction de l'organisation globale sur ses parties constitutives : *“le tout est moins que la somme des parties”* [140, 141].

En général, on adjoint la notion de complexité au système lorsqu'il y a un caractère hétérogène des différents constituants du système.

La notion d'écosystème a été introduite initialement par Tansley en 1935 et il est défini comme un système d'interaction entre les populations de différentes espèces vivant dans un site et entre ces populations et le milieu physique. Un écosystème [103, 104] se caractérise par une structuration en une grande variété d'échelles (d'une souche d'arbre en décomposition à l'organisation écologique planétaire). Il est caractérisé en général par des flux énergétiques le traversant et suscitant la création de structures dynamiques dissipatives [151, 152].

Notre travail d'informaticien est donc de concevoir des modèles calculables nourris de l'éclairage des concepts de la systémique. La conception de tels modèles et leur application aux milieux naturels a été l'objet d'études et de projets à caractère pluridisciplinaire, cherchant à dégager des méthodologies. On relèvera parmi d'autres, les travaux effectués à l'Institut Santa Fe et couvrant un vaste ensemble de disciplines [174, 137, 51, 55] et ceux de l'unité de recherche Geodes qui a pour cadre la modélisation des systèmes complexes naturels et sociaux [147, 163, 162].

Nous allons donc maintenant présenter comment nous avons déployer nos actions de recherche pour viser comme objectif la modélisation des milieux estuariens.

### 3.2.3 Déploiement du projet

Un certain nombre d'actions de recherche ont été développées autour de la modélisation des milieux estuariens.

- Une première action a été de rechercher des modèles opérants pour mettre en place des processus automatiques. Elle nous a conduit à nous intéresser à des aspects de formalisation basés sur des automates à multiplicités.
- Une autre action nous a permis d'explorer la problématique de la distribution dynamique des agents, nécessaire pour déployer effectivement la simulation sur des réseaux de machines informatiques à grande échelle.
- Une troisième action a été développée pour étudier plus spécifiquement la problématique de détection automatique de formations tourbillonnaires dans des fluides par une méthode de clustering dynamique. Cette méthode permet alors de faire évoluer ces formations émergentes dans la simulation. Elle préfigure une méthodologie générique de simulation multi-échelles.

Nous allons présenter successivement ces trois actions dans les paragraphes qui suivent.

### 3.2.4 Les aspects méthodologiques : des modèles comportementaux à base d'automates à multiplicités

Les systèmes complexes [131] sont décrits par des entités en interaction, capables de s'organiser, d'une manière dynamique et adaptative, en organisations émergentes. Les systèmes multi-agents sont adaptés à simuler de tels phénomènes si l'on est capable de

fournir des opérateurs effectifs dans les architectures de ces systèmes pour générer et faire évoluer dynamiquement cette auto-organisation [16, 19].

### Les automates à multiplicités, modèles opérants de comportements

Les automates à états finis sont des outils possédant des opérateurs qui peuvent permettre de gérer de manière dynamique de tels processus [159, 75]. Ils sont, sous leur forme booléenne classique, trop pauvres en expressivité. J. Ferber [98] présente un aperçu des différentes architectures basées sur des automates ou certaines de leurs variantes, utilisées les plus fréquemment pour modéliser le comportement d'un agent : nous retiendrons, essentiellement, les ATN (Augmented Transition Networks) [176, 59, 111] et les réseaux de Pétri [148, 126] qui, s'ils enrichissent le modèle de base des automates par une plus grande expressivité, en perdent certaines propriétés opératoires.

Notre propos, ici, est de présenter les intérêts de l'utilisation des automates à multiplicités pour la modélisation du comportement d'un agent et d'un système multi-agent. En effet, grâce à leurs valeurs de sorties intégrées dans leur formalisme, ils permettent de représenter à la fois les perceptions et les actions des agents tout en conservant toute la richesse des opérateurs sur les automates classiques [95]. Ces travaux se sont développés dans le cadre d'un groupe de recherche réunissant M. Flouret, V. Jay, B. Mermet, D. Olivier, J.-L. Ponty, moi-même, ainsi que des stagiaires de DEA, T. Paranthoën et M. Auzou.

Nous rappelons maintenant le formalisme que nous avons retenu et les opérateurs associés que nous avons été amenés à développer.

Un automate à multiplicités, défini à partir d'un alphabet fini  $\Sigma$  et d'un semi-anneau  $(K, \oplus, \odot)$ , est un 5-uplet  $(\Sigma, Q, I, T, \delta)$ , où :

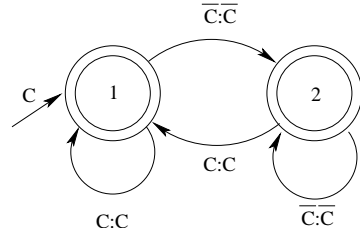
- $Q$  est un ensemble fini d'états ;
- $I, T, \delta$  sont des applications telles que
  - $I : Q \rightarrow K$ ,
  - $T : Q \rightarrow K$ ,
  - $\delta : Q \times \Sigma \times Q \rightarrow K$ , correspond à la fonction de transition ;
- $I$  (resp.  $T$ ) est l'ensemble des états initiaux (resp. finaux).

Lorsque l'ensemble des sorties élémentaires est un alphabet, l'automate est alors un transducteur. Ainsi, les transducteurs sont bien adaptés à la représentation d'agents : l'alphabet d'entrée correspond aux perceptions et l'alphabet de sortie aux actions.

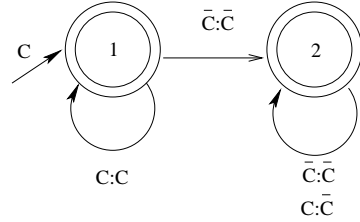
Un autre cas particulier de l'automate à multiplicités est l'automate probabiliste qui génère en sortie des probabilités ( $K = [0, 1]$ , muni de l'addition et de la multiplication réelle) qui doivent vérifier :

$$\forall a \in \Sigma, \forall q \in Q \quad \sum_{p \in Q} \delta(q, a, p) = 1, \quad (3.1)$$

Pour réaliser des opérations sur ces automates, on peut les formaliser par une représentation linéaire  $(\lambda, \mu, \gamma)$  telle que, pour un nombre d'états égal à  $n$  :



Stratégie A : stratégie "tit-for-tat"



Stratégie B : stratégie rancunière

FIG. 3.3: Représentations par transducteurs de stratégies pour le dilemme du prisonnier itéré

- $\lambda \in [0, 1]^{1 \times n}$ , avec  $\sum_{i=1}^n \lambda_{1,i} = 1$  est le vecteur ligne des probabilités d'entrée ;
- $\gamma \in \{0, 1\}^{n \times 1}$  est un vecteur colonne contenant les probabilités de sortie ;
- $\mu : \Sigma^* \rightarrow [0, 1]^{n \times n}$  est un morphisme de monoïdes permettant de représenter les probabilités de transition entre les états pour chaque perception  $a \in \Sigma$  par la matrice  $\mu(a)$ .

Un *chemin réussi* est défini comme un chemin allant d'un état initial à un état de sortie. Ainsi, pour tout  $w \in \Sigma^*$ ,  $\lambda\mu(w)\gamma$  correspond à la somme des probabilités des chemins réussis étiquetés par  $w$  (c'est, en fait, la probabilité que la succession de perceptions  $w$  se produise).

### Un modèle simple de négociation évolutive à base d'automates

On s'intéresse, dans cette section, à un exemple illustrant ce formalisme, mais permettant aussi de construire un modèle simple et générique pour gérer des interactions entre agents qui peuvent évoluer de la coopération à la compétition et vice versa.

Ce modèle d'interaction évolutive ou encore de négociation est basé sur le dilemme du prisonnier [50] qui est un jeu à deux joueurs (ou prisonniers) où chacun a deux actions possibles : coopérer ( $C$ ) avec son adversaire ou le trahir ( $\bar{C}$ ). Ainsi, quatre situations sont possibles pour l'action globale des deux joueurs. Un gain sous forme d'une remise de peine pour chaque prisonnier, est défini pour chacune des situations possibles,

comme cela est décrit dans le tableau suivant (3.1) où les lignes correspondent au comportement du premier prisonnier et les colonnes à celui du second prisonnier.

	$C$	$\bar{C}$
$C$	(3,3)	(0,5)
$\bar{C}$	(5,0)	(1,1)

TAB. 3.1: Tableau des gains du dilemme du prisonnier

Dans la version itérative du dilemme du prisonnier, ce processus est répété sur plusieurs pas de temps. Chaque joueur ne connaît pas l'action de son adversaire au pas de temps en cours, mais il connaît son action au pas de temps précédent. Plusieurs stratégies peuvent alors être mises en œuvre par chaque prisonnier, son objectif étant d'obtenir un gain maximal. Dans la figure 3.3, on décrit deux stratégies avec des transducteurs. Chaque transition est étiquetée par une entrée correspondant à la perception du prisonnier, c'est-à-dire à l'action de son adversaire au pas de temps précédent, et une sortie correspondant à l'action qu'il va effectuer. Le seul état initial sur ces figures est l'état 1, reconnaissable par la flèche d'entrée étiquetée par une seule sortie. Les états finaux sur ces figures sont les états 1 et 2, reconnaissables par les doubles cercles. Dans la stratégie A, le prisonnier reproduit exactement l'action du joueur au pas de temps précédent, elle est couramment dénommée "tit-for-tat" ou encore "un prêté pour un rendu". Dans la stratégie B, le prisonnier choisit de définitivement trahir son adversaire dès que celui-ci l'a fait une seule fois, on la nommera stratégie "rancunière".

Ces automates représentent des stratégies statiques et ils ne sont donc pas adaptés à la modélisation de stratégies évolutives. Pour cela, nous proposons des modèles basés sur des automates probabilistes. Un exemple de tel automate est représenté sur la figure 3.4.

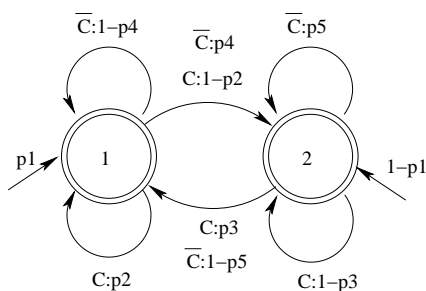


FIG. 3.4: Automate probabiliste à deux états de stratégies multiples pour le dilemme du prisonnier itéré

Cet automate représente toutes les stratégies possibles à deux états pour des comportements coopératifs ( $C$ ) et compétitifs ( $\bar{C}$ ) d'un agent (prisonnier) vis à vis de son adversaire. Les transitions sont étiquetées par des sorties qui sont des probabilités ( $p_i$ ) de réalisation de leurs actions, ces actions elles-mêmes sont identifiables par l'état d'arrivée de la transition (le formalisme correspond ainsi à une extension du modèle d'automate de Moore). L'état 1 est atteint après une coopération et l'état 2 est atteint

après une trahison.

Pour cet automate, la représentation linéaire associée telle que nous l'avons définie, est la suivante :

$$\lambda = (p_1, 1 - p_1) \quad \gamma^t = (1, 1)$$

$$\mu(C) = \begin{bmatrix} p_2 & 1 - p_2 \\ p_3 & 1 - p_3 \end{bmatrix}$$

$$\mu(\overline{C}) = \begin{bmatrix} 1 - p_4 & p_4 \\ 1 - p_5 & p_5 \end{bmatrix}$$

### Algorithmes génétiques pour modéliser des automates adaptatifs

L'application d'un algorithme génétique sur les automates probabilistes, représentant plus généralement des comportements probabilistes d'agents, va nous permettre de mettre en place des stratégies adaptatives pour le dilemme du prisonnier itéré.

Un algorithme génétique gère traditionnellement une population constituée de caractéristiques individuelles, appelées chromosomes. Nous définissons, ici, le génotype de chaque agent comme la suite de toutes les matrices associées à chaque perception et correspondant chacune à un chromosome ; les allèles sont alors les lignes de ces matrices.

Les algorithmes génétiques vont être amenés à produire de nouveaux agents contenant éventuellement des transitions non présentes dans les agents initiaux. Pour n'autoriser que des comportements significatifs, nous définissons une famille de matrices booléennes de transitions  $(\mathcal{T}_a)_{a \in \Sigma}$ , associées à chaque type d'agents et représentant toutes les transitions possibles à partir d'une perception donnée. Le plongement booléen de la matrice de transitions d'un agent  $x$  associée à chaque perception  $a$  doit donc représenter un sous-graphe de  $\mathcal{T}_a$ .

