



HAL
open science

Intégration de la dimension spatiale au sein d'un modèle multi-agents à base de rôles pour la simulation : Application à la navigation maritime

Sébastien Fournier

► To cite this version:

Sébastien Fournier. Intégration de la dimension spatiale au sein d'un modèle multi-agents à base de rôles pour la simulation : Application à la navigation maritime. Informatique [cs]. Université Rennes 1, 2005. Français. NNT: . tel-00315925

HAL Id: tel-00315925

<https://theses.hal.science/tel-00315925>

Submitted on 1 Sep 2008

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.

N° d'ordre : 3215

THÈSE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

pour obtenir

le grade de : **DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1**

Mention *INFORMATIQUE*

par

Sébastien Fournier

Équipe d'accueil : *Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav, EA 3634)*

École doctorale : *Mathématiques, Télécommunications, Informatique, Signal, Système et Electronique (MATISSE)*

Composante universitaire : *IFSIC*

**Intégration de la dimension spatiale au sein d'un
modèle multi-agents à base de rôles pour la
simulation : Application à la navigation maritime**

soutenue le 18 novembre 2005 devant la commission d'examen :

Composition du Jury

Président : Stéphane Donikian

Rapporteurs : Alexis Drogoul
Alain Bouju

Examineurs : Christophe Claramunt
Bruno Arnaldi
Thomas Devogele

Remerciements

Je remercie très sincèrement Christophe Claramunt, qui m'a permis de découvrir le domaine des SIG et du raisonnement spatial, et Thomas Devogele pour avoir accepté de diriger et de co-encadrer cette thèse et d'avoir assuré ma formation de chercheur, ce qui n'a pas dû toujours être facile.

Je remercie également Alain Bouju et Alexis Drogoul pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse et d'avoir montré un grand intérêt à sa lecture.

Mes remerciements vont aussi à Bruno Arnaldi et Stéphane Donikian pour avoir bien voulu faire parti de mon jury de thèse.

Je remercie la marine et les commandants de l'Ecole navale d'avoir permis à cette thèse d'être financée et de m'avoir fait confiance en tant qu'assistant d'enseignement et de recherche. Mes remerciements vont aussi aux responsables de l'enseignement de navigation, le lieutenant de vaisseau Dupont et le capitaine de corvette Prost pour leurs aides en ce qui concerne tout ce qui touche à la navigation.

Je tiens à remercier les directeurs de l'institut de recherche de l'Ecole navale : Bruno Ramstein, Jean-Yves Billard et Christophe Claramunt et l'ensemble du personnel pour l'accueil qui m'a été fait durant ces quatre années de thèse et qui ont permis qu'elle finisse par s'écrire. Tout particulièrement, un grand merci aux membres du groupe SIG : Rodéric Bera, Yann Chevriaux, Myriem Sriti, Yanwu Yang, Eric Guilbert, David Brosset, Eric Saux, Rémy Thi baud, Thierry Huet, Michel Farine, Xiang Li, Joseph Poupin, Ariane Mascaret, Cyril Ray pour son accueil lors de mon arrivée et pour ses conseils et Valérie Noyon pour m'avoir supporté bien que je n'ai pas voulu revoir la disposition des meubles.

Merci à tous les AER et doctorants (compagnons d'infortune/fortune?) pour tous les bons moments passés ensembles et ils ont été nombreux.

Je remercie également les parents de Florence pour m'avoir soutenu et pour avoir bien voulu relire ma thèse. Ces remerciements s'étendent aussi à Luc Gautier et George Petitbois pour leur relecture intéressée et corrective en moins de deux jours!

J'envoie mes remerciements à mes parents, sans qui tout ceci ne serait pas arrivé, de leur soutien constant, de leur amour et du temps passé à m'apprendre les tables de multiplication. Ces remerciements englobent aussi ma gentille soeur bien aimée qui malgré la préparation de

ses concours et le suivi de ses cours de classe préparatoire a bien voulu jeter quelques regards à mon manuscrit.

Mes remerciements s'envolent aussi vers Richard, compagnon de cours universitaire et bien plus dont l'amitié s'étend au-delà du jour sidéral et qui j'espère aura moins de difficultés à écrire la sienne (de thèse) que je n'ai eu à écrire la mienne.

Enfin, je remercie ma douce Florence qui a été obligée de me supporter durant cette thèse, qui a eu la patience de la lire, de servir de public pour les répétitions et qui malgré cela m'a préparé de bons petits plats, m'a soutenu et m'a donné tout son amour.

Résumé

Si les Systèmes Multi-Agents (SMA) sont devenus des techniques de modélisation largement utilisées dans le domaine de la simulation de systèmes complexes, l'application de ces outils à des contextes géographiques reste cependant encore embryonnaire. L'intégration de la dimension spatiale au sein des SMA apporte en effet de nouvelles difficultés de modélisation que cette thèse aborde dans le cadre de la navigation maritime. Cette recherche propose un modèle multi-agents adapté à la représentation de comportements d'agents dans un environnement géographique. La démarche développée intègre une approche de raisonnement qualitatif et les comportements multiples des agents à travers le concept de rôle. Du point de vue du raisonnement spatial, modéliser les agents dans un environnement géographique impose de représenter les relations qui traduisent les interactions dans cet espace. A partir de cette observation, notre recherche développe un modèle d'interaction des agents basé sur des raisonnements spatiaux qualitatifs où les propriétés de l'environnement et du contexte géographique sont prises en compte. Le deuxième apport de la recherche est orienté vers la définition d'un modèle agent flexible qui permet la représentation de comportements multiples et changeants à travers la notion de rôle. La recherche est validée par la réalisation du prototype TRANS (Tractable Role Agent prototype for concurrent Navigation Systems) dont l'objectif est de modéliser et de simuler les trajectoires simultanées de navires.

Although multiagent systems (MAS) are widely used for the simulation of complex systems, there is still a need for an application of MAS to dynamic applications in the geographical domain. The objective of this PhD thesis is the exploration of the modelling and computing issues related to the integration of the spatial dimension in MAS, taking the maritime environment as an experimental validation domain. We introduce an approach that extends the multiagent model towards a deeper integration of the role paradigm, and qualitative spatial reasoning as a support for the representation of the dynamic properties of ships acting in their maritime environment. Our research shows that qualitative spatial reasoning is adapted to a contextual representation of the spatial situations that are part of maritime navigation decisions. The multiagent model extended by the role paradigm also provides a flexible solution adapted to the multiple ship behaviours. The research is validated by a prototype, so-called TRANS (Tractable Role Agent prototype for concurrent Navigation Systems), that implements the contextual spatial reasoning components and multiagent concepts for the simulation of ship trajectories in a maritime environment.

Table des matières

Introduction	1
Contexte de la recherche	2
Démarche proposée	4
Plan du mémoire	5
1 De l'intégration de la dimension spatiale au sein des modèles agents en simulation	9
1.1 Principes de simulation	9
1.1.1 Niveaux d'abstraction	12
1.1.2 Représentation spatio-temporelle des caractères continus et discrets des phénomènes	12
1.1.3 Discussion	15
1.2 Agents, principes et propriétés	16
1.2.1 Agents : définitions	16
1.2.2 Système multi-agents : définitions	18
1.3 Simulation orientée agent	19
1.4 Convergence des SMA et des SIG	20
1.5 Espaces géographiques comme support des agents	22
1.5.1 CityDev	22
1.5.2 PadiSimul et MAGS	23
1.5.3 Simulation de trafic	25
1.5.4 Synthèse	26
1.6 Espaces géographiques comme acteurs de la simulation	27
1.6.1 RIVAGE	27
1.6.2 CORMAS	28

1.6.3	Synthèse	29
1.7	Discussion	30
2	Agents et perceptions contextuelles de l'espace géographique	33
2.1	Introduction	33
2.2	Principes de modélisation spatiale contextuelle	35
2.2.1	Relations d'orientation	36
2.2.2	Relations de proximité	38
2.2.3	Combinaison des relations de proximité et d'orientation	39
2.2.4	Principes	39
2.3	Modélisation contextuelle de relations spatiales	41
2.3.1	Modélisation	41
2.3.2	Niveaux de perception	42
2.3.3	Influences des usages, des règlements et des actions	43
2.3.4	Influence de la dynamique	46
2.3.5	Influence des barrières	47
2.4	Groupes spatiaux et relations spatiales contextuelles	50
2.4.1	Proximités de groupes spatiaux	52
2.4.2	Groupes spatiaux et orientations	54
2.5	Discussion	57
2.6	Conclusion	59
3	Modèle agent à base de rôles	61
3.1	Agents, groupes et rôles : motivation	61
3.2	Modèles agents à base de rôles (AGR) : état de l'art	62
3.2.1	GAIA	64
3.2.2	MODELE HILAIRE	65
3.2.3	MOISE	66
3.2.4	AALAADIN	68
3.2.5	MASCARET	69
3.2.6	OPERA	70
3.2.7	MOCA	71
3.2.8	Synthèse	73

3.3	Modèle AGR étendu	77
3.3.1	Modèle AGR conceptuel	78
3.3.2	Extension du modèle par l'ajout de propriétés au concept de rôle . . .	83
3.3.3	Gestion des conflits entre rôles	86
3.3.4	Implémentation de notre modèle AGR	88
3.3.5	Gestion des messages	90
3.4	Application au domaine maritime	91
3.4.1	Agents du domaine maritime	92
3.4.2	Groupes et rôles du domaine maritime	95
3.4.3	Conciliabilité entre rôles et agents et incompatibilité entre rôles . . .	98
3.4.4	Priorités des rôles	101
3.5	Conclusion	102
4	Conception d'un outil intégré de simulation de navigations maritimes	105
4.1	Intégration du raisonnement spatial au sein du système multi-agents	106
4.1.1	Approches intégrant le raisonnement spatial au sein des agents	106
4.1.2	Discussion	111
4.1.3	Prise en compte du raisonnement spatial dans TRANS	111
4.1.4	Prise en compte de l'influence des barrières et des groupes spatiaux .	116
4.2	Interface de TRANS	118
4.2.1	Gestion des données géographiques	118
4.2.2	Description de l'interface	119
4.3	Validations	122
4.3.1	Sauvetage	123
4.3.2	Agents "perturbateurs"	124
4.3.3	Scénario tiré d'un rapport d'incident	125
4.3.4	Discussion	128
4.4	Evaluation des performances	128
4.5	Interopérabilité avec les outils existants	130
4.6	Conclusion	132
	Conclusion générale	135
	Contribution	135