Dans l'algorithme génétique, chaque couple d'agents suit un schéma itératif de reproduction, décomposé en trois étapes :

- la duplication, où chaque agent du couple génère un clone de lui-même ;
- le croisement, où une séquence de lignes des matrices  $(\mu(a))_{a \in \Sigma}$  est choisie arbitrairement. Pour chacune de ces matrices, une permutation des lignes de la séquence choisie est effectuée entre les matrices respectives des deux agents du couple de reproduction ;
- la mutation, où une ligne de chaque matrice  $\mu(a)$ ,  $a \in \Sigma$ , est choisie arbitrairement et où une suite de nouvelles valeurs est attribuée de manière aléatoire aux coefficients de cette ligne, tout en respectant la nature probabiliste de la matrice exprimée par l'expression (3.1). La nouvelle matrice obtenue par mutation doit respecter les transitions autorisées, données par la famille  $(\mathcal{T}_a)_{a \in \Sigma}$ .

Finalement, le déroulement général de l'ensemble des processus de reproduction de tous les agents suit l'algorithme évolutionniste suivant :

1. Pour tout couple d'agents  $(x, y)$ , deux enfants sont créés par les mécanismes successifs de duplication, croisement et mutation ;

2. La performance de chaque agent est évaluée ;
3. Pour chaque quadruplet composé des parents et de leurs enfants, les deux agents les moins performants sont supprimés. Les deux agents restants sont considérés comme étant le résultat de l'évolution des deux parents initiaux.

### Calcul d'émergence organisationnelle à l'aide d'automates adaptatifs

Nous allons maintenant expliquer comment il est possible de modéliser l'émergence d'organisation d'agents grâce aux algorithmes génétiques appliqués sur les automates à multiplicités.

Pour une population  $X$  d'agents, nous définissons une fonction d'évaluation du comportement d'un agent

$$e : \begin{cases} X \rightarrow (\mathbb{R}^+)^{n \times n} \\ x \mapsto M^x \end{cases}$$

telle que  $M_{i,j}^x$  soit la somme des coûts des chemins réussis d'un chemin d'un état  $i$  à un état  $j$ , en supprimant les cycles, quelles que soient les perceptions. Donc  $M_{i,j}^x = 0$  si  $i \notin I$  ou si  $j \notin T$ . Ainsi la contribution du comportement d'un agent pour la formation d'une organisation collective n'est basée, ici, que sur les probabilités d'atteindre un état final à partir d'un état initial. Cela permet de préserver des caractéristiques individuelles dans chaque comportement d'agent même s'il appartient à une organisation.

On définit une distance  $d(x, y)$  entre deux agents  $x$  et  $y$  par une norme matricielle  $\| e(x) - e(y) \|$ . Soit  $\mathcal{V}_x$  un voisinage d'un agent  $x$ , relatif à un critère spécifique, par exemple une distance spatiale, ou encore une distance sur un réseau d'accointance, on définit  $f(x)$  la performance de  $x$  par :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\text{card}(\mathcal{V}_x)}{\sum_{y_i \in \mathcal{V}_x} d(x, y_i)^2} & \text{si } \sum_{y_i \in \mathcal{V}_x} d(x, y_i)^2 \neq 0, \\ \infty & \text{sinon.} \end{cases}$$

Cette performance est d'autant plus grande que le comportement de l'agent sera proche de celui de ses voisins. Elle représente alors la fonction de fitness de l'algorithme génétique décrit précédemment et sert au mécanisme de sélection.

La description des évolutions des agents utilisée conduit à renforcer le processus d'auto-organisation dans un système multi-agent. En fait, l'algorithme de reproduction sélectionne les agents en favorisant la survie de ceux dont le comportement contribue à renforcer des tendances comportementales collectives émergentes. Ce processus peut être traduit en terme de rétro-action du système sur ses entités constitutives.

Comme nous l'avons souligné précédemment, le comportement collectif des organisations qui émergent est essentiellement basé sur les états initiaux et finaux qui caractérisent les chemins réussis, ainsi que les valeurs de probabilités associées à ces chemins. Des états intermédiaires sur ces chemins réussis peuvent être sans incidence sur l'évaluation de ces chemins. Ainsi, des caractéristiques individuelles et spécifiques, définies grâce à ces états intermédiaires, peuvent coexister dans des agents

qui appartiennent pourtant à la même organisation.

Le processus de calcul adaptatif pour l'émergence d'organisations que nous venons de décrire peut être couplé à un autre critère de performance du système relatif à la qualité de résolution d'un problème spécifique. Si cela peut être évalué au cours d'une simulation et de manière concurrente au processus décrit, on ajoute à la fonction de performance qui est à la base de l'algorithme génétique un terme correctif ou complémentaire qui mesure de manière adéquate ces performances spécifiques. La combinaison de ces deux termes qui correspond, d'une part à l'adéquation des agents à des comportements collectifs émergents et, d'autre part à leur adéquation à résoudre efficacement un problème spécifique, nous permet de n'accepter le développement d'organisations émergentes que lorsqu'elles sont consistantes avec un critère approprié, lié à une résolution d'un problème donné. Dans les autres cas, les organisations naissantes sont susceptibles de disparaître.

Nous avons donc défini un formalisme opérant pour l'émergence d'organisations avec rétro-action de celles-ci sur leurs éléments constitutifs, respectant ainsi la caractéristique principale des systèmes complexes. Le coût de ce traitement est la limitation expressive du modèle d'automates. Le processus évolutionniste est limité par une définition préalable de toutes les transitions autorisées. De plus, ce processus génétique ne permet pas d'ajouter des nouveaux sommets aux automates comportementaux. Notons que l'on pourra comparer notre démarche à celle de Samuel Landau du LIP6 [129] qui manipule des ATN relativement voisins des automates à multiplicités que nous avons présentés. Son processus génétique peut opérer à la fois sur les transitions et sur les sommets des automates. En contre-partie et à notre connaissance, cette approche ne permet pas de définir de distance comportementale entre deux agents.

### 3.2.5 Les aspects liés à la mise en œuvre : la distribution dynamique de systèmes multi-agents

Une autre action de recherche, suscitée par la modélisation de milieux estuariens, est celle de la gestion d'un système massif d'entités communicantes. Le problème adressé est alors celui de la répartition physique de la simulation sur des systèmes informatiques distribués, en gérant le placement dynamique des entités ou agents constitutifs de la simulation. Ce travail a été réalisé en collaboration avec D. Olivier et F. Guinand auxquels s'associe A. Dutot dans le cadre de son travail de thèse.

La problématique du placement et de la distribution dynamique trouve son cadre général du point de vue de la migration d'agents. La méthodologie est inspirée du comportement des insectes sociaux et plus spécifiquement des algorithmes fourmis [166, 55, 57] qui servent à résoudre de manière distribuée des problèmes d'optimisation, en s'inspirant du comportement des insectes sociaux. Leur fonctionnement repose sur la notion d'intelligence collective construite par des communications indirectes, dépôt de phéromones, et connue sous le nom du principe de *stigmergie*. Ces méthodes de résolution proposent des solutions robustes qui s'adaptent à des changements dynamiques des données du problème. Elles sont distribuées par nature et n'utilisent que des connaissances locales du problème à traiter.

Les algorithmes fourmis, connus sous l'intitulé "Ant System" ont été appliqués avec

succès dans de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire tels que le voyageur de commerce [90] ou le routage dans les réseaux [73, 158, 56, 119].

Nous présentons dans la suite une variante de ce type d'algorithme.

### Un modèle de graphe dynamique de communication

On appelle *communications effectives*, les communications entre les agents situés sur des processeurs distincts.

Les communications entre les agents sont modélisées par un graphe  $G = (V, E)$  où  $V$  est l'ensemble des sommets correspondant aux entités et  $E$  est l'ensemble des arêtes. Chaque arête  $e = (v_1, v_2)$  représente les communications (quelle que soit leur direction) entre des agents associés aux sommets  $v_1$  et  $v_2$ . Le volume de données échangées entre ces agents correspond au poids de l'arête  $e = (v_1, v_2)$ .

Durant l'exécution, les communications entre les agents peuvent varier, s'initier ou s'arrêter. Ces événements changent les paramètres numériques de ce graphe mais aussi éventuellement la structure et les propriétés de ce graphe.

Dans ce contexte, la seule manière de limiter les communications effectives consiste à réunir sur un même processeur les agents qui communiquent beaucoup entre eux. L'opération préconisée est alors la migration d'agents. Toutefois pour éviter que tous les agents ne migrent sur un seul et unique processeur, le critère doit être couplé avec un critère de répartition de charge.

L'originalité de ce travail consiste alors à résoudre simultanément le partitionnement du graphe (en construisant des clusters d'entités fortement communicantes) et la répartition de charge pour une application dynamique. Le but principal de notre travail consiste à identifier les groupes d'entités fortement communicantes pour donner des indications pertinentes dans le but d'opérer des migrations. Ainsi, ces informations sont d'un grand intérêt pour des simulations multi-échelles nécessitant souvent d'une part un système massif d'entités qu'il faut distribuer pour casser la complexité mais recherchant aussi des indicateurs d'organisations sous-jacentes qui initient des passages à l'échelle.

Notre approche considère le graphe de communications de l'application comme un environnement qui évolue dynamiquement. Nous recherchons alors une solution de type anytime pour l'allocation des agents. Les algorithmes fournis sont bien adaptés à ce type de tâches [91], des premières applications ayant été effectuées pour résoudre des problèmes de routage dans des réseaux de communication [73, 158, 119, 56].

### Algorithme fournis à phéromones colorées

Nous allons proposer une approche basée sur les algorithmes fournis, pour détecter des clusters d'agents en forte communication dans des simulations à grande échelle, réparties sur des systèmes distribués. La nécessité de prendre en compte des critères de répartition de charge nous a amené à introduire la notion de *phéromones colorées* qui



permettent aux fourmis de collaborer pour rechercher les clusters et entrer en compétition pour des critères de répartition.

**Definition 1 (Graphe coloré et dynamique de communications)**

Un graphe coloré et dynamique de communications est un graphe pondéré non orienté  $G = (V, E, C)$  tel que :

- $C$  est un ensemble de  $p$  couleurs où  $p$  est le nombre de processeurs du système distribué.
- $V$  est l'ensemble des sommets. Chaque sommet a une couleur appartenant à  $C$ .
- $E$  est un ensemble d'arêtes. Le poids  $w(u, v) \in \mathbb{R}^+$  associé à chaque arête  $(u, v)$  correspond au volume de communications entre le couple d'agents associés aux sommets  $u$  et  $v$ .

La méthode qui est proposée consiste à changer les couleurs de chaque sommet si ces changements conduisent à une amélioration de l'allocation globale.

L'algorithme *Colored Ant System (CAS)* pour une distribution dynamique est inspiré de l'algorithme *Ant System* [91] et il est décrit ci-dessous. On considère un graphe coloré et dynamique de communications  $G = (V, E, C)$  dans lequel on génère un ensemble de  $n$  fourmis pour chaque couleur  $c \in C$  (on suppose que  $n \gg p$ ).  $\mathcal{F}$  désigne l'ensemble de toutes les fourmis, son cardinal vaut donc  $n \times p$ .

1. Initialement, les fourmis sont réparties uniformément sur les sommets. La couleur de chaque fourmi est fixée par son sommet initial.
2. L'algorithme est basé sur un processus itératif. Entre les pas de temps  $t - 1$  et  $t$ , chaque fourmi traverse une arête et atteint un nouveau sommet. Pendant ce déplacement, elle dépose des phéromones de sa couleur sur l'arête traversée. De plus, chaque fourmi a la possibilité de mémoriser le sommet sur lequel elle était avant son déplacement.

On définit les nombres positifs suivants ;

- La quantité de phéromones de couleur  $c$  déposée par la fourmi  $x$  sur l'arête  $(u, v)$ , entre les pas de temps  $t - 1$  et  $t$ , est notée  $\Delta_x(u, v, c)$ .
- La quantité de phéromones de couleur  $c$  déposée par toutes les fourmis sur l'arête  $(u, v)$ , entre les pas de temps  $t - 1$  et  $t$ , est notée

$$\Delta(u, v, c) = \sum_{x \in \mathcal{F}} \Delta_x(u, v, c) \quad (3.2)$$

- La quantité totale de phéromones de toutes les couleurs déposée par toutes les fourmis sur l'arête  $(u, v)$ , entre les pas de temps  $t - 1$  et  $t$ , est notée

$$\Delta(u, v) = \sum_{c \in C} \Delta(u, v, c) \quad (3.3)$$

- si  $\Delta(u, v) \neq 0$ , le taux de phéromones de couleur  $c$  sur l'arête  $(u, v)$  entre les pas de temps  $t - 1$  et  $t$  est noté

$$K_c(u, v) = \frac{\Delta(u, v, c)}{\Delta(u, v)} \quad (3.4)$$

Ce taux vérifie  $K_c(u, v) \in [0, 1]$ .