Extensions conceptuelles	139
Extensions du modèle de raisonnement spatial	139
Extensions du modèle multi-agents	139
Extensions logicielles	140
Perspectives applicatives	141
Généralisation et bilan	144
A Calcul de la DCPA et du TCPA	147
B Bulletin sécurité nautique	149

Liste des figures

1	Les différents concepts utilisés et développés dans la thèse.	6
1.1	Trajectoire d'un navire en surface.	13
1.2	Trajectoire d'un sous-marin en surface.	13
1.3	Espace et états continus, temps discret.	14
1.4	Espace continu, états et temps discrets.	14
1.5	Temps et états continus, espace discret.	14
1.6	Temps continu, états et espace discrets.	14
1.7	Temps et espace discrets, états continus.	15
1.8	Temps, états et espace discrets.	15
1.9	Parallèle des historiques des SMA et des SIG.	20
1.10	Relations cardinales d'un véhicule en fonction du niveau d'abstraction.	25
1.11	Concepts développés au chapitre 1.	32
2.1	Différentes manières d'exprimer les relations d'orientation.	37
2.2	Partitionnement exprimant les relations de proximité.	38
2.3	Partitionnement combinant relations d'orientation cardinales et de proximité.	39
2.4	Partitionnement combinant relations d'orientation relatives et de proximité.	40
2.5	Régions d'influence d'une entité spatiale.	42
2.6	Simulation de la passerelle (a) d'un navire école de petite taille, (b) d'un porte-avions.	43
2.7	Partitionnement des relations d'orientation (a) génériques, (b) du domaine maritime.	43
2.8	Relations de proximité dans le domaine maritime.	44
2.9	Partitionnement particulier du domaine maritime.	45
2.10	Partitionnement modifié par l'action rattraper.	45

2.11	Influence de la vitesse sur la relation de proximité (a) "proche", (b) "distant".	46
2.12	Proximité et barrières.	48
2.13	Orientation et barrières	49
2.14	Groupe d'entités spatiales et ses régions d'influence.	51
2.15	Lien entre groupe spatial et entités spatiales.	51
2.16	Impact de la présence d'un groupe spatial sur la relation de proximité "distant" du référent.	53
2.17	Impact de la présence d'un groupe spatial sur la relation de proximité "proche" du référent.	53
2.18	Héritage de relations de proximité par la formation d'un groupe spatial.	54
2.19	Représentation des régions d'orientation.	55
2.20	Impact de la présence d'un groupe spatial orienté tribord et arrière.	56
2.21	Déformation de relations d'orientation par contraintes d'agrégation.	57
2.22	Rappel des concepts développés aux chapitre 1 et chapitre 2.	60
3.1	Relations entre les différents modèles de la méthodologie.	65
3.2	Architecture principale de la méthodologie AALAADIN.	68
3.3	Diagramme UML de la méthodologie MASCARET.	69
3.4	Architecture de la méthodologie MOCA.	72
3.5	Exemple de gestion des conflits dans MOCA.	72
3.6	Démarche de conception du modèle multi-agents.	77
3.7	Méta-modèle conceptuel de TRANS.	83
3.8	Diagramme UML de notre modèle enrichi de nos propriétés.	87
3.9	Diagramme d'implémentation UML du modèle.	88
3.10	Exemple d'envoi de message suivant différentes stratégies.	92
3.11	Diagramme UML de notre modèle pour le domaine de la navigation maritime.	93
3.12	Exemple d'utilisation d'OCL pour définir les contraintes d'incompatibilité.	98
3.13	Priorités des rôles.	101
3.14	Rappel des concepts développés aux trois premiers chapitres.	103
4.1	Architecture du prototype TRANS.	106
4.2	Principe de l'approche monolithique.	107
4.3	Principe de l'approche composant.	108
4.4	Principe de l'approche indépendante.	109

4.5	Principe de l'approche combinant les approches composant et indépendante. . .	110
4.6	Partitionnement particulier du domaine maritime.	111
4.7	Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région arrière tribord.	113
4.8	Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région arrière bâbord.	114
4.9	Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région avant bâbord.	115
4.10	Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région avant tribord.	115
4.11	Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région tribord. . . .	116
4.12	Influence d'une barrière sur les relations d'orientation et de proximité.	117
4.13	Influence d'un groupe sur les relations d'orientation et de proximité.	118
4.14	Capture d'écran de la fenêtre d'ajout des agents.	120
4.15	Capture d'écran de la fenêtre d'ajout des agents lors de la sélection des rôles temporaires.	120
4.16	Capture d'écran de la fenêtre principale de TRANS.	121
4.17	Calcul de la trajectoire future d'un agent.	123
4.18	Début du scénario de sauvetage.	124
4.19	Les navires de la zone se portent au secours d'un navire en difficulté.	125
4.20	Suivi d'une route par un navire gêné par des chalutiers.	126
4.21	Reproduction d'un incident réel.	127
4.22	Performance de TRANS en fonction du nombre de navires.	129
4.23	Performance de TRANS en fonction du facteur d'accélération.	130
4.24	Différentes applications interopérables avec TRANS.	131
4.25	Rappel des concepts développés lors des quatre chapitres.	133
A.1	Schéma illustrant le calcul de la DCPA.	147
B.1	Relevés des positions de la frégate.	152
B.2	Situation entre 0459 et 0513	153
B.3	Situation entre 0513 et 0528	154

Liste des tableaux

1.1	Comparaisons de simulations multi-agents où l'espace est un support.	26
1.2	Comparaisons de simulations multi-agents où l'espace est acteur.	30
3.1	Comparatif des systèmes multi-agents AGR.	74
3.2	Définition de rôles selon le modèle agent.	76
3.3	Choix des types pour l'exemple du chalutier et du tanker.	83
3.4	Choix des propriétés pour l'exemple du chalutier et du tanker.	86
3.5	Inconciliabilité entre les rôles et les agents du domaine maritime.	99
3.6	Incompatibilité entre les rôles du domaine maritime.	100
3.7	Synthèse de notre modèle AGR.	102

Introduction

La quête continue d'une meilleure compréhension, analyse et prédiction des dynamiques du monde réel est l'une des plus anciennes préoccupations humaines. Depuis l'antiquité et les premiers pas de l'humanité, l'homme a cherché à appréhender et même à manipuler les phénomènes de son environnement. L'observation et le raisonnement sont deux des composants les plus élémentaires qui permettent de progresser vers une meilleure compréhension d'un phénomène. Les phénomènes naturels étaient dans l'antiquité observés et représentés avec de fortes simplifications, résultats de connaissances incomplètes et imparfaites, au sens de notre vision et des progrès actuels de la phénoménologie. De nos jours, la complexité générée par les démarches analytiques et expérimentales de nos sciences contemporaines, qui tendent à améliorer continuellement la finesse des représentations, rendent leur modélisation de plus en plus exigeante. De nombreux compromis méthodologiques permettent cependant de réaliser des approximations dans la réalisation de modèles. Ces simplifications exigent néanmoins la définition de propriétés qui favorisent un compromis acceptable entre le modèle et la complexité du phénomène à représenter. Ces propriétés doivent notamment favoriser son observation à un degré d'abstraction satisfaisant pour le scientifique.

Le domaine de la simulation apporte une composante temporelle à ces modèles et reflète en quelque sorte leur caractère dynamique. La modélisation et la simulation dynamique d'un système réel permettent de manipuler, d'observer et d'améliorer la compréhension des phénomènes complexes. Ces derniers sont étudiés à différentes échelles comme pour la simulation des changements climatiques, des phénomènes physiques sub-atomiques et des systèmes de trafic urbain. La plupart des phénomènes modélisés atteignent aujourd'hui des complexités et des degrés de finesse élevés qui imposent l'utilisation de modèles et d'outils informatiques de plus en plus performants et flexibles. Les progrès constants des systèmes informatiques apportent des solutions techniques qui favorisent une meilleure convergence entre les modèles et les outils. Ces dernières années s'accompagnent en effet de l'apparition de nombreux modèles et outils informatiques qui tendent à renouveler les approches pour la simulation des phénomènes du monde réel. L'une de ces nouvelles approches consiste à modéliser un phénomène réel en prenant en compte ses composants élémentaires. Les caractéristiques globales du phénomène observé émergent alors des interactions de ces composants conduisant ainsi à une amélioration de sa finesse de représentation et de son degré de réalisme. L'un des intérêts de ces approches porte sur la relative facilité de modélisation des compo-

sants élémentaires et de leurs interactions, comparée à une modélisation plus déterministe du phénomène réel dans son ensemble. C'est dans ce cadre que se place l'apparition des simulations multi-agents [Drogoul *et al.*, 1995].

Les modèles multi-agents modélisent des phénomènes dont le comportement global émerge en partie des interactions locales des entités les plus fines du système étudié. Ces entités à caractère autonome peuvent percevoir, agir et interagir dans leur environnement. Ces systèmes sont rapidement devenus des outils utilisés dans de nombreux domaines tels que la sociologie [Sawyer, 2002], la biologie [Querrec *et al.*, 2003] et la géographie [Bura *et al.*, 1996]. En géographie, les simulations multi-agents portent notamment sur les simulations d'écosystèmes, les simulations urbaines et les simulations en transport [Claramunt et Lardon, 2000]. Les phénomènes simulés caractérisent des systèmes urbains ou environnementaux, dont l'une des particularités est l'intégration des dynamiques spatiales. Un grand nombre de ces simulations géographiques négligent cependant la modélisation de la dimension spatiale au profit des autres entités du phénomène à cause de la difficulté d'identifier et de modéliser des entités géographiques comme des agents. L'espace géographique est en effet essentiellement vu comme un composant souvent passif de la simulation où les entités vont agir et interagir. Peu de réflexions approfondies sur l'intégration de la dimension spatiale sont généralement développées lors de la conception de ces simulations. Les entités évoluant dans un espace géographique forment pourtant une composante indissociable de celui-ci. La perception de cet espace et de sa dynamique, ainsi que les capacités de raisonnement associées, sont autant d'éléments qui relient les entités de la simulation à l'espace géographique modélisé. Tenir compte de ce lien lors de la conception des simulations géographiques participe donc à l'intégration de la dimension spatiale au sein du système multi-agents.