3. La quantité courante de phéromone de couleur  $c$  présente sur l'arête  $(u, v)$  au pas de temps  $t$  est notée par  $\tau^{(t)}(u, v, c)$ . Sa valeur initiale (lorsque  $t = 0$ ) est 0 et ensuite elle est calculée suivant les équations récurrentes suivantes :

– si  $\Delta(u, v) \neq 0$ ,

$$\begin{aligned} \tau^{(t)}(u, v, c) &= \rho K_c^\gamma(u, v) \tau^{(t-1)}(u, v, c) \\ &\quad + K_c(u, v) \Delta(u, v, c) \end{aligned} \quad (3.5)$$

– si  $\Delta(u, v) = 0$ ,

$$\tau^{(t)}(u, v, c) = \rho \tau^{(t-1)}(u, v, c) \quad (3.6)$$

$\rho \in [0, 1]$  représente la persistance de la phéromone intervenant dans le mécanisme d'évaporation.  $K_c(u, v)$  et  $\gamma$  représentent des facteurs de répulsion. Ils contribuent à faire décroître la quantité de phéromone lorsque de nombreuses fourmis d'autres couleurs ont traversé l'arête. Ainsi  $\rho K_c^\gamma(u, v)$  dépend de la quantité de phéromones des autres couleurs et contribue à l'évaporation de la phéromone de couleur  $c$ .

4. On définit  $p(u, v_k, c)$  la probabilité de transition pour une fourmi de couleur  $c$  sur l'arête  $(u, v_k)$  dont le volume de communication est noté  $w(u, v_k)$ .
- Au pas de temps initial ( $t = 0$ ),

$$p(u, v_k, c) = \frac{w(u, v_k)}{\sum_{v \in \mathcal{V}_u} w(u, v)} \quad (3.7)$$

– Après ce pas de temps initial ( $t \neq 0$ ),

$$p(u, v_k, c) = \frac{(\tau^{(t)}(u, v_k, c))^\alpha (w(u, v_k))^\beta}{\sum_{v_q \in \mathcal{V}_u} (\tau^{(t)}(u, v_q, c))^\alpha (w(u, v_q))^\beta} \quad (3.8)$$

où  $\mathcal{V}_u$  est l'ensemble des sommets adjacents à  $u$ .

Les valeurs relatives de  $\alpha$  et  $\beta$  donnent une pondération entre le feed-back positif engendré par les phéromones et le volume de communications. Nous verrons sur les exemples qui suivent que cette pondération est un des facteurs majeurs de la convergence de l'algorithme.

Le choix de la prochaine arête traversée par une fourmi dépend des probabilités précédentes. De plus, pour empêcher que les fourmis oscillent entre deux sommets, on introduit dans la formule précédente, un facteur de pénalisation  $\eta \in [0, 1]$ . Soit  $\bar{v}_x$  le dernier sommet visité par la fourmi  $x$ , la nouvelle formule de probabilités corrigée est :

$$p_x(u, v_k, c) = \frac{(\tau^{(t)}(u, v_k, c))^\alpha (w(u, v_k))^\beta \eta_{x,k}}{\sum_{v_q \in \mathcal{V}_u} (\tau^{(t)}(u, v_q, c))^\alpha (w(u, v_q))^\beta \eta_{x,q}} \quad (3.9)$$

où

$$\eta_{x,q} = \begin{cases} 1 & \text{si } v_q \neq \bar{v}_x \\ \eta & \text{si } v_q = \bar{v}_x \end{cases} \quad (3.10)$$

5. La couleur du sommet  $u$ , noté  $\xi(u)$  est obtenue à partir de la couleur dominante des arêtes adjacentes :

$$\xi(u) = \arg \max_{c \in C} \sum_{v \in \mathcal{V}_u} \tau^{(t)}(u, v, c) \quad (3.11)$$

### Expérimentation

Le modèle a été implémenté par A. Dutot. Il a été testé pour déterminer des valeurs numériques valides des différents paramètres qui le composent.

Initialement et comme décrit précédemment, on répartit uniformément des couleurs sur les sommets et des fourmis par couleur. On impose que le nombre de fourmis par sommet soit toujours supérieur à son degré (c'est-à-dire à son nombre d'arêtes incidentes).

Comme décrit dans les figures 3.5 et 3.6, on valide l'algorithme sur des graphes où apparaissent clairement des clusters d'entités fortement communicantes et qui sont reliés par des arêtes à faible communication.

La méthode retenue pour estimer la qualité des solutions est basée sur l'évaluation de deux critères. Le premier consiste à diviser le coût total des communications, noté  $e$ , par la somme des communications effectives (entre agents situés sur des processeurs différents), notée  $s$ . On note  $r_1 = e/s$  ce ratio. Un autre critère, noté  $r_2$  permet de mesurer la répartition de charge : soit une couleur  $c$ ,  $v_c$  le nombre de sommets de cette couleur et  $p_c$  la puissance du processeur associé. On définit :

$$r_2 = \frac{\min \mathcal{E}}{\max \mathcal{E}} \quad \text{où} \quad \mathcal{E} = \left\{ \frac{v_c}{p_c}; c \in C \right\}$$

On présente deux cas tests illustrés par des figures montrant la configuration initiale d'un graphe de communication dynamique coloré et la configuration obtenue après plusieurs pas de temps. Le premier cas test (3.5) est basé sur une configuration initiale avec prédominance de couleur dans chaque cluster pressenti. Le deuxième cas test (3.6) est basé sur une configuration initiale sans prédominance de couleur dans chaque cluster pressenti.

On observe sur ces exemples une convergence rapide vers une solution acceptable. Toutefois, l'algorithme devient très sensible aux paramètres si l'on part d'une configuration initiale éloignée d'une solution possible comme dans le deuxième cas test.

Une autre analyse est décrite dans la figure 3.7 où l'on étudie l'importance relative des paramètres  $\alpha$  (proportionnel aux quantités de phéromones) et  $\beta$  (proportionnel aux volumes des communications) dans la recherche de solutions. Dans ce diagramme, un  $\times$  signifie que l'algorithme ne trouve pas de solution satisfaisante et ne se stabilise pas. un  $\phi$  signifie que l'algorithme ne trouve pas de solution mais se stabilise. Finalement, un  $\bullet$  signifie que l'algorithme trouve une solution et se stabilise sur celle-ci.

Ce travail effectue un placement dynamique d'agents dans une simulation implémentée dans un environnement informatique distribué. La poursuite de ce travail consiste alors à utiliser ce placement pour suggérer au système des migrations de certains de ses agents. La décision de rendre ces migrations effectives peut dépendre de la stratégie des agents eux-mêmes ou encore du système en tant qu'organisation active. La suite

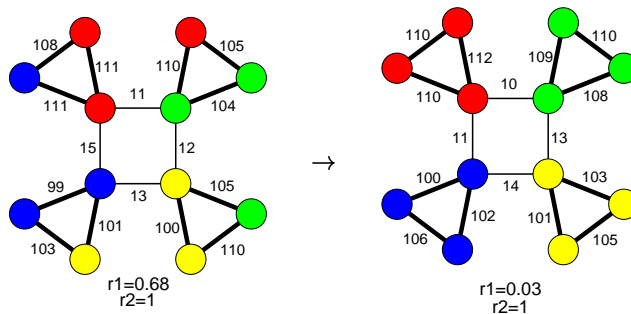


FIG. 3.5: Test A de l’algorithme CAS sur un réseau de clusters avec prédominance de couleur dans la configuration initiale. Le nombre de fourmis vaut 100. Les paramètres sont fixés à  $\{\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.8, \eta = 0.01\}$ . La solution est trouvée après 5 pas de temps.

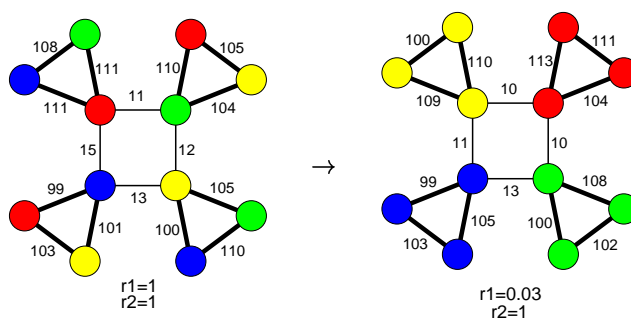


FIG. 3.6: Test B de l’algorithme CAS sur un réseau de clusters sans prédominance de couleur. Le nombre de fourmis vaut 100. Les paramètres sont fixés à  $\{\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0.3, \eta = 0.0001\}$ . La solution est trouvée après 8 pas de temps.

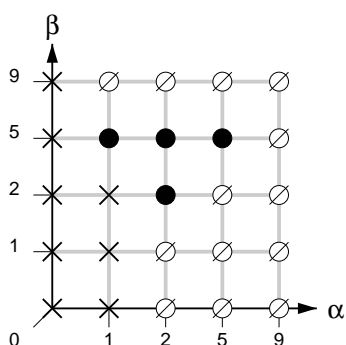


FIG. 3.7: Etude de la convergence de l’algorithme en fonction des valeurs respectives de  $\alpha$  et  $\beta$

de ce travail consistera alors à modéliser la rétro-action du système multi-agent sur ce système de placement dynamique.

### 3.2.6 Les aspects conceptuels : le passage à l'échelle par clustering dynamique

Cette action de recherche consiste à représenter un écoulement fluide complexe sur deux niveaux d'échelles :

- des particules élémentaires qui évoluent suivant les lois des méthodes particulières définies au chapitre 2 ;
- des organisations tourbillonnaires émergentes que l'on doit détecter et faire évoluer dans les simulations.

Nous développons dans la suite les méthodes retenues pour la détection et l'identification des structures ainsi que pour la modélisation de leur évolution. Ces travaux s'appuient sur une équipe constituée de V. Jay, D. Olivier et moi-même ainsi que P. Tranouez dans le cadre de sa thèse et de S. Lerebourg, stagiaire au laboratoire, qui a implémenté une partie importante des développements informatiques décrits dans la suite.

#### Détection de structures cohérentes dans un fluide

La détection de structures cohérentes se décompose en deux étapes principales. On détecte d'abord des clusters de particules voisines partageant des propriétés similaires (même signe de rotationnel, par exemple). Puis pour chaque cluster, on calcule l'ellipse la plus proche de sa frontière, du fait que l'ellipse est la forme courante des tourbillons naturels.

La première étape est résumée dans la figure 3.8. La triangulation de Delaunay est calculée sur l'ensemble des particules, suivie de l'arbre de recouvrement de poids minimal. Puis on supprime les arêtes de longueurs relativement grandes ou connectant des particules de rotationnel opposé. On obtient alors une forêt d'arbres qui représente les formations émergentes de clusters.

L'enveloppe convexe de chaque cluster est ensuite calculée et finalement une identification de cette enveloppe par une ellipse est effectuée. Cette identification revient à rechercher le minimum de la somme des carrés des distances algébriques entre chaque point de l'enveloppe convexe et l'ellipse.

$$D(A) = \sum_{i=1}^N F(A, X_i)^2$$

où

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

est l'équation de l'ellipse,  $X_i = (x_i, y_i)$  est un point de l'enveloppe convexe et  $A = (a, b, c, d, e, f)$ .

Il est alors nécessaire d'ajouter une condition supplémentaire entre les coefficients pour que le système puisse être résolu, comme l'un des deux critères suivants :

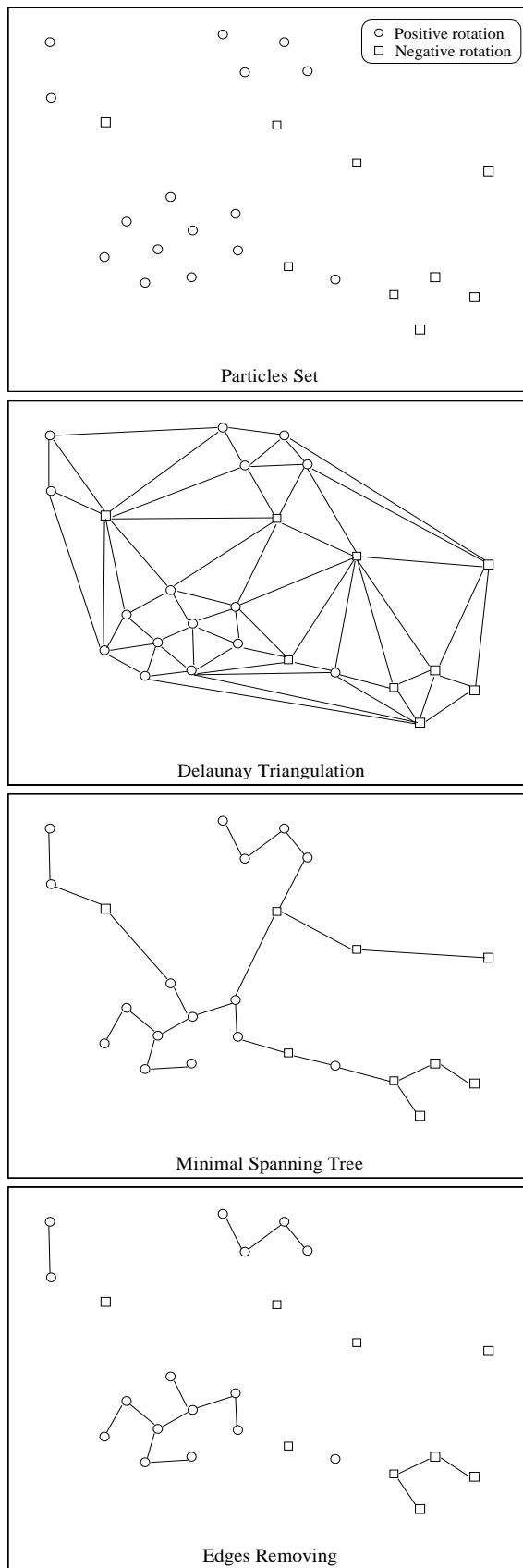


FIG. 3.8: Sous-étapes successives pour la formation des clusters

- le critère de Gander [105] :  
 $a + c = 1$
- le critère de Fitzgibbon [99] :  
 $4ac - b^2 = 1$

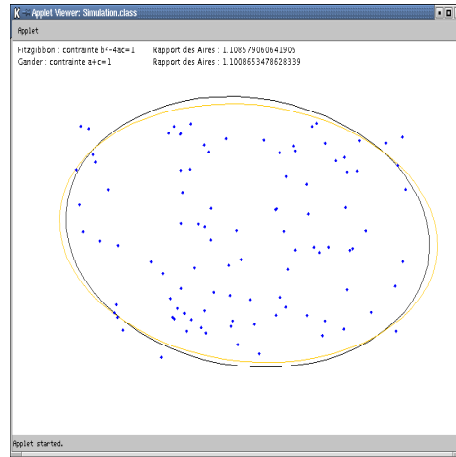


FIG. 3.9: Identification par une ellipse du cluster de particules. L'ellipse foncée correspond au critère de Fitzgibbon. L'ellipse claire correspond au critère de Gander.

Un exemple du procédé d'identification avec les 2 critères est donné sur la figure 3.9.

Ce processus d'identification doit être complété par des critères de compacité (densification des points de l'enveloppe convexe) afin d'obtenir des ellipses dont la frontière ne s'éloigne pas trop de l'enveloppe convexe. Finalement, l'excentricité de l'ellipse est calculée afin de supprimer celles qui sont trop aplaties et non conformes aux tourbillons naturels dont la forme optimale est le cercle.

### Modélisation à base d'automates pour l'évolution et la stabilité des structures fluides

Une fois les structures fluides détectées, il faut modéliser leur évolution pendant la simulation. Différents types d'interactions doivent être prises en compte. Des structures proches, de rotation opposée, se déstabilisent mutuellement. Des structures proches de même rotation renforcent mutuellement leurs stabilités. Ces évolutions qualitatives sont modélisées dans chaque structure par un éco-agent [93] représenté par un automate à multiplicités [12]. Ce type d'automate est bien connu pour modéliser des interactions d'agents et résoudre ainsi, de manière distribuée, des problèmes classiques de l'Intelligence Artificielle. Ici cette résolution distribuée, éco-résolution, conduit à résoudre les caractères non linéaires de l'ensemble du système d'interactions.

Rappelons qu'un éco-agent est constitué de :

- un état interne qui est l'un des suivants : être satisfait ( $S$ ), rechercher sa satisfaction ( $SS$ ), fuir ( $F$ ) ou rechercher la fuite ( $SF$ ) ; son état initial est ( $SS$ ) et son état final est ( $S$ ), il correspond au but de l'agent ;
- des perceptions élémentaires qui sont :

- être attaqué, noté  $A$  ;
- percevoir des gêneurs (c'est-à-dire des agents l'empêchant d'être satisfait), noté  $I$ .
- des actions élémentaires qui sont :
  - fuir ( $TF$ ) ;
  - se satisfaire ( $TS$ ) ;
  - attaquer d'autres agents ( $TA$ ) ;
  - ne rien faire ( $N1$ ).

Le comportement d'un éco-agent peut être représenté par l'automate de la figure 3.10. Les transitions sont étiquetées par des couples correspondant aux perceptions et aux actions associées à cette transition (séparées par une barre verticale). Les actions viennent d'être décrites et les perceptions correspondent aux quatre combinaisons de l'existence ou non des perceptions élémentaires décrites auparavant :  $a = (A, I)$ ,  $b = (A, \bar{I})$ ,  $c = (\bar{A}, I)$ ,  $d = (\bar{A}, \bar{I})$ .

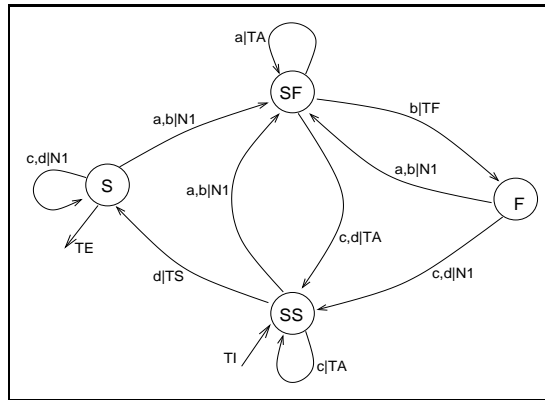


FIG. 3.10: Représentation d'un Eco-agent par un transducteur

Utiliser des éco-agents comme modèles comportementaux pour un problème spécifique consiste à définir le sens, pour ce problème, des deux perceptions élémentaires (être attaqué et percevoir des gêneurs) et des quatre actions élémentaires (ne rien faire, attaquer, fuir et se satisfaire). Nous donnons le sens à ces notions pour le problème d'interaction de structures :

- Percevoir des gêneurs signifie qu'une structure intercepte une autre ou est sur sa trajectoire proche (c'est-à-dire dans une zone d'interaction). La figure 3.11 résume les différents cas d'interception de structures de rotation opposée dans un voisinage proche et les traduit en terme de perceptions.
- Attaquer une structure signifie lui envoyer un message.
- Etre attaqué signifie être récepteur d'un précédent message.
- Fuir signifie être dans une phase de déstabilisation. Dans ce cas, les structures réduisent leur dimension et génèrent des particules élémentaires sur leur frontière, en préservant la totalité du rotationnel (cf. la figure 3.12).
- Se satisfaire soi-même signifie accroître sa propre stabilité. Dans ce cas, la structure cherche à agréger les particules voisines de même rotationnel. Des arbres de recouvrement minimaux sont générés à partir de points situés sur la frontière, dans le but



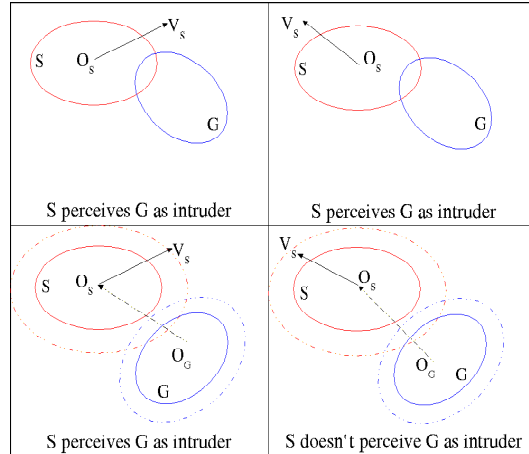


FIG. 3.11: Les différentes perceptions de gêneurs

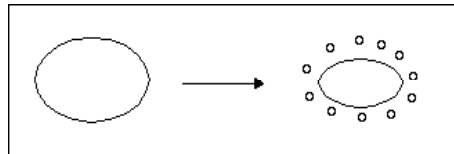


FIG. 3.12: Fuite d'une structure

de relier des particules de même rotationnel que la structure elle-même. Si la triangulation de Delaunay associée à chaque arbre est compacte (par rapport à un ratio entre la somme des aires de ses triangles sur l'aire de l'enveloppe convexe), alors les particules correspondantes sont agrégées et un nouveau calcul d'identification permet de mettre à jour la forme de l'ellipse associée à cette structure. la figure 3.13 résume ce procédé : les particules sur la gauche seront agrégées ; les particules du haut de l'ellipse ne le seront pas en raison de la non compacité de la triangulation qui pourrait être la conséquence du lâcher d'un tourbillon en formation.

### Implémentation et résultats de simulation

Une implémentation d'une simulation basée sur les principes présentés précédemment a été effectuée en Java par S. Lerebourg [45]. L'interaction des structures a été implémentée à partir de la plate-forme Madkit [115]. Des résultats qualitatifs montrent des simulations illustrant les processus de stabilisation ou déstabilisation, suite à des détections automatiques. La figure 3.14 montre l'évolution d'un anneau de structures fluides de rotationnels positifs autour d'une structure de rotationnel négatif. Une suite de doublets de particules élémentaires contrarotatives sont générées sur le bord droit et induit un déplacement vers l'anneau.

Cette expérimentation montre l'effet de la rotation de l'anneau sur lui-même. Les particules élémentaires jouent un rôle de déstabilisation. La structure centrale va alors se réduire puis disparaître, générant des particules élémentaires qui se diffusent dans

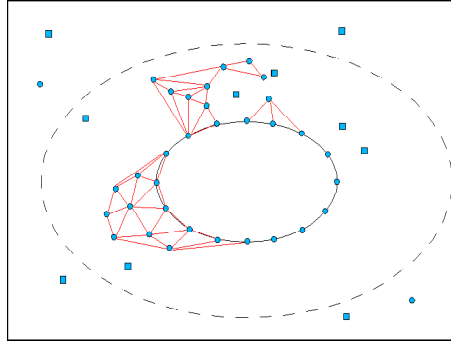


FIG. 3.13: Agrégation à partir d'une structure dans le cadre du processus de satisfaction

l'écoulement.

Nous proposons ainsi une méthodologie de gestion de structures auto-organisées dans l'écoulement fluide. Les modèles d'interactions mis en œuvre sont suffisamment génériques pour pouvoir être réutilisés lorsque ces organisations sont d'une autre nature (obstacles, sédiments, bactéries, ...). Nous disposons ainsi de modèles capables de gérer l'interaction complète entre le fluide et ces organisations (action du fluide sur l'organisation et réciproquement).

### 3.3 Travaux en cours, devenir et perspectives

Le bilan des actions restant en développement est décrit ici, ainsi que les perspectives de développement de mon travail qui s'inscrit dans le cadre de l'équipe de recherche MIV (Modèles Informatiques du Vivant).

#### 3.3.1 Des simulations multi-échelles

On a décrit dans le précédent paragraphe une méthodologie pour le passage d'un niveau élémentaire de description à un niveau organisationnel détecté ou émergent. Le cadre du travail qui s'applique aux écoulements fluides est tout à fait généralisable et utilisable dans un autre contexte. Le poids des particules, ici leur vorticité, peut correspondre à une grandeur d'une autre nature. La suite de ce travail consiste à décliner la méthode pour qu'elle opère de manière récursive et ainsi conduire à une mise en œuvre de la simulation sur plusieurs niveaux d'échelles. Ce travail correspond au développement du travail de thèse de P. Tranouez que je co-encadre.

Il est à noter que l'approche que nous avons retenue pour définir les méthodes de changement d'échelles consiste à faire opérer aux simulations des changements de modèles dans le milieu même qu'elles gèrent. Ainsi, de manière dynamique, ces simulations sont à même de modifier un modèle particulier en un modèle organisationnel. Rappelons que ces mêmes simulations ne sont, par nature, que le déroulement temporel (la trajectoire) du ou des modèles qui la constituent. L'approche de résolution multi-échelles engendre ainsi une rétro-action de la simulation sur ses modèles constitutifs et s'inscrit dans le paradigme du complexe.