Contexte de la recherche

Le contexte de cette thèse est celui de la prise en compte de la dimension spatiale dans les systèmes multi-agents pour simuler des phénomènes géographiques. Appréhender la dimension spatiale dans le but de construire une simulation géographique est une démarche complexe qui demande au concepteur de faire plusieurs choix dont les plus essentiels sont du point de vue de la modélisation :

- Une représentation spatiale de référence ;
- Une échelle temporelle de modélisation et une prise en compte de la composante dynamique de l'évolution de l'environnement ;
- Un mode de raisonnement spatial et son intégration dans un système multi-agents.

L'objectif de cette thèse est de concevoir et de justifier étape par étape les éléments méthodologiques qui amènent à intégrer cette dimension spatiale au sein d'un système multi-agents orienté vers la simulation de phénomènes à caractère géographique. Nous aborderons cette problématique dans le cadre du domaine de la navigation maritime qui constitue un cadre privilégié à l'étude d'interactions d'agents dans un espace géographique.

Parmi les questions à aborder lors de cette recherche, le choix d'un type de **représentation spatiale** est donc un premier composant essentiel de notre étude. Lors de la conception d'une simulation géographique, la représentation spatiale sélectionnée doit être en accord avec les objectifs de la simulation. La définition de la représentation spatiale est en effet intimement liée au modèle décrivant les entités spatiales. Le choix de la représentation spatiale a en effet un impact sur les propriétés du modèle utilisé, en terme de pouvoir d'expression, dans la mesure où différentes formes de structuration de l'espace sont possibles, discrètes ou continues essentiellement. La modélisation des entités spatiales par des automates cellulaires est, de par sa nature, la plus facilement adaptée à une représentation spatiale définie par une grille régulière. Les systèmes multi-agents sont eux plus appropriés à une représentation dont les entités spatiales sont représentées à partir de primitives spatiales plus discrètes comme les points, les lignes, les polygones ou toutes combinaisons de ces trois primitives de référence. Au sein d'une même simulation, plusieurs de ces représentations, déterminées en fonction des phénomènes géographiques étudiés, sont d'ailleurs susceptibles d'être associées afin d'obtenir un modèle plus complet. Dans ce cas, une solution possible est l'utilisation d'un modèle hybride composé d'un automate cellulaire et d'un système multi-agents [Vanbergue et Drogoul, 2002].

L'espace géographique est le support des actions des agents, mais il n'est pas seulement un élément statique de la simulation. Cet espace doit aussi être un acteur au même titre que les autres éléments de la simulation. La prise en compte de l'aspect dynamique de l'espace géographique dépend de l'échelle temporelle choisie afin de représenter le phénomène étudié, les éléments qui le composent et l'objectif poursuivi. Prenons notre contexte de la simulation de navigations maritimes où les mouvements des marées possèdent une échelle temporelle compatible avec celle des déplacements des navires. Les changements décrits par la composante dynamique sont perçus par les agents qui déterminent leurs actions, leurs interactions et leurs comportements selon leur appréhension de cette dynamique. Un aspect fondamental à considérer est *in fine* celui de **l'échelle temporelle** de la simulation et, en fonction de l'échelle choisie, de déterminer s'il est nécessaire que l'espace soit un **acteur** de la simulation et comment y parvenir, le cas échéant.

A partir du choix d'une représentation spatiale et d'une échelle temporelle, les mécanismes de perception et d'interaction des agents sont à identifier et à concevoir. Le lien entre le processus de perception et celui des actions se réalise via une phase de raisonnement. Le raisonnement spatial est un processus qui va permettre de déterminer, en analysant les perceptions spatiales de l'agent, les actions appropriées que ce dernier peut effectuer. Les types d'information sur lesquels est basé un raisonnement spatial sont :

- Les informations quantitatives dérivées de propriétés d'un espace Euclidien comme la distance à laquelle se trouve une entité par rapport à un point de référence et, l'orientation de cette entité par rapport à une direction de référence ;
- Les informations plus qualitatives dérivées de ces mêmes notions telles que la proximité (proche, lointain) et la direction (droite, gauche, nord, sud).

Tout agent de la simulation peut posséder un raisonnement spatial personnalisé. Notre recherche évaluera également dans quelle mesure une modélisation multi-agents permet d'intégrer des mécanismes de raisonnement dans l'espace. Afin de réaliser la liaison entre le raisonnement spatial et les agents, il sera nécessaire de déterminer les mécanismes à mettre en œuvre. Permettre aux agents d'interagir dans leur espace impose de déterminer le type de **raisonnement spatial** approprié à l'application et de définir son **intégration** au sein d'un système multi-agents.

Le processus itératif qui conduit à l'élaboration des réponses à ces questions fondamentales forme le cœur de la démarche méthodologique de notre recherche d'intégration de la dimension spatiale au sein d'un système multi-agents. Cette démarche est appliquée à travers le cas de la simulation de navigations maritimes pour notamment prédire les déplacements futurs des navires et déterminer les règles et les fondements adaptés à la dynamique du système représenté, modélisé et simulé.

Cadre de la démarche proposée

Notre recherche propose une démarche de modélisation et de construction d'une simulation géographique orientée agent pour le domaine de la navigation maritime. Plusieurs étapes à cette conception sont nécessaires, du choix d'une représentation spatiale, aux mécanismes de raisonnement, jusqu'à l'application, support de simulation de navigations maritimes qui constitue le contexte de validation de notre démarche.

La représentation spatiale, support qu'il nous appartient d'identifier et de modéliser doit satisfaire aux besoins de modélisation nécessaires pour atteindre nos objectifs de simulation. L'objectif premier de la simulation de navigations maritimes est de pouvoir analyser finement et de façon aussi exhaustive que possible le comportement et les trajectoires des navires. Il nous faudra en particulier identifier l'étendue et les propriétés des entités spatiales qui participent à la dynamique d'un tel système, qui influencent les déplacements des navires et méritent de devenir des composants actifs ou passifs du système. En respectant ces critères de continuité et de finesse des trajectoires, il nous appartient de définir la représentation spatiale la plus apte à satisfaire les exigences de cette simulation. La modélisation de l'influence de la dynamique est liée au choix de l'échelle temporelle qui, pour la simulation de navigations maritimes, relève d'une dynamique proche du temps réel. L'intégration de cette dynamique est essentielle à la modélisation de navigations maritimes, et doit être intégrée dans le système multi-agents. Notons que la modélisation physique de phénomènes qui participent et influencent la dynamique du milieu déborde largement des objectifs de notre thèse (i.e. vents, courants, marées). Nous nous contenterons d'intégrer ces composants comme des paramètres d'entrée de notre modèle, l'interopérabilité avec ces modèles physiques pouvant constituer une extension future de nos travaux.

Les propriétés élémentaires du raisonnement spatial utilisées en simulation de navigations maritimes sont identifiables à partir des relations d'orientation et de proximité que

ce type de raisonnement soit qualitatif ou quantitatif. Ces relations, s'y elles sont prises en compte, doivent donner aux agents la capacité de raisonner à partir des positions relatives des autres entités spatiales. Le but de ce raisonnement est de fournir principalement un cadre décisionnel aux agents simulant le comportement des navires, notamment dans leur choix des manœuvres lors d'évitements de collision. En terme d'interface et de lisibilité, le processus décisionnel conduisant au choix de la manœuvre adaptée doit être aisément compréhensible par l'officier de quart qui doit pouvoir identifier immédiatement les options que le simulateur a sélectionnées pour déterminer la manœuvre d'anti-collision. Le raisonnement spatial, qu'il soit qualitatif ou quantitatif, doit répondre à ces besoins. La thèse abordera et analysera cette problématique du choix du raisonnement spatial et montrera l'intérêt de l'influence du contexte sur ce dernier, c'est à dire l'impact de l'environnement spatial sur des modes de raisonnement génériques. Du point de vue du raisonnement spatial, les modèles actuels ne prennent pas en effet en compte les particularités du milieu dans lequel se situent les entités. Cet aspect de notre recherche devrait constituer un apport aux techniques actuelles de raisonnement spatial, en identifiant différentes formes d'influence du contexte spatial sur les relations identifiées, que ces dernières soient statiques ou dynamiques.

Dans le domaine maritime, les entités spatiales sont hétérogènes et possèdent des comportements complexes et naturellement changeants. Ces propriétés, et leur caractère évolutif, doivent nécessairement apparaître au niveau de la simulation. Il faut donc doter le modèle agent de capacités permettant la modélisation de ces comportements. Il est aussi important de définir comment modéliser explicitement l'environnement au sein d'un système multi-agents afin de prendre en compte les propriétés de l'espace géographique. Cette interrogation rejoint celle de la prise en compte de la dynamique de l'espace géographique qui présente un intérêt pour la modélisation.

Notre étude se complétera d'un prototype qui donnera les moyens d'expérimentation et de validation de notre modèle, dans le cadre de la simulation de navigations maritimes, et des concepts développés au sein d'un système multi-agents. Ce prototype devra donner aux agents un comportement dynamique et la capacité de raisonner dans l'espace. Un tel prototype intégrera des données géographiques officielles représentant les côtes françaises et fournies par le Service Hydrographique et Océanique de la Marine (SHOM). L'avantage de cet outil sera aussi de constituer une interface d'interaction avec les experts du domaine, ce qui nous permettra de mieux appréhender leur vision de la conduite d'un navire et du réalisme de nos développements.

Plan du mémoire

Cette thèse comporte quatre chapitres et une conclusion qui développeront les aspects précédemment énoncés. La figure 1 énumère les différents concepts que nous allons aborder et utiliser au cours de cette thèse afin de créer une simulation géographique dont le cadre est la simulation de navigations maritimes.