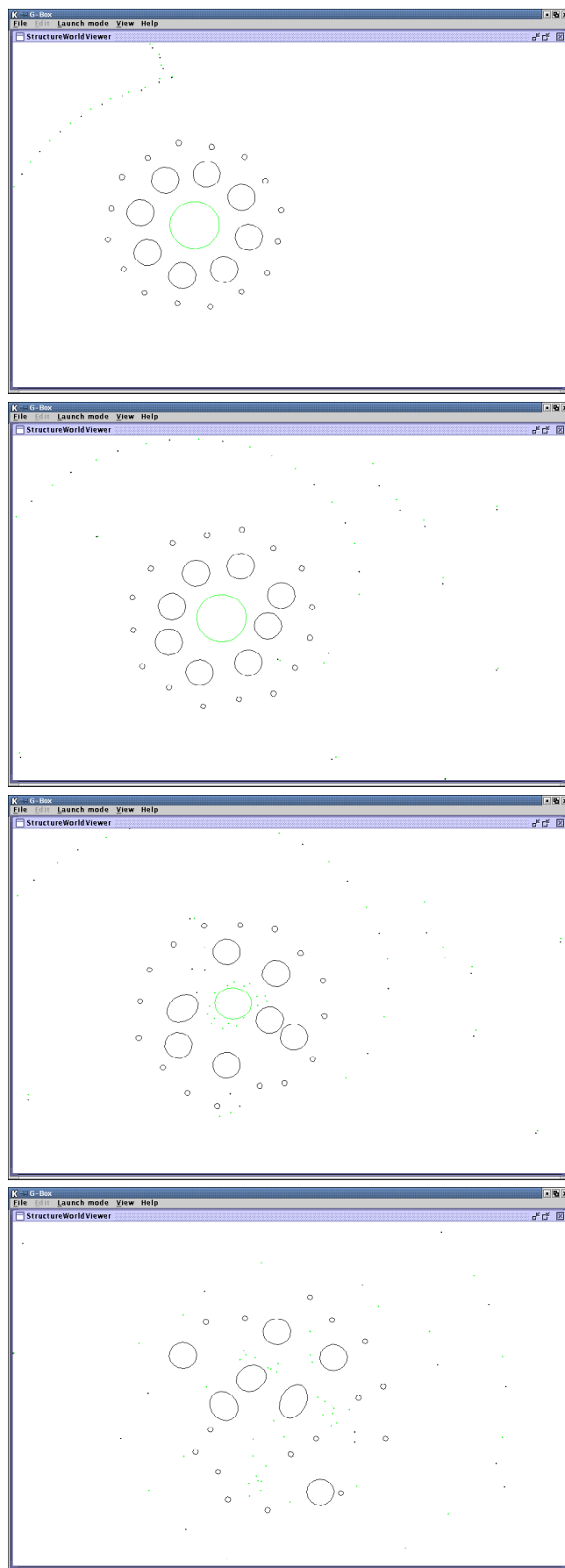


FIG. 3.14: Evolution d'un anneau de structures

### 3.3.2 Investir le domaine du vivant dans les modèles d'écosystèmes aquatiques

Une autre perspective importante du projet de simulation des écosystèmes aquatiques est la modélisation de composantes biologiques. Afin d'appuyer significativement cette perspective, une demande de bourse régionale doctorale a été demandée et vient d'être obtenue pour G. Prevost. L'objectif de son travail consiste à mettre en place des simulations à base de modèles individus-centrés qui doivent permettre d'intégrer des connaissances pluridisciplinaires. Grâce à ces modèles, il s'agit de participer à deux sujets d'études concernant directement l'estuaire de la Seine :

- La modélisation de la contamination aquatique microbienne en couplant des modèles hydrodynamiques particulières et multi-échelles avec des modèles individus-centrés comportementaux de micro-organismes tels que des bactéries et des virus.
- Le comportement complexe des réseaux trophiques qui s'y développent et la dynamique de populations d'espèces animales aquatiques étudiées par les scientifiques dans le cadre de l'estuaire de la Seine.

Les interventions concrètes que nous envisageons de réaliser, en réponse à ces problématiques, ont pour objectif de fournir des méthodes et des outils de simulation informatique distribuée de modèles décentralisés. Ils doivent permettre de mieux connaître et maîtriser les influences sur l'écosystème estuarien de chacun des constituants pris en compte dans le modèle.

Le résultat final au terme des études proposées est de fournir des outils et des concepts sur les modèles décentralisés. Elles doivent permettre de faire émerger des organisations spatiales ou temporelles suite aux interactions multiples qui résultent du fonctionnement complexe et dynamique de l'écosystème. Des connaissances disciplinaires spécifiques pourront être ajoutées aux modèles par les spécialistes concernés. On cherche ainsi à mettre en place des plates-formes informatiques permettant d'intégrer des connaissances spécifiques et de simuler les dynamiques qui en résultent sur plusieurs niveaux d'échelles dans l'écosystème.

Nous envisageons pour ce travail de collaborer avec des laboratoires de l'Université du Havre, le laboratoire de mécanique et le laboratoire d'écotoxicologie des milieux aquatiques. Nous pensons aussi collaborer avec d'autres laboratoires du Pôle Universitaire Normand de Rouen et Caen (laboratoire de biologie et biotechnologies marines). Nous envisageons d'initier des échanges scientifiques sur ce sujet en prenant pour appui le réseau européen NEMO (Network of European Marine Organisations) auquel nous avons souscrit et qui s'intéresse au développement soutenable et à la gouvernance des espaces côtiers et maritimes.

### 3.3.3 Développement de l'équipe MIV

Mon équipe de recherche de rattachement, au sein du LIH (Laboratoire d'Informatique du Havre) est l'équipe MIV (Modèles Informatiques du vivant). Mes travaux s'inscrivent dans cette thématique et la volonté de développement affichée par la politique scientifique de cette équipe et à laquelle j'ai souscrit, devrait m'amener à renforcer encore les liens entre les modèles auxquels je m'intéresse et le vivant dans sa globalité.

### Les objectifs de l'équipe MIV

Les orientations actuelles des recherches de l'ensemble de notre équipe s'inscrivent dans la thématique des modèles informatiques du vivant et prennent pour cadre de développement les systèmes informatiques distribués et parallèles. L'informatique ainsi concernée poursuit deux objectifs :

- Tenter de comprendre et d'expliquer le fonctionnement et l'organisation des systèmes complexes du monde vivant par la conception de modèles et la mise en œuvre de simulations.
- S'inspirer des systèmes vivants et de leurs mécanismes spécifiques pour élaborer de nouveaux modèles conceptuels et pour définir de nouvelles approches plus adaptées aux caractéristiques des systèmes informatiques distribués et parallèles.

Dans la suite, je vais présenter un travail de collaboration croisée au sein même de notre équipe de recherche qui fédère des individus et différentes actions. A partir de ce type d'équipes, il doit se développer naturellement des méthodologies transversales aux différentes actions. Ces méthodologies émergent de compétences et d'échanges de points de vue des différents membres de l'équipe. L'action qui suit s'est développée en suivant un tel processus et a conduit à une démarche originale pour résoudre un problème de génomique.

### Séquençage de l'ADN et systèmes complexes

Nous proposons par cette action, une contribution de méthodes issues des milieux complexes et de l'intelligence collective pour le traitement du séquençage de l'ADN par les procédés SBH (Sequencing By Hybridization). Ce travail a été mené en collaboration avec A. Dutot, F. Guinand, D. Olivier et A. Rabia.

A l'issue du processus de séquençage par hybridation d'un morceau d'ADN, on obtient un spectre qui est un ensemble d'oligonucléotides. Ces derniers sont constitués de plusieurs nucléotides correspondant aux bases adénine, cytosine, guanine et thymine. A partir du spectre, on cherche à reconstruire la séquence d'origine qui contient des erreurs de différentes types :

- des erreurs positives : les oligonucléotides sont dans le spectre mais pas dans la séquence ;
- les erreurs négatives : les oligonucléotides ne sont pas dans le spectre mais dans la séquence ;
- les erreurs de répétition : les oligonucléotides apparaissent plusieurs fois dans la séquence, mais une seule fois dans le spectre.

A partir de ce spectre, on définit un modèle basé sur l'utilisation de graphes orientés.

On commence par construire un  $k$ -graphe (cf. figure 3.15) :

- Les sommets sont les oligonucléotides du spectre ;
- Les arcs pondérés décrivent tous les recouvrements possibles entre les oligonucléotides. Leur pondération vaut  $n - 1$  pour  $n$  correspondant au nombre de décalages nécessaires pour obtenir le recouvrement.

On en déduit alors un graphe appelé SBH-graphe (cf. figure 3.15) :

- Les sommets sont les oligonucléotides du spectre et éventuellement ceux supposés manquants de la séquence d’ADN. Ces derniers traduisent des erreurs négatives potentielles qui sont matérialisées par des doubles cercles ;
- Les arcs matérialisent les recouvrements obtenus par un unique décalage.

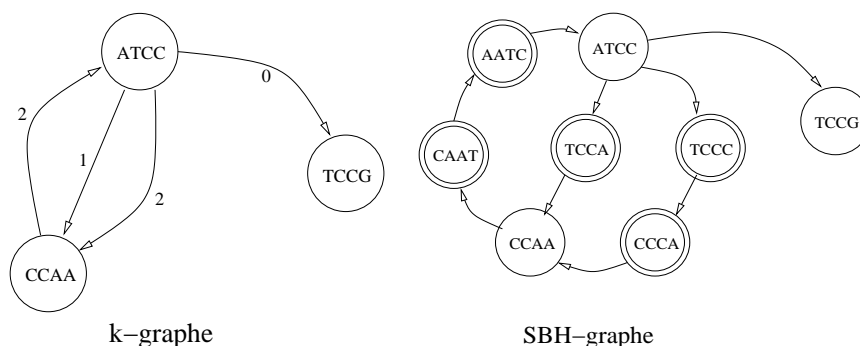


FIG. 3.15: k-graphe et SBH-graphe du spectre ATCC, TCCG, CCAA

Le problème posé consiste alors à retrouver une séquence de bases qui satisfasse à certaines contraintes sur le nombre total de ses éléments constitutifs, mais également sur des bornes concernant le nombre d’erreur de chaque type. Cela se traduit alors sur le modèle à base de graphes, à explorer des chemins qui satisfont à des contraintes :

- longueurs extrêmes bornées par des constantes,
- nombre d’erreurs négatives et positives également borné.

Pour résoudre ce problème, une résolution distribuée modélisée par des castes de fourmis artificielles, appelé DiMAntS -Distributed Multi-castes Ant System [8, 10] a été défini :

- des fourmis exploratrices parcourent le graphe et y déposent leur chemin parcouru ;
- des nettoyeurs compressent les chemins en y identifiant les boucles.

Ce processus de traitement par répartition de tâches permet d’obtenir, par une approche distribuée, les solutions possibles cherchées. Une implémentation a été effectuée par O. Douville dans le cadre de son stage de maîtrise d’informatique (cf. figure 3.16).

Grâce à cette étude, on montre comment des procédés d’intelligence collective développés par ailleurs dans le cadre de la distribution dynamique de systèmes à base d’agents, peut permettre d’élaborer des méthodes de résolution de problèmes connexes.

### Le vivant et la complexité

Le double aspect des objectifs affichés par l’équipe MIV, à savoir élaborer des modèles pour le vivant et s’inspirer du vivant pour concevoir des modèles de systèmes distribués, nécessite, à mon avis, l’éclairage des systèmes complexes. Ces derniers sont incontournables pour la représentation de nombreuses organisations du vivant mais ils sont aussi nécessaires pour la conception et l’élaboration de modèles distribués, inspirés du vivant.