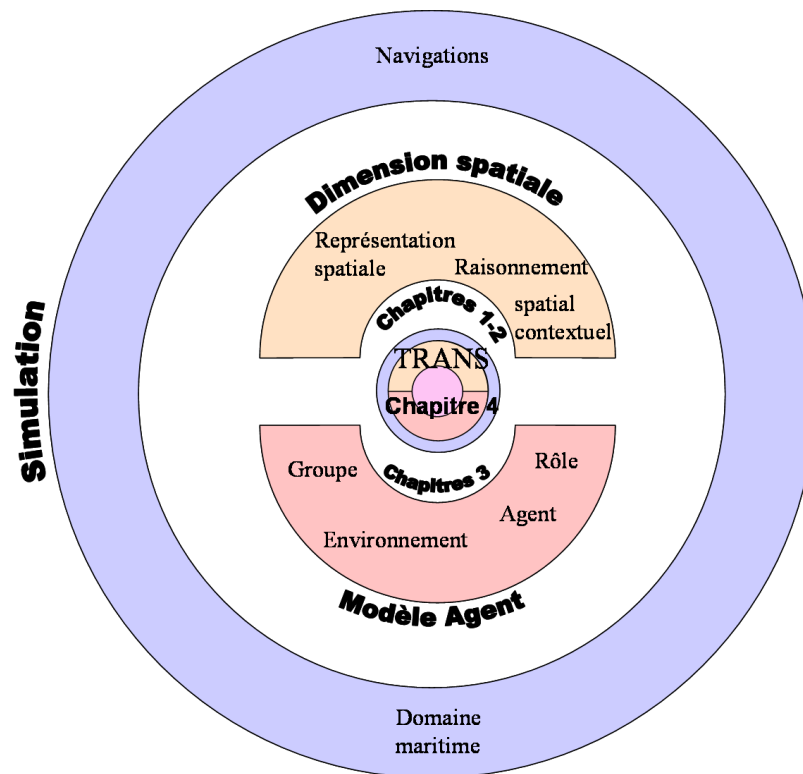


Figure 1 — Les différents concepts utilisés et développés dans la thèse.

Le premier chapitre posera les principes de notre simulation au sein d'un système multi-agents, en abordant plus particulièrement les caractéristiques spatio-temporelles et les différents niveaux d'abstraction de ces agents. Nous introduirons les définitions d'agent spatial et de système multi-agents spatial. Un état de l'art abordera les choix offerts en terme de représentation spatiale, et du rôle occupé par l'espace géographique, que ce dernier soit acteur ou support.

Le second chapitre montrera l'intérêt d'utiliser un raisonnement spatial qualitatif contextuel pour permettre à des agents d'interagir dans un espace géographique. Il formalisera les contraintes contextuelles à l'origine des modifications des raisonnements spatiaux génériques représentant les relations de proximité et d'orientation. Nous montrerons que ces contraintes appliquées au domaine maritime permettent aux agents d'avoir un raisonnement qui détermine au mieux les actions à effectuer en tenant compte des particularités du domaine.

Le troisième chapitre formalisera un modèle multi-agents qui utilise les concepts d'agents, de groupes, de rôles et introduira le concept d'environnement spatial comme un des éléments clef de la modélisation. Des mécanismes de gestion d'acquisition des rôles et de gestion des conflits entre ces derniers seront intégrés au modèle. Le concepteur aura donc ainsi la possibilité de modéliser des entités spatiales hétérogènes, ce qui reflète l'aspect naturel des phénomènes réels. Les entités spatiales modélisées possèdent la capacité de modifier leurs comportements durant la simulation. Ce modèle générique est appliqué à la simulation de navigations maritimes.

Le quatrième chapitre présentera l'approche permettant le couplage entre le raisonnement spatial et le système multi-agents. Il présentera aussi les fonctionnalités et les capacités du prototype TRANS (Tractable Role Agent prototype for concurrent Navigation Systems) utilisées pour cette simulation. Plusieurs scénarios fourniront des exemples illustrant les concepts introduits aux chapitres précédents. Un de ces scénarios est tiré d'un incident réel fourni par le bulletin de sécurité nautique.

Une conclusion dressera le bilan des apports présentés dans cette thèse et évaluera de façon critique les avantages et les limites des résultats de notre recherche. Nous analyserons les extensions possibles de notre modèle, et les enrichissements envisagés du prototype expérimental TRANS. Ce chapitre exposera également les possibilités de généralisation des concepts et des outils développés à d'autres domaines d'application.

De l'intégration de la dimension spatiale au sein des modèles agents en simulation

L'espace est une référence primordiale à prendre en compte lorsqu'un modèle représente et simule un phénomène géographique du monde réel. Ce constat est particulièrement valable pour les modèles multi-agents, alternatives de plus en plus utilisées pour représenter et simuler des dynamiques spatiales. Les systèmes multi-agents permettent la modélisation de systèmes complexes non déterministes à partir d'agents autonomes dans leur environnement et dont les comportements globaux émergent du niveau local. Au sein des systèmes multi-agents, de nombreuses représentations de phénomènes dans l'espace sont possibles et se caractérisent par plusieurs propriétés. Parmi celles-ci dont les plus caractéristiques, du point de vue de la modélisation spatiale de la dynamique des systèmes géographiques, sont les degrés d'abstraction et les modes discrets et continus de structuration des dimensions spatiales et temporelles.

Ce chapitre introduit dans une première section les principes et les caractéristiques des simulations appliqués aux phénomènes géographiques. La deuxième section expose les fondements des modèles multi-agents utilisés comme outils de simulation. Les deux sections suivantes explorent, en s'appuyant sur un état de l'art, la place de l'espace dans les modèles multi-agents selon si ce dernier est support ou acteur de la simulation.

1.1 Principes de simulation

Le terme simulation vient du latin *simulatio* qui signifie : apparence et imitation [Auzanneau et Avril, 2000]. Si nous nous en tenons, dans notre cadre, au terme d'imitation, la simulation est donc l'imitation d'un phénomène du monde réel. Mais quel besoin l'homme a-t-il d'imiter les phénomènes du monde réel ?

La réponse à cette question n'est pas unique, mais, comprendre le passé, les situations présentes ou prédire et mieux planifier les états futurs d'un système sont les objectifs partagés par de nombreux outils d'analyse et de simulation. Les exemples suivants donnent un aperçu de la variété des applications de la simulation dans le domaine des phénomènes à caractère géographique :

- Représenter la trajectoire d'un véhicule en milieu urbain, ou d'un navire en milieu maritime afin de prédire leurs comportements futurs et éviter les situations à risque ;
- Comprendre et analyser un système de trafic afin de mieux en appréhender la dynamique et les propriétés pour une meilleure planification des transports urbains ;
- Prévoir l'évolution future d'un espace urbain dans le but de garantir un développement durable et harmonieux.

Afin de satisfaire ces objectifs, trois classes de simulation sont à considérer : les simulations qualifiées de réelles, de virtuelles et celles composées des deux précédentes. Pour chacune de ces formes de simulation, le phénomène simulé est transformé en un modèle¹ qui le représente.

- Une simulation est qualifiée de réelle lorsque tous les éléments composant le modèle le sont [MEDES, 2002]. Elle est réalisée dans un cadre strictement contrôlé afin que le moins d'éléments extérieurs au modèle, si possible aucun, n'interviennent dans la simulation. Ce type de simulation est typiquement représenté par les simulations d'évacuation d'un immeuble lors d'un incendie. Les aspects temporels et spatiaux ne peuvent pas être modifiés et le niveau d'abstraction est unique et de même ordre que celui de la réalité.
- Une simulation est considérée comme virtuelle, si aucun des éléments constituant le modèle n'est réel [Benenson, 1999, O'Sullivan et Torrens, 2000]. Chaque élément du phénomène est exprimé dans un langage informatique particulier comme les automates cellulaires (AC) [von Neumann, 1951, von Neumann, 1966], DEVS (Discret Event System Specification) [Zeigler, 1976, Zeigler et Sarjoughian, 2000] et les systèmes multi-agents [Ferber, 1995], ou mathématique à partir, par exemple, d'équations différentielles [Pavé, 1994] permettant de le décrire. Les caractéristiques temporelles et spatiales sont paramétrables dans le but de mieux reproduire et analyser le phénomène. Le niveau d'abstraction est choisi selon les particularités que le concepteur souhaite appréhender. Afin de mieux saisir le phénomène représenté, il est possible dans ces cas d'accélérer ou de ralentir le temps, de réduire ou d'agrandir l'espace dans lequel le phénomène se situe. Cette catégorie comprend les simulations mathématiques comme les équations différentielles et les simulations informatiques telles que les simulations orientées agent (ou simulation multi-agents) et les automates cellulaires qui peuvent être regroupés sous la catégorie des simulations numériques.

¹Un modèle est une image simplifiée de la réalité forgée à partir d'une certaine sélection des données d'observations et d'un certain nombre d'hypothèses [Coquillard et Hill, 1997].

- La composition des deux types précédemment énoncés donne une troisième forme de simulation [Çakmak et Kühnapfel, 2000]. Une partie des éléments appartenant au modèle sont virtuels et d'autres sont réels. Ce sont, notamment, les simulations de trafic urbain où les données en temps réel se complètent d'estimations possibles de situations futures [Etches *et al.*, 1999]. Un autre exemple est celui de la simulation de vols où l'avion est virtuel et le pilote, réel.

Dans le cadre des simulations à caractère virtuel, le milieu du siècle dernier a vu émerger le domaine de la simulation numérique [Metropolis *et al.*, 1953]. Son essor est dû en premier lieu au besoin d'affiner les simulations dans le but de ne pas obtenir uniquement des tendances globales, mais aussi d'identifier les actions et les interactions, qui modélisés à un niveau local, font ensuite émerger des comportements globaux difficilement caractérisables par des approches globales. En deuxième lieu, cet essor a été rendu possible en raison de l'évolution rapide des outils informatiques qui ont permis de simuler des phénomènes réels de plus en plus complexes.

En fonction des objectifs poursuivis par la simulation, la reproduction du phénomène étudié s'accompagne de plusieurs caractéristiques qui vont influencer la manière dont la simulation est réalisée. Nous nous attardons ici sur les caractéristiques qui concernent les composantes intrinsèques à la nature des dimensions spatiales et temporelles :

- Niveaux d'abstraction. Un même phénomène est généralement étudiable à plusieurs niveaux d'abstraction (macro, méso et micro). Si le phénomène étudié est la ville, les différents niveaux peuvent être l'individu, la famille et la ville dans sa globalité. Cette distinction fait apparaître la notion d'agrégats. Si la simulation se situe au niveau de la ville ou des familles, il s'agit de simulations dans lesquelles les données sont agrégées, par contre si elle se situe au niveau de l'individu, la simulation est composée de données désagrégées.
- Temporelles. Le temps dans une simulation est exprimé de manière discrète ou continue. Ce choix dépend de l'objectif de la simulation et de la nature du phénomène représenté. Si le concepteur cherche à modéliser finement la trajectoire d'un véhicule, son choix se portera sur une expression continue du temps. Si celui-ci souhaite modéliser un phénomène de trafic urbain pour des objectifs de planification en transport, le choix d'une période temporelle discrète horaire sera privilégié ;
- Spatiales. Comme pour le temps, l'espace est généralement continu ou discret. Cette distinction dépend de l'objectif que le concepteur souhaite atteindre. Pour la simulation d'une entité mobile, et afin d'obtenir une trajectoire précise, l'espace sera exprimé de façon continue pour garder une trace complète de cette trajectoire. Dans le cas où la simulation porte sur la trajectoire de vie d'une personne au sein d'une communauté urbaine, l'utilisation d'un espace discret sera suffisant pour analyser les tendances socio-économiques au niveau des quartiers.