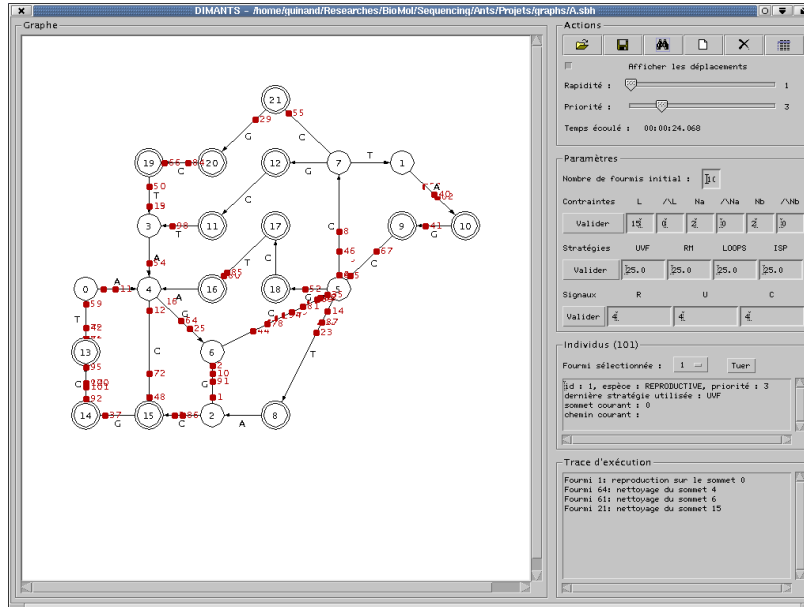


FIG. 3.16: Dimants

Nos travaux de collaborations sur les actions en bioinformatique et en génomique sont sources de nouvelles réflexions sur ce lien entre le vivant et l'informatique, science des modèles. En effet, prenant appui sur le récent rapport de l'académie des sciences sur les systèmes moléculaires organisés [88], les organismes biologiques, dans leur conception, renforce la pertinence de la modélisation par des systèmes complexes et nous éclaire à nouveau pour l'élaboration de modèles informatiques. Ces organismes biologiques dans leur définition et leur constitution moléculaire, s'appuient sur les deux aspects suivants :

- Le génome spécifie directement ou indirectement un codage des molécules biologiques des organismes vivants, grâce essentiellement aux acides nucléiques (ADN, ARN).
- Le génome ne spécifie pas l'organisation des systèmes biologiques, notamment au niveau de leur processus d'assemblage ou de repliement. Un grand nombre de facteurs environnementaux de ces molécules intervient dans ces phénomènes. Ces derniers conduisent alors à des phénomènes d'auto-organisation issus d'une grande complexité du milieu dans lequel ils évoluent et auquel ils contribuent.

D'une part, il est clair que toute tentative de modélisation à partir de cette description appelle au paradigme des systèmes complexes. D'autre part, à l'image du vivant et du fonctionnement moléculaire des organismes biologiques, les systèmes informatiques distribués à grande échelle et le méta-computing peuvent être pensés et conçus à deux niveaux :

- Un codage de chaque constituant logiciel du système qui est basé sur des règles comportementales prédéfinies par le concepteur ;

- Une évolution décentralisée de ces systèmes par interaction mutuelle de ces composants logiciels et de leur environnement. Le milieu de ces interactions doit être lui-même conçu mais la trajectoire des composants et des systèmes ne pourra résulter que de la dynamique du système en cours de simulation. Cette trajectoire échappe alors à son concepteur qui doit prévoir les conditions d'auto-organisation du système dans sa globalité sans en maîtriser l'évolution.

Cette vision décentralisée reprends les idées déjà mises en avant par l'intelligence artificielle distribuée et corrobore aux liens puissants qui associent systèmes complexes, systèmes informatiques décentralisés et systèmes du vivant.



## Chapitre 4

# Conclusions

Le présent document relate de mon activité de chercheur-enseignant en informatique depuis mes premiers travaux de recherche et plus spécifiquement de ma trajectoire dans le vaste domaine de recherche qu'engendre cette discipline. Mes travaux de recherche se sont nourris par la richesse des approches novatrices que propose cette discipline, mais ils ont été guidés par un projet fédérateur, porteur d'encadrement et capable de susciter l'intérêt de jeunes chercheurs. La ligne directrice fondamentale de mon travail se situe dans le domaine de la modélisation que j'ai investi au travers de théories et d'approches variées. Même si mes orientations actuelles sont clairement dirigées vers la complexité des systèmes, je défends la richesse des approches multiples et la convivialité des idées, souscrivant aux remarques d'Edgar Morin [141] : "La complexité n'est pas la recette que j'apporte mais l'appel à la civilisation des idées. La barbarie des idées signifie aussi que les systèmes d'idées sont barbares les uns à l'égard des autres. Les théories ne savent pas convivialiser les unes avec les autres. Nous ne savons pas, sur le plan des idées être vraiment conviviaux."

Corroborant à cet appel à la civilisation des idées, les perspectives de nos travaux s'orientent encore vers la pluridisciplinarité et sont éclairés par la fascination des relations entre l'informatique, sciences des modèles, et le vivant. Le vivant peut être ainsi perçu comme une source d'inspiration pour la conception de modèles décentralisés, et ceci à différents niveaux d'échelles de description du monde vivant, de la dynamique des populations aux descriptions biologiques moléculaires. D'autre part, la nécessaire richesse de description de la modélisation des organisations vivantes hiérarchiques et dynamiques est un défi intellectuel passionnant.

Promouvant la richesse des approches pluridisciplinaires et de la modélisation des systèmes complexes, je participe avec plusieurs collègues au projet de création d'une école doctorale dont l'Université du Havre serait l'établissement pilote tout en associant de nombreux laboratoires du Pôle Universitaire Normand. Dans ce cadre, je co-dirige un projet de master de recherche sur les systèmes complexes qui devrait permettre un développement durable de projets pluridisciplinaires basés sur ces concepts et une formation par la recherche qui s'en nourrira. Nous pensons ainsi pouvoir poursuivre nos actions de recherche et les développer dans un cadre que nous espérons fécond.



## Chapitre 5

# Publications personnelles et encadrées

Dans ce chapitre, on donne la liste des publications personnelles ainsi que celle des travaux que j'ai encadrés.

### Thèse

- [1] C. Bertelle. *Simulation numérique d'une houle de canal appliquée à un modèle simple de transport de sédiments*. Thèse d'université, Université du Havre, 16 Janvier 1991.

### Livres

- [2] M.A. Aziz Alaoui and C. Bertelle. *Méthodes numériques appliquées en Java*. 2002. en préparation (taux de réalisation : 90%).
- [3] C. Bertelle and D. Olivier. *Introduction à CORBA - Mise en œuvre avec ORBacus*. 2003. en préparation (taux de réalisation : 30%).

### Chapitres ou parties de livres

- [4] A. Jarno, C. Bertelle, and M. Belorgey. Dynamic influence of wave on a horizontal cylinder beneath waves. In Schrefler and Zienkiewicz, editors, *Comp. Modelling in Ocean Eng.*, pages 609–615. A.A. Balkema, Rotterdam, 1988.

### Revue internationale

- [5] B. Adouobo and C. Bertelle. Parallel algorithms of vortex and vortex-in-cell methods for three-dimensional fluid flow simulation. *Informatica*, 2002. à paraître (accepté le 24/07/2001).

- [6] C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier, and J.-L. Ponty. Agent behaviour modelization based on automata with multiplicities. *Informatica*, 2003. en préparation.

## Congrès internationaux avec comité de lecture

- [7] B. Adouobo, C. Bertelle, and S. Huberson. Concurrent particle and particle-in-cell methods using PVM in three dimensional space. In *4th ECCOMAS 98 Computational Fluid Dynamics Conference*, volume 2, pages 935–941, Athènes, septembre 1998. John Wiley.
- [8] C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand, and D. Olivier. Dimants : a distributed multi-castes ant system for dna sequencing by hybridization. In *NETTAB 2002, AAMAS 2002 Conf.*, Bologna (Italy), July 2002.
- [9] C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand, and D. Olivier. Distribution of agent based simulation with colored ant algorithm. In *ESS 2002 Conf.*, Dresden (Germany), October 2002.
- [10] C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand, and D. Olivier. Dna sequencing hybridization based on multi-castes ant system. In *BIXMAS 2002, AAMAS 2002 Conf.*, Bologna (Italy), July 2002.
- [11] C. Bertelle, A. Dutot, and D. Olivier. Active objets to develop computer games for blind children. In *Game-On 2002 Int. Conf. on Intelligent games and Simulation*, London (UK), November 2002.
- [12] C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier, and J.-L. Ponty. Automata with multiplicities as behaviour model in multi-agent simulations. In *SCI'2001*, Orlando, Florida, USA, 22-25th July 2001.
- [13] C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier, and J.-L. Ponty. Genetic algorithms on automata with multiplicities for adaptive agent behaviour in emergent organizations. In *SCI'2001*, Orlando, Florida, USA, 22-25th July 2001.
- [14] C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier, and J.-L. Ponty. Adaptive behaviour for pridoner dilemma strategies based on automata with multiplicities. In *ESS 2002 Conf.*, Dresden (Germany), October 2002.
- [15] C. Bertelle, V. Jay, S. Lerebourg, D. Olivier, and P. Tranouez. Dynamic clustering for auto-organized structures in complex fluid flows. In *ESS 2002 Conf.*, Dresden (Germany), October 2002.
- [16] C. Bertelle, D. Olivier, V. Jay, P. Tranouez, and A. Cardon. A multi-agent system integrating vortex methods for fluid flow computation. In *16th IMACS Congress 2000*, volume 122-3, Lausanne (Switzerland), August 21-25 2000. electronic edition.
- [17] C. Bertelle, D. Olivier, P. Tranouez, and V. Jay. Agent-based simulation of water flow for environment modelling in estuaries. In *Workshop 2000 Agent-Based Simulation*, pages 115–122, Passau (Germany), May 2-3 2000.
- [18] C. Olivier and C. Bertelle. Lagrangien model of suspended matter in a fluvial out-flow used with a multi-agent system. In *ESS'2001*, Marseilles, France, Octobre 2001.
- [19] D. Olivier, V. Jay, and C. Bertelle. Distributed multi-agent system used for dynamic aquatic simulation. In D.P.F. Müller, editor, *ESS'2000 Congress*, pages 504–508, Hambourg (Germany), September 28-30 2000.

- [20] P. Tranouez, C. Bertelle, and D. Olivier. Changing the levels of description of a fluid flow in a agent-based simulation. In *ESS'2001*, Marseilles, France, Octobre 2001.

## Congrès nationaux avec comité de lecture

- [21] B. Adouobo, C. Bertelle, and S. Huberson. Parallélisation d'une méthode particules-maillages TSC avec PVM. In *Canum'97, Congrès d'Analyse Numérique*, 1997.
- [22] B. Adouobo, C. Bertelle, and S. Huberson. Simulation numérique d'une méthode particulière 3D sur origin 2000 à l'aide de PVM. In *Canum'98, Congrès d'Analyse Numérique*, 1998.
- [23] B. Adouobo, C. Bertelle, and S. Huberson. Simulation numérique des équations d'euler à l'aide d'une méthode de vortex de type particule maillage sur une machine parallèle. In *Canum'99, Congrès d'Analyse Numérique*, Ax-Bonassre (France), May 17-21 1999.
- [24] C. Bertelle, V. Jay, and D. Olivier. Une approche multi-agent pour la simulation d'environnement estuarien. In *Colloque Seine-Aval*, page 40, Rouen (France), November 17-19 1999.
- [25] C. Bertelle and J.-F. Lhuissier. Simulation numérique d'une houle de canal. In *1ère journées inter-universitaires Génie Civil-Génie Côtier*, Le Havre, Novembre 1990.
- [26] C. Bertelle and J.-F. Lhuissier. Houle de canal numérique et simulation de transport de sédiments. In *10ème Congrès de Mécanique*, Paris, Septembre 1991.
- [27] C. Bertelle and J.-F. Lhuissier. Simulation d'une houle de canal. In *Congrès de la Société Française de Physique*, Caen, Septembre 1991.
- [28] C. Bertelle and J.-F. Lhuissier. Simulation numérique d'un canal à houle. In *3èmes journées de l'hydrodynamique*, Grenoble, 1991.
- [29] C. Bertelle and D. Olivier. Les simulations multi-agents : concept et outil de modélisation non-linéaire pour l'émergence de systèmes organisés. In *3ème colloque Chaos Temporel et Chaos Spatio-temporel*, Le Havre, Septembre 2001.
- [30] D. Olivier and C. Bertelle. Modèles d'identification et d'évolution de structures hydrodynamiques dans des flux complexes par des systèmes multi-agents. In *XXVII Colloque de l'Union des Océanographes de France*, Villeneuve d'Asq, Septembre 2001.

## Rapports internes

- [31] B. Adouobo and C. Bertelle. Parallel algorithm for vortex and vortex-in-cell methods in three-dimensional space. Rapport interne du Laboratoire de Mécanique du Havre, 37 pages, 1999.
- [32] C. Bertelle. Simulation d'environnements estuariens par des SMA. Séminaire du LIH, Université du Havre, Juin 1999.