1.1.1 Niveaux d'abstraction

Selon l'objectif de la simulation (ex : étude de tendances globales ou étude des interactions locales entre entités du phénomène) et le degré de finesse du phénomène que le concepteur souhaite modéliser, plusieurs niveaux d'abstraction sont possibles : macro, méso et micro.

- Les macro-simulations sont des simulations où le phénomène est étudié dans sa globalité sans tenir compte des actions et des interactions locales [Lighthill et Whitham, 1955, Lebacque, 1997]. Ces simulations donnent les tendances globales du phénomène étudié. Elles sont aussi nécessaires lorsque le phénomène réel est encore trop complexe pour être décomposé en éléments plus fins ;
- Les méso-simulations n'étudient pas un phénomène à un niveau global ou local mais utilisent des agrégats d'éléments locaux et se focalisent sur les interactions entre ces agrégats [Semboloni *et al.*, 2004]. Ces simulations constituent un niveau intermédiaire où les composants locaux et globaux se combinent dans l'analyse du phénomène étudié. Elles sont utilisées dans le cas de phénomènes difficilement qualifiables et quantifiables aux niveaux locaux, ou lorsque le concepteur cherche à obtenir des tendances qui ne nécessitent pas une décomposition fine, mais où il est nécessaire d'étudier les interactions entre les éléments du phénomène ;
- Les micro-simulations sont apparues progressivement dans de nombreux domaines d'études où les scientifiques souhaitent progresser dans la finesse, le réalisme et la compréhension des phénomènes étudiés [Nagel *et al.*, 1998]. Ces simulations considèrent les phénomènes à leur niveau le plus local. Dans le cas de la modélisation de phénomènes urbains de transport et d'activités, les primitives élémentaires sont les individus et les flux aux niveaux d'abstraction les plus fins [Ray, 2003].

Remarquons que dans le cas des méso-simulations et des micro-simulations, les phénomènes globaux sont la répercussion des niveaux les plus locaux et résultent des interactions entre les entités. Il est possible de combiner au sein d'une même simulation ces différents niveaux d'abstraction.

1.1.2 Représentation spatio-temporelle des caractères continus et discrets des phénomènes

L'assertion *natura non facit saltus* énoncée par le philosophe allemand Leibniz dans [Leibniz, 1765] qui veut que la nature ne fasse pas de "saut" a été admise jusque dans les années 1900 lorsque De Vries introduisit, d'après des travaux de Mendel, la notion de mutation [De Vries, 1903]. Des chercheurs ont montré récemment qu'en plus de faire des sauts, la nature fait parfois des retours en arrière [Lolle *et al.*, 2005]. La plante nommé *Arabidopsis Thaliana* possède une mutation appelé "hothead", qui personnalise un "saut" par mutation. Une *Arabidopsis* issue de deux parents mutés peut posséder les gènes identiques à ceux de ses grands parents mais pas de ses parents et ce, sans nouvelle mutation, ce qui jusqu'à

dernièrement n'était pas considéré comme possible. Les états d'un phénomène du monde réel auront un caractère discret ou continu. Un phénomène à états continus évolue en passant par des états intermédiaires, alors qu'un phénomène à états discrets évolue de façon discontinue sans passer par tous les états intermédiaires. Un phénomène continu est représenté typiquement par l'exemple du changement de température. L'évolution naturelle de la température fournit une bonne image d'un phénomène continu. A contrario, les mutations génétiques représentent bien les phénomènes discrets. Un enfant qui subit une mutation, ne possède pas uniquement une combinaison des gènes de ses parents, il y a donc discontinuité entre les parents et l'enfant.

La représentation spatiale employée, tout comme la représentation du temps au sein du modèle, nécessitent d'être définis. La représentation spatiale contraint la structuration des états spatiaux du modèle. Il est donc primordial, lors de la modélisation d'un phénomène géographique, de choisir l'échelle de la représentation spatiale et son type (discret ou continu). Le temps de la simulation peut aussi être défini selon une représentation discrète ou continue.

Afin d'illustrer ces propos, nous détaillons deux exemples :

- La trajectoire d'un navire dans un espace à deux dimensions ;
- La trajectoire de surface d'un sous-marin alternant déplacements en surface et en plongé dans un espace à deux dimensions (i.e. vue en surface).

Le navire et le sous-marin sont deux entités représentées comme des entités ponctuelles avec une position géo-référencée à deux dimensions avec des coordonnées x et y . Dans les figures qui suivent diverses représentations de ces trajectoires sont présentées. Les figures situées sur la gauche du document font références à la trajectoire d'un navire et celles de droite font références à la trajectoire d'un sous marin en deux dimensions vue de la surface.

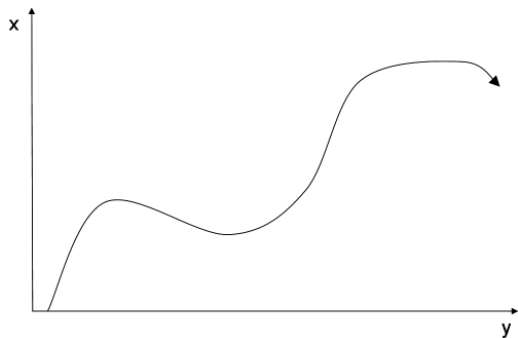


Figure 1.1 — Trajectoire d'un navire en surface.

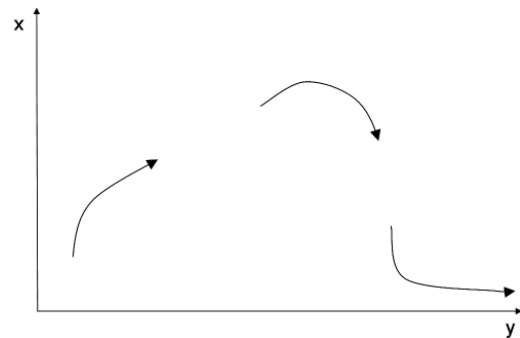


Figure 1.2 — Trajectoire d'un sous-marin en surface.

- La figure 1.1 montre la représentation d'une trajectoire d'un navire où les états sont continus tout comme le temps et l'espace. A chaque temps t correspond une unique valeur de x et de y .
- La figure 1.2 illustre la représentation d'une trajectoire d'un sous-marin en 2D vue de la surface. Les états sont alors discrets, l'espace et le temps sont continus. Le phénomène étant discret, la trajectoire est discontinue.

Dans ces deux cas, (figures 1.1 et 1.2) la représentation est la traduction du phénomène réel observé dans un espace à deux dimensions.

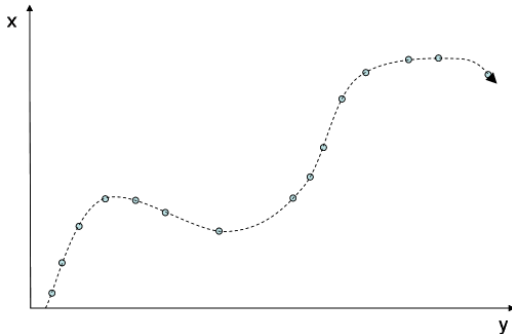


Figure 1.3 — Espace et états continus, temps discret.

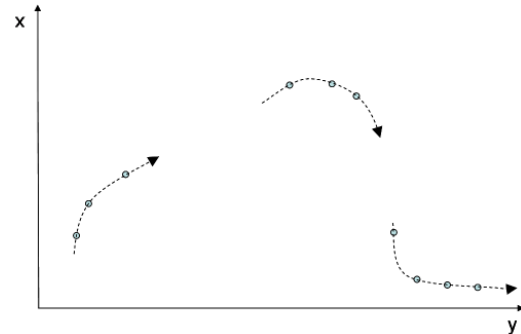


Figure 1.4 — Espace continu, états et temps discrets.

- La figure 1.3 montre une trajectoire à états continus avec une structuration continue de l'espace et où le temps est discret. Cette trajectoire est obtenue à partir de celle de la figure 1.1 en discrétisant le temps ;
- La figure 1.4 représente une trajectoire, issue de la figure 1.4, à états discrets, une structuration discrète du temps et un espace continu.

Dans les deux représentations des figures 1.3 et 1.4, les valeurs de x et y entre deux instants t successifs sont inconnues. Il en résulte une approximation de la trajectoire d'origine.

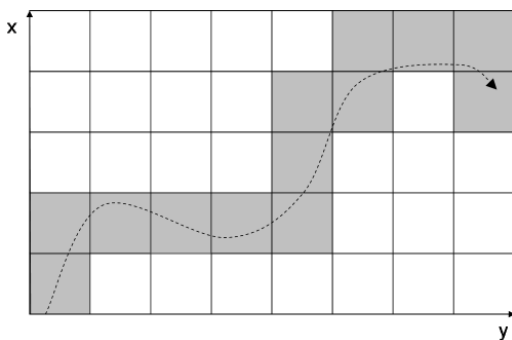


Figure 1.5 — Temps et états continus, espace discret.

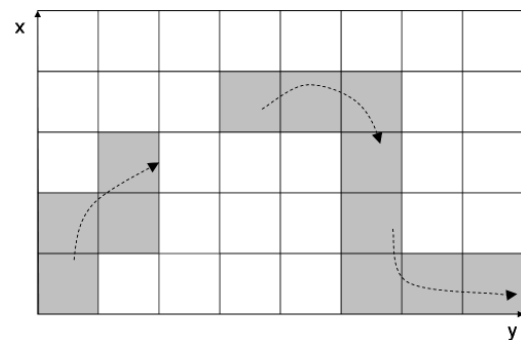


Figure 1.6 — Temps continu, états et espace discrets.

- La figure 1.5 montre l'utilisation d'une représentation de la trajectoire d'un navire où les états du phénomène et le temps sont continus et où l'espace est discret ;
- La figure 1.6 expose une trajectoire de sous-marin dont les états du phénomène et l'espace sont discrets et le temps est continu. Des discontinuités spatiales sont même susceptibles de disparaître si un intervalle spatial entre deux discontinuités de l'état spatial est inférieur à la taille d'une cellule.

Dans les figures 1.5 et 1.6, que les états soient continus ou discrets, la trajectoire du fait de la discontinuité de l'espace est discontinue. Toutefois, le temps étant continu, l'aspect générale de la trajectoire est conservé.

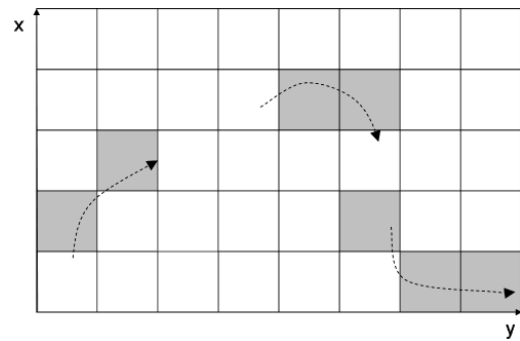
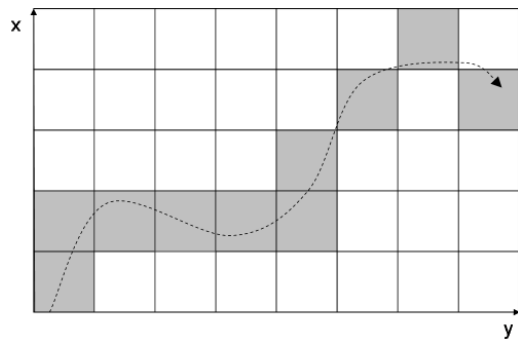


Figure 1.7 — Temps et espace discrets, états continus.

Figure 1.8 — Temps, états et espace discrets.

- La figure 1.7 représente la trajectoire d'un navire où les états sont continus et le temps comme l'espace sont discrets ;
- La figure 1.8 expose un phénomène, la trajectoire d'un sous-marin, dont l'état, l'espace et le temps sont discrets.

Dans les cas des figures 1.7 et 1.8, il y a une discontinuité temporelle et spatiale. Cette discontinuité double engendre une approximation importante de la trajectoire des mobiles. Il est difficilement possible, sauf si les intervalles de temps et d'espace entre deux états sont très réduits, d'avoir une idée même générale de la trajectoire. Cela donne un modèle simple à réaliser et à mettre en œuvre où pour chaque pas de temps, la position passe d'une cellule à une autre.

Plus les caractéristiques spatiales et temporelles du phénomène sont discrétisées avec un écart important entre deux valeurs, plus la finesse de la représentation du phénomène est réduite, *a fortiori* si le phénomène est déjà discontinu.

1.1.3 Discussion

Chaque simulation, dans le cas des phénomènes géographiques, peut être classifiée en fonction de son niveau d'abstraction (micro, méso, macro ou une combinaison), de sa représentation spatiale (discrète ou continue), du caractère discret ou continu des états représentés et de sa granularité temporelle (discrète ou continue). C'est au concepteur en fonction de sa connaissance du phénomène réel à représenter et de ses objectifs que les choix des caractéristiques du modèle support de la simulation incombent.

Considérons l'exemple de simulation de trajectoires de navires et de sous-marins qui sont représentés comme des entités mobiles autonomes possédant des caractéristiques propres. Afin de représenter au mieux les trajectoires et les interactions possibles entre ces dernières pour pouvoir analyser les traces spatio-temporelles de ces trajectoires de façon complète, il est nécessaire de développer une structuration du temps et de l'espace continue et une modélisation au niveau des entités autonomes, donc micro, qui forment les trajectoires. L'un des buts de simuler une telle entité est d'analyser ses actions et interactions avec d'autres

entités présentes dans l'environnement ainsi que l'impact sur sa trajectoire. Chaque entité est unique et possède sa propre trajectoire, sa propre destination.

Modéliser finement des entités mobiles, comme les navires, nécessite logiquement de prendre en compte au sein du modèle la notion d'autonomie inhérente à une telle entité, et la gestion des actions et des interactions dont ces entités sont capables. Ce besoin d'autonomie, couplé à celui de la nécessité de prendre en compte les dynamiques des actions et des interactions dans les modèles et les systèmes informatiques, a entraîné le besoin de changement de paradigme dans les outils de modélisation et de simulation à disposition. Les modèles et les approches conventionnelles relèvent bien souvent d'approches déterministes et agrégées. Cependant, la prise en compte par une approche alternative de comportements locaux comme celui des trajectoires et de l'observation des états du système à partir d'influence au niveau global des dynamiques locales, a favorisé l'apparition de nouvelles formes de modélisation. En particulier, les concepts d'agents incarnent relativement bien ces nouvelles notions d'autonomie et d'interactions dans leur environnement.

1.2 Agents, principes et propriétés

Le concept d'agent est essentiellement issu de deux courants en intelligence artificielle : l'intelligence artificielle distribuée [Hewitt, 1977, Lenat et Brown, 1984, Gasser *et al.*, 1987] et la vie artificielle [Langton *et al.*, 1990, Meyer *et al.*, 1993]. Les domaines d'application des systèmes multi-agents sont vastes et constitués principalement des domaines de la résolution de problèmes, de la robotique distribuée, de la simulation et de la construction de mondes hypothétiques.

1.2.1 Agents : définitions

De part la grande diversité des applications possibles réalisées à l'aide de la modélisation agent, il existe un nombre important de définitions qui dépendent le plus souvent du domaine applicatif. Dans la suite de ce document, il est fait état de différentes définitions présentes dans la littérature dont nous tenterons de dégager les éléments principaux.

[Ferber, 1995] donne une définition qui énonce un certain nombre de propriétés qualifiant un agent. « *Un agent* :

- *Est capable d'agir dans un environnement ;*
- *Peut communiquer directement avec d'autres agents ;*
- *Est mu par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'il cherche à optimiser) ;*
- *Possède des ressources propres ;*
- *Est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ;*

- *Ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;*
- *Possède des compétences et offre des services ;*
- *Peut éventuellement se reproduire ;*
- *Dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont il dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'il reçoit. »*

[Attoui, 1997] donne une définition plus générale de ce qu'est un agent. Un agent est « *une entité conceptuelle liée à la manière d'analyser, de structurer et de mettre en œuvre les traitements d'un problème complexe* ».

[Gutknecht *et al.*, 2000] donnent une définition différente, en insistant plus sur l'aspect communication : un agent est défini comme « *une entité active et communicante qui joue des rôles dans des groupes* ».

[Franklin et Graesser, 1996] proposent la définition suivante : un agent « *est une entité faisant partie d'un environnement, pouvant agir sur lui et capter, à l'aide de senseurs, des données sur celui-ci. L'agent suit son propre agenda et ses actions sur l'environnement influent également sur ses propres perceptions* ».

Bien qu'inspirées de divers travaux, ces définitions s'appuient en grande partie sur un socle commun. Dans ces définitions apparaissent notamment les notions d'objectif ou de but, de perception, d'action et la présence d'un environnement. Il est à noter que ces différentes notions donnent une grande souplesse d'utilisation des systèmes multi-agents ce qui en fait leur principale force. En contrepartie, cette souplesse est aussi l'une des raisons qui explique qu'il n'existe pas d'outils formels unanimement reconnus. De tels outils seraient complémentaires de la définition du modèle. Ils permettent, de décrire précisément un modèle et ainsi de l'analyser pour juger de sa validité et éventuellement de le comparer avec d'autres. Dans la définition d'un agent, la notion d'environnement englobe tous les espaces possibles dans lequel les agents peuvent interagir. Par exemple, l'espace géographique est un environnement au même titre qu'un réseau sans référentiel géographique. De ces diverses définitions, il est possible de fournir une définition résultante :

Un agent perçoit son environnement et agit sur lui. Il possède la capacité de communiquer avec d'autres agents et d'effectuer des actions pour satisfaire ses buts.

Si l'environnement possède un référentiel géographique, des spécificités apparaissent comme la localisation de l'agent dans son environnement et un référentiel géographique. Il est donc nécessaire de raffiner la définition générique pour prendre en compte ces spécificités.

Un agent spatial est situé dans un référentiel géographique, il possède des coordonnées absolues ou relatives et il est capable de raisonner dans l'espace. Il est capable d'inférer des actions et des interactions selon le positionnement d'autres agents ou entités par rapport lui.

Un agent peut être utilisé seul, cependant l'utilisation de plusieurs agents donne la possibilité de modéliser les interactions entre eux. Il est alors d'usage de parler de systèmes multi-agents.

1.2.2 Système multi-agents : définitions

Comme pour les agents, il existe plusieurs définitions d'un système multi-agents qui sont malgré tout, assez proches les unes des autres. [Ferber, 1995] définit « *un système multi-agents comme étant composé des éléments suivants :*

- *Un environnement E , c'est à dire un espace disposant généralement d'une métrique ;*
- *Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est à dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est à dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par des agents ;*
- *Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système ;*
- *Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux ;*
- *Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler les objets de O ;*
- *Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera lois de l'univers. »*

Selon [Attoui, 1997], « *un système multi-agents se compose d'un ensemble d'entités spécialisées coopérantes pour le compte d'une application globale (fonction globale ou but commun)* ». D'après [Chaib-draa et al., 2001], « *un système multi-agents est un système distribué composé d'un ensemble d'agents interagissant* ».

Ces définitions posent un socle commun : un système multi-agents est considéré comme un ensemble d'agents. Cependant, les autres propriétés dépendent du domaine où le système multi-agents est utilisé. Si le concepteur se place dans le domaine de la simulation multi-agents, la présence d'un environnement est presque certaine alors que d'en d'autres domaines l'environnement est inutile ou alors implicite. La gestion d'interface homme/machine à l'aide d'un système multi-agents, par exemple, possède un environnement implicite qui est l'interface dans son ensemble. Il est alors possible de déduire de ces définitions la définition suivante :

Un système multi-agents est un ensemble d'agents qui interagissent au sein d'un environnement qu'il soit implicite ou non.

Dans le cas où l'environnement du système multi-agents est un espace géographique, les agents qui appartiennent à ce système sont des agents spatiaux, ce qui entraîne quelques spécificités, notamment la présence d'un référentiel géographique, qu'il faut répercuter au niveau de la définition :

Un système multi-agents spatial possède un référentiel géographique relatif ou absolu, un ensemble d'agents spatiaux et éventuellement des agents non spatiaux. La représentation de l'espace lié à ce référentiel est elle même définie ou non par un ou plusieurs agents spatiaux.