- [33] C. Bertelle, A. Cardon, and D. Olivier. Modélisation et implémentation des systèmes complexes. Cours du DEA Informatique Théorique et Applications, Ecole Doctorale SPMI Rouen-Le Havre, 184 pages, 2001.
- [34] C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier, and J.-L. Ponty. Modélisation du comportement adaptatif d'un système multi-agent par des automates à multiplécités. Rapport interne du LIH, Université du Havre, 13 pages, 2001.
- [35] C. Bertelle, O. Knio, and S. Huberson. Parallélisation de méthodes tourbillonnaires sur cray T3D. Rapport interne du Laboratoire de Mécanique de l'Université du Havre, 24 pages, Mai 1997.
- [36] C. Bertelle and D. Olivier. Objets distribués. Cours du DESS Systèmes Répartis à Objets, Université du Havre, 108 pages, 2001.
- [37] C. Bertelle, D. Olivier, and V. Jay. Une approche multi-agents pour les simulations d'environnements estuariens. Rapport interne du LIH, Université du Havre, 22 pages, Novembre 1999.
- [38] C. Duvallet, H. Boukachour, and C. Bertelle. Présentation d'une plate-forme de conception de SMA (madkit) appliquée à l'interrogation de SGBD distantes et à la modélisation d'environnements estuariens. Séminaire du LIH, Université du Havre, Janvier 2000.
- [39] F. Hauville, C. Bertelle, S. Huberson, and O. Knio. Application of particle methods on parallel architectures. Rapport interne du Laboratoire de Mécanique de l'Université du Havre, 47 pages, Juin 1997.

## Travaux encadrés

- [40] B. Adouobo. *Simulation numérique des méthodes particulières et particules-maillage sur machines parallèles*. Thèse d'université, Université du Havre, 1998.
- [41] M. Auzou. Négociations évolutives entre agents à base d'automates. Rapport de stage de dea informatique théorique et applications, Universités de Rouen et du Havre, Septembre 2002.
- [42] C. Broult. Réorganisation du traitement informatique des mesures expérimentales au laboratoire de mécanique des fluides de l'université du havre. Rapport de stage de maîtrise d'informatique, Université de Caen, Septembre 1991.
- [43] V. Frebourg. Mise en œuvre de la représentation du comportement d'un agent. Rapport de stage de maîtrise informatique du havre, Université du Havre, Juin 2001.
- [44] G. Houry. Parallélisation d'une méthode adi sur un réseau de stations de travail avec PVM. Rapport de stage de maîtrise d'ingénierie mathématique, Université du Havre, Juin 1995.
- [45] S. Lerebourg. Clustering dynamique appliqué aux écoulements fluides complexes. Rapport de stage du dess ingénierie mathématiques et outils informatiques, Université d'Orléans, Septembre 2002.
- [46] T. Paranthoën. Etude de la concision des langages rationnels et application à l'étude du comportement des agents dans un sma. Rapport de stage de dea informatique théorique et applications, Universités de Rouen et du Havre, Septembre 2001.
- [47] A. Rolland. Etude numérique d'un caisson jarlan. Rapport de stage de dea génie côtier nantes/caen/le havre, Université du Havre, Septembre 1992.

## Chapitre 6

# Bibliographie générale complémentaire

Ce chapitre constitue un ensemble de références bibliographiques qui correspondent à des travaux liés aux thématiques scientifiques abordées. Cette liste complète, sans la reprendre, celle du chapitre précédent qui contient les publications personnelles ou de travaux que j'ai encadrés.

- [48] C. R. Anderson. A method of local corrections for computing the velocity field due to a distribution of vortex blobs. *J. of Comp. Physics*, 62 :111–123, 1986.
- [49] J.-L. Austin. *Quand Dire C'est Faire*. Le Seuil, 1970.
- [50] R. Axelrod. *The evolution of cooperation*. New York Basic Book, 1984.
- [51] P. Bak. *How Nature Works - the Science of self-organized criticality*. Springer Verlag, 1996.
- [52] O. Barreateau and F. Bousquet. Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. In Hermès, editor, *Ingénierie des systèmes multi-agents - JFIAD-SMA'99*.
- [53] N.A. Bass. Emergence, hierarchies and hyperstructures. In C.G. Langton, editor, *Artificial Life III, SFI Studies in the Sciences of Complexity*, volume XVII, pages 775–797. Addison Wesley, 1994.
- [54] F. Blasco. *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*. Elsevier, 1997.
- [55] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. *Swarm intelligence - from natural to artificial systems*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford University Press, 1999.
- [56] E. Bonabeau, F. Henaux, S. Guérin, D. Snyers, P. Kuntz, and G. Theraulaz. Routing in telecommunications networks with "smart" ant-like agents. In *Proceedings of Intelligent Agents for Telecommunications Applications'98*, 1998.
- [57] E. Bonabeau and G. Theraulaz. *Intelligence collective*. Hermès, 1994.
- [58] T.R.J. Bossomaier and D.G. Green, editors. *Complex systems*. Cambridge university press, 2000.

- [59] T. Bouron. *Structures de communication et d'organisation pour la coopération dans un univers multi-agents*. PhD thesis, Pierre et Marie Curie University, 1993.
- [60] François Bousquet. *Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche dans le delta central du Niger*. Thèse d'université, Université de Lyon 1, 1994.
- [61] François Bousquet. *Modélisation d'accompagnement - Simulation multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Lyon 1, 2001.
- [62] J.-P. Briot. Modélisation et classification de langages de programmation concurrente objets : L'expérience Actalk. In *LMO'94*, pages 103–125, Grenoble, 1994.
- [63] J.-P. Briot and R. Guerraoui. Objets pour la programmation parallèle et répartition : Intérêts, évolutions et tendances. *TSI*, 15(6) :765–800, 1996.
- [64] Jean-Pierre Briot and Yves Demazeau, editors. *Principes et architecture des systèmes multi-agents*. Hermès, 2001.
- [65] J.P. Briot. Actalk : A testbed for classifying and designing actor languages in the smalltalk-80 environment. pages 3–15, Nottingham, UK, 1989. ECOOP'89.
- [66] C. Cambier. *Simdelta : un système multi-agents pour simuler la pêche sur le Delta Central du Niger*. PhD thesis, Université de Paris 6, 1994.
- [67] A. Cardon. Modélisation des systèmes adaptatifs par agents : vers une analyse-conception orientée objet. Rapport de recherche 011, LIP6, 1998.
- [68] A. Cardon. *Conscience artificielle et systèmes adaptatifs*. Eyrolles, 2000.
- [69] A. Cardon and F. Lesage. Toward adaptive information systems : considering concern and intentionality. In *KAW'98*, 1998. BANff, Canada.
- [70] A. Cardon and J.-P. Vacher. Genetic algorithm using multi-objective in a multi-agent system. *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier, 1999.
- [71] Alain Cardon. Système de gestion de crises coopératif : un processus d'interprétation de points de vues multiples. *Journal of Decision Systems*, Hermès, 1 :39–67, 1998.
- [72] P. Cariani. Emergence and artificial life. In C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer, and S. Rasmussen, editors, *Artificial Life II, SFI Studies in the Sciences of Complexity*, volume X, pages 515–537. Addison Wesley, 1991.
- [73] G. Di Caro and M. Dorigo. Antnet : A mobile agents approach to adaptive routing. Technical report, IRIDIA, Université libre de Bruxelles, Belgium, 1997.
- [74] R. Cazoulat and B. Victorri. *Etude de la dynamique des populations par simulation*. Chaos and Society, IOS Press, 1994.
- [75] J.-M. Champarnaud, J.-L. Ponty, and D. Ziadi. From regular expressions to finite automata. *International Journal of Computer Mathematics*, 72 :415–431, 1999.
- [76] J.P. Choquin and G.H. Cottet. Sur l'analyse numérique de méthodes de vortex tridimensionnelles. *C.R.A.S.*, 306(2) :739–742, 1988.
- [77] J.P. Choquin and S. Huberson. Particle simulation of viscous flow. *J. of Computer and Fluid*, 2 :397–410, 1988.
- [78] A.J. Chorin. Numerical study of slightly viscous fluid. *J. Fluid Mech.*, 57 :785–796, 1973.



- [79] G. Clergue. *L'apprentissage de la complexité*. Hermès, 1997.
- [80] P. Coquillard and D.R.C. Hill. *Modélisation et simulation des écosystèmes*. Masson, 1997.
- [81] D. Costa and A. Hertz. Ant can colour graphs. *JORS*, (48) :295–305, 1997.
- [82] G.H. Cottet and P.D. Koumoutsakos. *Vortex methods - theory and practice*. Cambridge University Press, 2000.
- [83] K. Culik and J. Kari. Image compression using weighted finite automata. In G. Rozenberg and A. Salomaa, editors, *Handbook of formal languages*, pages 599–616. Springer, 1997.
- [84] B. Cuvelier, Ph. Preux, and C. Cambier. Studying adaptation with echo. In P. Husbands & I. Harvey, editor, *European Conferences on Artificial Life*, 1997.
- [85] J. de Rosnay. *Le macrocosme*. Points - Essais. Editions du Seuil, 1990.
- [86] D.L. DeAngelis and L.J. Gross, editors. *Individual-based models and approaches in ecology*. Chapman & Hall, 1992.
- [87] Y. Demazeau. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In *Proceedings of the European Conference on Cognitive Science*, Saint Malo, 1995.
- [88] Académie des Sciences. *Rapport sur la science et la technologie n°7 : Systèmes moléculaires organisés*. Editions Tec & Doc, 2000.
- [89] M. Dorigo. *Optimization, learning and natural algorithms*. PhD thesis, Department of Electronics Politecnico di Milano, Italy, 1992. In italian.
- [90] M. Dorigo and L.M. Gambardella. Ant colony system : A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1) :53–66, 1997.
- [91] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colomi. The ant system : optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*, 26 :29–41, 1996.
- [92] A. Drogoul. *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes*. PhD thesis, Université de Paris 6, 1993.
- [93] A. Drogoul and C. Dubreuil. Eco-problem-solving : results of the n-puzzle. In Y. Demazeau and E. Werner, editors, *Decentralized Artificial Intelligence III*, pages 283–295. North Holland, 1992.
- [94] Alexis Drogoul. *Systèmes multi-agents situés*. Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, 2000.
- [95] G. Duchamp, M. Flouret, and E. Laugerotte. Operations over automata with multiplicities. In J.-M. Champarnaud, D. Maurel, and D. Ziadi, editors, *WIA'98*, volume 1660 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 183–191. Springer-Verlag, 1999.
- [96] S. Durand, F. Lesage, , and C. Moulin. Utilisation des systèmes multiagents dans la modélisation des systèmes adaptatifs. pages 475–480, Bucarest, Mai 1997. International Symposium of Economics and Informatics.
- [97] C. Duvallet, Z. Mammeri, and B. Sadeg. Les sgd temps réel. *Technique et science informatique*, 18(5) :479–516, 1999.
- [98] J. Ferber. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995.
- [99] A.W. Fitzgibbon, M. Pilu, and R.B. Fisher. Direct least squares fitting of ellipses. Technical report, Edinbourg University, 1996.