1.3 Simulation orientée agent

Les simulations multi-agents (ou simulation orientée agent) utilisent les agents pour représenter les entités ou les agrégats du phénomène étudié. Elles permettent notamment de se focaliser sur l'émergence de caractéristiques globales à partir d'actions et d'interactions locales entre les agents. Les simulations multi-agents sont largement utilisées dans de nombreux domaines comme notamment :

- Les simulations d'écosystèmes et de gestion de ressources naturelles dont la problématique est de tenter d'étudier et de résoudre les problèmes liés à l'accès et à l'utilisation des ressources naturelles et renouvelables [Bousquet et Le Page, 2004];
- Les simulations urbaines dont le but est l'étude et la compréhension de l'évolution des cités et de l'impact de leur aménagement sur l'environnement et les flux de populations [Vanbergue et Drogoul, 2002, Semboloni *et al.*, 2004];
- Les simulations en transport dont l'objectif est d'aider à la compréhension des flux urbains dans une agglomération [Nagel *et al.*, 1998, Claramunt et Jiang, 2002];
- Les simulations de mouvement de foules qui permettent l'étude de la dynamique des comportements lors de la concentration d'un nombre important de personnes dans un espace restreint [Thomas, 1999, Thomas et Donikian, 2000, Moulin *et al.*, 2004];
- Les simulations de phénomènes naturels dont le but est d'étudier de tels phénomènes comme l'infiltration, l'érosion ou de formation de la houle [Servat, 2001, Parenthoën *et al.*, 2004].

Ces simulations possèdent un point commun : elles utilisent des agents situés, c'est à dire des agents qui possèdent des coordonnées absolues ou relatives dans l'environnement où ils se trouvent. Remarquons que, dans la plupart des modèles agents actuellement utilisés, l'espace est structuré comme un référentiel à deux dimensions. Il est plus aisé d'observer la simulation lorsque celle-ci est en deux dimensions et le passage à la troisième dimension est souvent difficile à mettre en œuvre.

L'espace est représenté à partir soit d'une structuration irrégulière (ex : mode TIN – Triangle Irregular Network – ou polygones de Thiessen-Voronoi) ou régulière de l'espace (mode raster) soit à partir d'entités localisées et définies communément par une structuration vectorielle de l'espace basée sur des primitives géométriques de type point, polyligne, polygone et des composées de ces dernières.

1.4 Convergence des SMA et des SIG

Non seulement les simulations présentées à la section précédente ont besoin d'un espace mais celui-ci doit être créé à partir de données géographiques réelles ou simulées. Ces données proviennent généralement de Systèmes d'Information Géographiques (SIG) qui sont spécialisés dans le stockage, la gestion, le traitement et l'analyse de telles données. Ces outils sont devenus au fil du temps de véritables systèmes d'aide à la décision et commencent à intégrer en plus de la dimension spatiale, la dimension temporelle.

La figure 1.9 montre que les outils issus de la géographie et de l'intelligence artificielle tendent, dans le domaine de la simulation, à se rapprocher. Les informaticiens ajoutent la composante spatiale à leurs simulations tandis que les géographes et les environnementalistes ajoutent la dynamique à leur description et à leur analyse de l'espace. Ces outils se sont développés en parallèle jusque dans les années 1990/2000 où les SIG tentent d'intégrer une composante de simulation [Batty *et al.*, 1999, Batty et Jiang, 1999, Benenson, 1999, O'Sullivan et Torrens, 2000, Schelhorn *et al.*, 1999]. Les chercheurs en informatique, quant à eux, cherchent à intégrer l'espace comme support dans les simulations multi-agents [Servat, 2001]. Cependant, aucune des deux communautés n'appréhende complètement ces deux aspects. Il existe alors un véritable besoin d'intégrer les deux outils, pour avoir accès à toutes les fonctionnalités des SIG en ce qui concerne les outils d'analyse spatiale et un accès à de larges volumes de données géographiques. Et pour que les SIG puisse intégrer les capacités de simulation fournies par les SMA. Tout d'abord, ce couplage peut s'effectuer dans des applications spécialisées que nous appelons SMA spatiaux et utilisant des agents spatiaux dans le but de tendre vers une généralisation de ces modèles pour construire de nouveaux outils sous une nouvelle terminologie que nous appelons : Systèmes Multi-Agents d'Informations Géographiques (SMAIG).

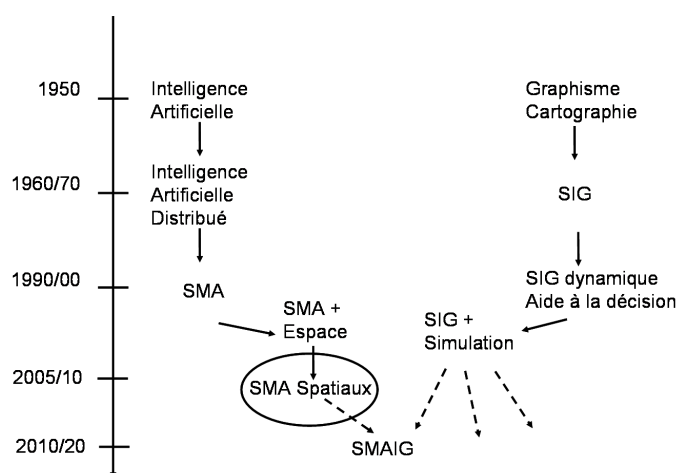


Figure 1.9 — Parallèle des historiques des SMA et des SIG.

Afin d'intégrer la représentation de l'espace dans les systèmes multi-agents, le concepteur dispose de deux méthodes. Soit l'espace est l'un des supports de la simulation, soit il est

considéré comme l'un des acteurs de la simulation [Bousquet et Gautier, 1998]. Lorsque l'espace est statique, les agents le perçoivent grâce à leurs capteurs et peuvent ainsi y évoluer. L'espace peut être modifié au cours de la simulation mais les modifications résultent uniquement des actions des agents. Par contre, lorsque l'espace est aussi un ou plusieurs agents, il évolue de lui-même. Cette évolution exprime les changements propres à l'espace perçus par les autres agents de la simulation. Ces changements sont naturels comme l'avancée de la forêt sur des zones cultivées ou artificielles comme l'évolution d'une zone résidentielle en zone commerciale. Ceci permet de garder toute l'expression des caractéristiques spatiales, comme la topologie², les relations d'orientation et de proximité, les formes et les tailles, de cette évolution.

Nous pouvons donc distinguer les modèles multi-agents appliqués au domaine géographique selon le caractère actif ou passif réservé à l'espace. Cette dichotomie est reprise pour présenter plusieurs exemples de simulation multi-agents dans les sections qui suivent. Ces simulations sont décrites, commentées et comparées en utilisant les critères suivants qui permettent de caractériser les différentes options de modélisation et les interactions dans cet espace :

- Niveau d'abstraction de la simulation. La simulation a un niveau micro, méso, macro ou une combinaison des trois ;
- Type de modélisation de l'espace. Ce critère détermine quelle modélisation de l'espace est utilisée dans la simulation : discrète ou continu, 2D ou 3D ;
- Mode de perception accordé aux agents. Les agents perçoivent l'espace de différentes façons : connaissance complète de l'espace ou voisinage immédiat ;
- Type de raisonnement spatial utilisé en terme de proximité, de direction et de relations topologiques ;
- Capacité de changer de comportement. Dans une simulation, les entités simulées sont confrontées aux événements (ex : risque de collision, attraction par un point d'intérêt) qu'ils perçoivent. Ce critère indique dans quelle mesure l'entité simulée change son comportement et le fonctionnement associé (ex : profile, rôle).
- Communication inter-agents. Les agents interagissent en communiquant les uns avec les autres. Plusieurs protocoles de communications plus ou moins évolués sont disponibles (ex : messages).
- Thématique de la simulation.

Cette classification permet de comparer et d'analyser la capacité des systèmes multi-agents dans le cadre de simulations utilisant un espace géographique, en terme de modélisation de l'espace et de son utilisation par les agents ainsi que la possibilité d'évolution des agents au cours du temps et de leur capacité d'interaction avec les autres agents.

² « La topologie décrit les propriétés des entités spatiales telles que les régions ou les points d'un espace et leurs relations [Renz, 2002] ».

1.5 Espaces géographiques comme support des agents

L'espace géographique est un sous-ensemble de l'environnement utilisé dans la définition d'un système multi-agents. C'est un lieu où les agents peuvent agir et interagir. Il est une représentation de l'espace réel qui possède un repère relatif ou absolu. Les agents peuvent alors le percevoir et dans certain cas, raisonner à partir de leur perception afin de déduire les futures actions à entreprendre. Dans la plupart des cas, l'espace n'est qu'un support pour les agents et n'est généralement pas modifié au cours de la simulation. Il permet aux agents d'interagir de manière indirecte via cet espace sur les autres agents en modifiant, par exemple, leur perception (ex : ligne de vue) ou leur mobilité. Les sous-sections qui suivent présentent des exemples de simulation multi-agents, qui nous ont semblés représentatifs, où l'espace dans lequel évoluent les agents, n'est qu'un support à leurs interactions. Ces exemples sont les suivants :

- CityDev, une simulation de développement économique et spatial de ville [Semboloni *et al.*, 2004] ;
- PadiSimul et MAGS une simulation de mouvements de foules en milieu urbain [Moulin *et al.*, 2003, Moulin *et al.*, 2004] ;
- Une simulation de trafic qui simule le déplacement de véhicules dans un environnement routier [Claramunt et Jiang, 2002].

Les critères définis dans la section 1.3 sont utilisés afin de synthétiser l'analyse de ces simulations.

1.5.1 CityDev

[Semboloni *et al.*, 2004] introduisent CityDev, une simulation de développement de la cité. Les auteurs considèrent la ville comme une grille régulière composée de 100x100 cellules représentant chacune cent mètres carrés. Chaque cellule peut contenir un bâti d'un maximum de dix étages. Le réseau routier est fixe et basé sur celui de la ville de Prato en Italie. Dans cette ville virtuelle évoluent six types d'agents qui modélisent et schématisent des composants acteurs de la dynamique de la cité :

- Les familles sont les consommateurs finaux et produisent de la main d'œuvre. Elles sont formées d'un agrégat de cent personnes dont quarante sont considérées comme des travailleurs ;
- Les entreprises industrielles produisent des biens d'exportation sortant de la ville ;
- Les entreprises commerciales vendent des biens de consommations aux familles ;
- Les entreprises de services vendent des services aux entreprises commerciales et industrielles ;
- Les services publics fournissent des services comme les écoles ou les hôpitaux aux familles ;

- Les développeurs construisent les bâtis dans lesquels les autres agents vont vivre ou travailler.