- [100] S. Forrest and T. Jones. Modeling complex adaptive systems with echo. *Complex Systems : Mechanisms of Adaptation*, pages 3–21, 1994. R.J. Stonier and X.H. Yu, eds.
- [101] Stephanie Forrest, editor. *Emergent Computation*. MIT Press, 1991.
- [102] A. Fortier. *Mécanique des suspensions*. 1967.
- [103] S. Frontier. *Les écosystèmes*. Que sais-je ? PUF, 1999.
- [104] S. Frontier and D. Pichet-Viale. *Ecosystèmes*. Dunod, 1998.
- [105] W. Gander, G.H. Golub, and R. Strebler. Fitting of circles and ellipses - least squares solution. Technical report, ETH Zurich, 1994.
- [106] J.M. Geib, C. Gransart, and Ph. Merle. *CORBA : des concepts à la pratique*. InterEditions, 1998.
- [107] A. Gibbons and W. Rytter. *Efficient Parallel Algorithms*. Cambridge University Press, 1988.
- [108] D. E. Goldberg. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [109] D.M. Gordon. The expandable network of ant exploration. *Animal Behaviour*, 50 :995–1007, 1995.
- [110] L. Greengard and V. Rokhlin. A fast algorithm for particle simulations. *J. of Comp. Phys.*, 73 :325–348, 1987.
- [111] Z. Guessoum. *Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents*. PhD thesis, Pierre et Marie Curie University, 1996.
- [112] Z. Guessoum. Dima, une plate-forme multi-agents en smalltalk. *Objet*, 3(4) :393–409, 1997.
- [113] Z. Guessoum. A hybrid agent model : reactive and cognitive behavior. In *ISADS'97*, pages 25–32, 1997.
- [114] Z. Guessoum and J.-P. Briot. From concurrent objects to autonomous agents. In *8<sup>th</sup> European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, Ronneby, 1997.
- [115] O. Gutknecht and J. Ferber. Madkit : Organizing heterogeneity with groups in a platform for multiple multi-agents systems. Technical report, LIRMM, Montpellier University, <http://www.madkit.org>, 1997.
- [116] F. H. Harlow. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics. *Methods in Comput. Physics*, 3 :319–343, 1964.
- [117] T. Haynes and S. Sen. Evolving behaviour strategies in predators and prey. In G. Weiss and S. Sen, editors, *Adaptation and Learning in Multi-Agent Systems*, LNAI, pages 113–126, IJCAI'95 Workshop, Montreal, Canada, August 1995. Springer.
- [118] J.-C. Heudin. *La vie artificielle*. Hermès, 1994.
- [119] M. Heusse, D. Snyers, S. Guérin, and P. Kuntz. Adaptive agent-driven routing and load balancing in communication networks. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Ant Colony Optimization, Oct. 15-16, Brussels, Belgium*, 1998.
- [120] J. Holland. Echoing emergences : objectives, rough definition and speculations for echo-class model. In *SantaFe Institute Studies in the Science of Complexity*, XIX, pages 309–333. Addison-Wesley, 1994.
- [121] J. H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems : an introduction analysis with applications to biology, control and artificial intelligence*. University of Michigan Press, 1975.

- [122] John H. Holland. *Hidden Order - How adaptation builds complexity*. Helix Book, 1995.
- [123] S. Huberson. Calcul d'écoulements tridimensionnels instationnaires incompressibles par une méthode particulière. *J. de Mécanique Théorique et Appliquée*, 3(1) :805–819, 1984.
- [124] S. Huberson. Méthodes particulières. In *École de printemps de mécanique des fluides*, Carcans-Maubuisson, 1993.
- [125] M.R. Jean. Emergence et sma. In *JFIADSMA'97*, 1997.
- [126] K. Jensen. *Coloured Petri Net - Basic concepts, analysis method and practical use*. Springer Verlag, 1997.
- [127] O. Knio, H. Aly, and A. Ghoniem. Three dimensional vortex simulation with application to axisymmetric shear layers. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, , 1987.
- [128] J.U. Kreft, G. Booth, and J.W.T. Winpenny. Bacsim, a simulator for individual-based modelling of bacterial colony growth. *Microbiology*, 144 :3275–3287, 1998.
- [129] Samuel Landau and Sébastien Picault. Developing Agents Populations with Ethogenetics (accepted). In *Proc. of the Workshop on Radical Agent Concepts*, 2001.
- [130] C.G. Langton, editor. *Artificial Life*. Addison Wesley, 1987.
- [131] J.-L. LeMoigne. *La modélisation des systèmes complexes*. Bordas, Paris, 1990.
- [132] A. Leonard. Vortex methods for flow simulation. *J. Comp. Phys.*, 37 :289–335, 1980.
- [133] C. Lepage. *Biologie des populations et simulations individus centrés*. PhD thesis, Université Paris 6, 1996.
- [134] P. Marcenac. Modélisation de systèmes complexes par agents. *T.S.I.*, 16(8) :1013–1037, 1997.
- [135] Pierre Marcenac. *Modélisation et simulation par agents - application aux systèmes complexes*. Habilitation à diriger des recherches, Université de la Réunion, 1997.
- [136] S. Mas-Gallic. *Contribution à l'analyse numérique des méthodes particulières*. PhD thesis, Université Paris VI, 1987.
- [137] N. Minar, R. Burkhart, Ch. Langton, and M. Askenazi. The swarm simulation system : A toolkit for building multi-agent simulations. Technical report, SantaFe Institute, 1996.
- [138] M. Minsky. *La société de l'esprit*. 1960.
- [139] M. Mohri. Finite-state transducers in language and speech processing. *Journal of Computational Linguistics*, 23(2) :269–311, 1997.
- [140] E. Morin. *La méthode I : la nature de la nature*. Seuil, 1977.
- [141] E. Morin. *Introduction à la pensée complexe*. ESF éditeur, 1990.
- [142] J.P. Müller. Vers une méthodologie de conception de systèmes multi-agents de résolution de problèmes par émergence. In Editions Hermès, editor, *JFIAD-SMA'98*, pages 355–371, 1998.
- [143] C. Olivier. *Modélisation numérique des phénomènes de transport de matières en estuaire fluvial*. PhD thesis, Le Havre University, April 2001.
- [144] OMG. The common object request broker : Architecture and specification, revision 2.2. Technical report, Object Management Group, <http://www.corba.org>, Février 1998.

- [145] A. Pave. *Modélisation en Biologie et en écologie*. Aléas, 1994.
- [146] J.W. Pepper and B.B. Smits. The evolution of cooperation in an ecological context : an agent-based model. In T.A. Kohler and G.J. Gumerman, editors, *Dynamics of Human and Primate Societies : Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, Santa Fe Institute for Studies in the Sciences of Complexity, New York, 1999. Oxford University Press.
- [147] E. Perrier. Geodes : Géométries des espaces organisés, dynamiques environnementales et simulations. Technical report, IRD, 1999.
- [148] J.L. Peterson. *Petri Net Theory and the Modelling of Systems*. Prentice Hall, 1981.
- [149] D.T.C. Porthouse and R.I. Lewis. Simulation of viscous diffusion for extension of the surface vorticity method for boundary layer and separate flows. *Journal of Mechanical Engineering in Sciences*, 23(3) :157–167, 1981.
- [150] Philippe Preux. *Réflexions sur les systèmes complexes comme outil d'optimisation, leur modélisation et leur simulation*. PhD thesis, Université du Littoral Côte-d'Opale, 1999.
- [151] I. Prigogine. *La fin des certitudes*. Editions Odile Jacob, 1996.
- [152] I. Prigogine and I. Stengers. *La nouvelle alliance*. Folio essais, 1979.
- [153] E. Ramat, Ph. Preux, Y. Lagadeuc, and L. Seuront. Modélisation et simulation multi-agents en biologie marine - étude du comportement du copépode. In *SMAGET 98*, 1998.
- [154] P.A. Raviar. Méthodes particulières. In *École d'été*, 1987.
- [155] P.A. Raviart. An analysis of particule method. volume 1127, Berlin, 1985. Lecture Notes in Math., Springer Verlag.
- [156] C. Rehbach. Calcul numérique d'écoulements tridimensionnels instationnaires avec nappes tourbillonnaires. *La Recherche Aérospatiale*, 5 :289–298, 1977.
- [157] A. Salomaa and M. Soittola. *Automata-Theoretic Aspect of Formal Power Series*. Springer-Verlag, New York, 1978.
- [158] R. Schoonderwoerd, O. E. Holland, and J. L. Bruten. Ant-like agents for load balancing in telecommunications networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Conference on Autonomous Agents, Feb. 5-8, Marina del Rey, CA, US*, pages 209–216, 1997.
- [159] M.P. Schützenberger. On the definition of a family of automata. *Inform. and Control*, 4 :245–270, 1961.
- [160] J. R. Searle. *Speech Acts*. Cambridge University, 1969.
- [161] R. Sedgewick. *Algorithms in C*. Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [162] D. Servat, E. Perrier, J.P. Treuil, and A. Drogoul. Towards virtual experiment laboratories : How multi-agent simulations can cope with multiple scales of analysis and viewpoints. *Lecture Notes in Computer Science*, 1998.
- [163] David Servat. *Modélisation de dynamiques de flux par agents - Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion*. PhD thesis, Université de Paris 6, 2000.
- [164] D. Shiels. *Simulation of Controlled Bluff Body Flow with a Viscous Vortex Method*. PhD thesis, California Institute of Technology Pasadena, California, 1998.
- [165] Y. Shoham. Agent oriented programming. *Journal of Artificial Intelligence*, 60 :51–92, 1993.

- [166] G. Theraulaz and F. Spitz, editors. *Auto-organisation et comportement*. Hermès, 1997.
- [167] R. Thom. *Stabilité structurelle et morphogénèse*. InterEditions, 1977.
- [168] B. Touvenin, G. Billen, S. Even, J.C. Fisher, J.L. Gonzalez, P. Le Hir, V. Loiseau, J.M. Mouchel, C. Olivier, R. Silva Jacinto, and B. Ouddane. Les modèles : outils de connaissance et de gestion. Université de Rouen, Programme Seine-Aval, 1999.
- [169] P. Tranouez, S. Durand, F. Lesage, and A. Cardon. Représentation par des organisations d'agents des connaissances échangées dans un système d'information. In Hermès, editor, *Proceedings of JFIADSMA'99*, 1999.
- [170] F. Varela. *Autonomie et Connaissance, Essai sur Le Vivant*. 1989.
- [171] L. von Bertalanffy. *Théorie générale des systèmes*. Dunod, 1973.
- [172] K. Walkowiak. Graph coloring using ant algorithms. In *Proceedings of the Conference on Computer Recognition Systems KOSYR, Miłkòw, May 28-31*, pages 199–204, 2001.
- [173] B. Walliser. *Systèmes et Modèles*. Seuil, Paris, 1977.
- [174] G. Weisbuch. *Complex systems dynamics*. Santa Fe Institute Studies in the sciences of complexity. Addison-Wesley, 1991.
- [175] G. Weiss, editor. *Multiagent Systems*. MIT Press, 1999.
- [176] W. Woods. Transition network grammars for natural language analysis. *Communication of Association for Computing Machinery*, 13(10) :591–606, 1970.
- [177] M. Wooldridge and N.R. Jennings. Intelligent agents : theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2) :115–152, 1995.

**Ce dossier est complété par un document annexe  
"Extrait de publications récentes (2000-2002)"**

Ce document complémentaire contient les publications suivantes :

**Modélisation d'écoulements de fluide**

- (A1) - B. Adouobo and C. Bertelle. "Parallel algorithms of vortex and vortex-in-cell methods for three-dimensional fluid flow simulation". *Informatica*, 2002. A paraître (accepté le 24/07/2001).
- (A2) - C. Olivier and C. Bertelle. "Lagrangien model of suspended matter in a fluvial out-flow used with a multi-agent system". *ESS'2001*, Marseille, France, Octobre 2001.

**Modèles décentralisés de milieux complexes**

*Aspects méthodologiques*

- (A3) - C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier and J.-L. Ponty. "Automata with multiplicities as behaviour model in multi-agent simulations". *SCI'2001 Conf.*, Orlando, Florida (USA), July 22-25, 2001.
- (A4) - C. Bertelle, M. Flouret, V. Jay, D. Olivier and J.-L. Ponty. "Genetic algorithms on automata with multiplicities for adaptive agent behaviour in emergent organizations". *SCI'2001 Conf.*, Orlando, Florida (USA), July 22-25, 2001.

*Aspects liés à la mise en œuvre*

- (A5) - C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand and D. Olivier. "Distribution of agent-based simulation with colored ant algorithm". *ESS'2002 Congress*, Dresden (Germany), October 2002.

*Aspects conceptuels*

- (A6) - C. Bertelle, D. Olivier, V. Jay, P. Tranouez and A. Cardon. "A multi-agent system integrating vortex methods for fluid flow computation". *16th IMACS Congress 2000*, volume 122-3, Lausanne (Switzerland), August 21-25, 2000.
- (A7) - C. Bertelle, D. Olivier, P. Tranouez and V. Jay. "Agent-based simulation of water flow for environment modelling in estuaries". *Workshop 2000 Agent-Based Simulation*, pp 115-122, Passau (Germany), May 2-3, 2000.
- (A8) - P. Tranouez, C. Bertelle and D. Olivier. "Changing the levels of description of a fluid flow in a agent-based simulation". *ESS'2001 Congress*, pp 504-508, Hambourg (Germany), September 28-30, 2000.
- (A9) - C. Bertelle, V. Jay, S. Lerebourg, D. Olivier and P. Tranouez. "Dynamic clustering for auto-organized structures in complex fluid flows". *ESS'2002 Congress*, Dresden (Germany), October 2002.

*Séquençage de l'ADN et systèmes complexes*

- (A10) - C. Bertelle, A. Dutot, F. Guinand and D. Olivier. "DNA sequencing hybridization based on multi-castes ANT system". *BIXMAS 2002 in AAMAS 2002 Conf.*, Bologna (Italy), July 2002.