Tous les agents, exceptés les familles, produisent un bien à partir d'un ou plusieurs biens. Chaque type d'agent, sauf les développeurs, est lié à un bâti. La ville va croître ou décroître en population et surfaces utilisées en fonction de l'offre et de la demande de biens. Les bâtis sont construits par les développeurs si la zone constructible est en bordure d'une zone déjà construite ou en bordure de la route et à moins de trois cent mètres d'un bâti. Les biens produits par les agents sont mis en vente dans des marchés où les agents peuvent venir les acheter en comparant les prix. A chaque type de biens correspond un unique marché.

Cette simulation traite essentiellement de l'aspect économique de la ville et montre l'utilisation des systèmes multi-agents dans ce domaine. Elle simule chacun des acteurs présents dans les interactions économiques en son sein. Cette simulation parvient à reconstruire de façon similaire en terme de répartition spatiale du bâti, au bout de 150 itérations, l'implantation des bâtis de la ville de Prato exception faite des entreprises industrielles qui se trouvent moins concentrées qu'en réalité. La simulation gère des agrégats d'individus en les regroupant par famille, ce qui place cette simulation dans la catégorie des méso-simulations. L'utilisation d'une simulation à un niveau méso s'explique par la complexité du phénomène à étudier (l'étude des interactions économiques à l'échelle de la cité) et par l'objectif de la simulation qui est de montrer l'influence du développement économique sur le développement urbain. Il n'est donc pas nécessaire de modéliser finement les individus. La gestion en marché de l'accès des produits que peuvent acquérir les agents permet à ceux-ci de comparer facilement les prix et ainsi de minimiser les coûts.

Chaque famille est identique et possède donc les mêmes besoins et le même comportement, ce qui ne permet pas de modéliser des phénomènes créés, par exemple, par les aspects ethniques ou culturels. Il n'existe pas de différenciation entre les entreprises, excepté les classes définies lors de la modélisation, ni de concurrence. Les agents ne possèdent aucune forme de raisonnement spatial. Ils n'ont alors pas la possibilité de déterminer l'emplacement, dans la cité, le plus adéquat pour minimiser les coûts et ainsi récolter plus de profit, ce qui est le but des agents dans cette simulation. Le prix du loyer ne fluctue pas, non plus, en fonction du voisinage. En effet, une habitation, trop proche de zones industrielles, est moins bien cotée que des habitations s'en trouvant plus éloignées.

1.5.2 PadiSimul et MAGS

Padi-simul a été réalisé par [Moulin *et al.*, 2004] dans le cadre du projet PADI. Deux composantes forment le projet PADI. La première composante concerne un outil d'aide à la conception d'espace géographique, essentiellement en terme d'occupation de l'espace et de navigation à travers cet espace. La deuxième composante, appelée Padi-Simul, aide le concepteur d'un espace géographique à évaluer la qualité de la planification de celui-ci. Le cas d'étude est basé sur la conception de parcs naturels où des visiteurs peuvent se mouvoir et

utiliser les zones aménagées telles que des aires de pique-nique ou des zones de campement. Chaque visiteur est représenté par un agent et possède un profil ainsi que des attributs représentant son état, dont le dépassement de certains seuils déclenche des actions. Les profils correspondent à des particularités de l'agent qui ne changent pas durant la simulation. Afin de s'orienter, les agents possèdent trois cartes qui associées représentent l'environnement dans sa globalité. Une carte est une structure contenant des informations situées. Une des cartes associe à chaque cellule de la grille définissant l'espace, un degré d'accessibilité. Les deux autres cartes contiennent respectivement les coordonnées des points d'intérêts (ex : zone de pique-nique) et les coordonnées de tous les agents présents dans l'espace, cette dernière évoluant lorsqu'un agent change de position.

La plate-forme MAGS (Multi-agent Geo-Simulation) est basée sur Padi-simul et utilise des principes plus élaborés que ce dernier au niveau de la perception, de la navigation et de la gestion du comportement [Moulin *et al.*, 2003]. Alors que Padi-Simul modélise les déplacements de piéton dans un parc, MAGS simule le déplacement de piétons dans une ville. L'espace dans les deux simulations est basé sur une grille régulière. Comme pour Padi-Simul, les agents se réfèrent à plusieurs cartes pour se repérer et percevoir les autres agents. L'élévation de chaque cellule de l'espace est indiquée non seulement en tenant compte du terrain mais aussi des bâtiments. Une structure de données formée d'une matrice représentant chaque cellule de l'espace contient la position de chaque agent. Une structure statique, construite avant d'exécuter la simulation, permet d'obtenir pour chaque cellule de l'espace les objets visibles depuis celle-ci. Une autre carte appelée "Ariadne Map" contient les chemins permettant de circuler dans la ville bien qu'il soit possible pour les agents de circuler en dehors de ces chemins, ils privilégient l'utilisation de ces chemins. Enfin, une carte regroupant des zones spécifiques comme les parcs est aussi accessible aux agents. Les agents perçoivent une faible partie de l'espace à travers un cône de vision. L'agent construit une carte dynamique de sa perception en utilisant le cône comme un filtre sur les cartes présentées. Il ne raisonne ainsi que sur la perception obtenue contrairement à Padi-Simul où il avait connaissance de l'espace dans sa globalité. Le comportement de chaque agent est défini par un profil contenant une hiérarchie, sous forme d'arbre, d'objectifs à satisfaire. Pour interagir directement entre eux, les agents s'envoient des messages qu'ils vont lire et en fonction de leurs états internes et de ce qu'ils perçoivent, ils vont agir ou pas relativement à ce message. Dans MAGS un agent "clown", lorsqu'il souhaite faire une représentation, va appeler les passants aux alentours en leur envoyant un message. Ceux-ci, s'ils sont intéressés, vont se regrouper autour de cet agent pour regarder sa représentation.

Chaque individu se déplaçant dans l'environnement (parc ou ville) est modélisé par un agent, il s'agit donc d'une micro simulation. L'apport de l'application MAGS se situe au niveau de la gestion de la perception et de la navigation. L'agent se réfère à plusieurs cartes lui donnant ainsi un nombre important d'informations, ce qui lui permet de naviguer aisément dans la ville. La perception des agents n'est pas adaptative, c'est à dire qu'elle n'est pas modifiée par le contexte dans lequel l'agent est plongé. Par exemple, lorsqu'un piéton tra-

verse une rue, il est généralement plus attentif à ce qui se trouve dans la rue, ce type de comportement n'est pas pris en compte dans cette application. Le raisonnement spatial est uniquement basé sur des relations de proximité (cercle centré sur l'agent) et n'inclut pas les relations d'orientation ce qui réduit l'agent à raisonner uniquement en fonction de la proximité des autres agents ou objets.

1.5.3 Simulation de trafic

[Claramunt et Jiang, 2002] introduisent un modèle agent de simulation de trafic dans un environnement multivoies. L'environnement est défini par une grille régulière. Chaque véhicule est modélisé par un agent et possède une capacité de raisonnement spatial grâce à un modèle qualitatif basé sur les relations cardinales inspiré des travaux de [Freksa, 1992]. Un agent possède plusieurs attributs définissant son état. Chaque agent a un positionnement exprimé par le numéro de ligne et de colonne de la case de la grille qu'il occupe, une vitesse en unité de grille par unité de temps et un positionnement définissant comment est appliqué le raisonnement spatial (figure 1.10). Le comportement des véhicules est défini par une règle simple : « *Si un véhicule est devant alors il faut le dépasser ou ralentir, dans le cas contraire, il faut accélérer* ». La détection de la présence d'un véhicule à l'avant et la possibilité de réaliser un déplacement sont effectuées via le raisonnement spatial.

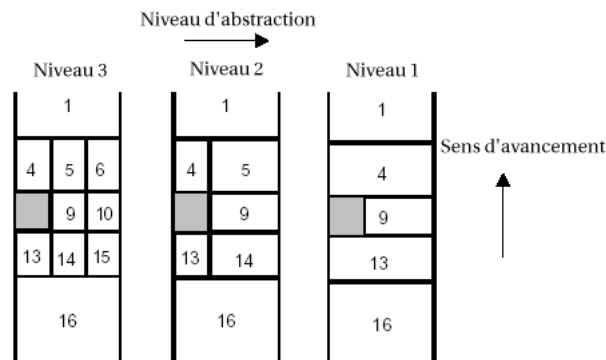


Figure 1.10 — Relations cardinales d'un véhicule en fonction du niveau d'abstraction.

L'intérêt de cette application de simulation de trafic se situe dans l'utilisation du raisonnement spatial pour la simulation d'agents situés dans un environnement. L'utilisation du raisonnement spatial et de règles élémentaires de comportement fait émerger des phénomènes proches de ceux observés comme par exemple l'alternance dans l'espace et le temps d'embouteillages et de trafic fluide. Il s'agit d'une approche de micro-simulation de trafic où chaque agent représente un seul véhicule. Ce système reproduit relativement bien les phénomènes observés de trafic dans des espaces bornés.

Même si ce n'était pas l'objectif de cette simulation, l'utilisation de cette représentation de l'espace par une grille régulière empêche de représenter toute la complexité d'un réseau urbain tels que les échangeurs et les zones d'arrêt. Chaque véhicule est identique, ce qui ne permet

pas d'étudier l'impact de comportements anormaux sur la création de ralentissement et d'embouteillage, l'impact de la présence de véhicules lents ou des situations extrêmes comme les accidents. De même, les agents ne changent pas de comportement pour, par exemple, quitter la voie s'ils détectent un embouteillage. L'homogénéité des agents et leurs impossibilités de modification de leur comportement ne permet pas d'exprimer toute la complexité d'un trafic urbain qui est nécessaire afin de l'étudier au mieux.

1.5.4 Synthèse

Le tableau 1.1 introduit une comparaison multicritères des exemples présentés dans les sous-sections précédentes. Ce tableau montre que malgré leurs thématiques différentes, les simulations utilisent toutes une grille régulière pour représenter l'espace, ce qui s'explique par la simplicité de ce type de représentation et de sa mise en œuvre accompagnée d'une correspondance directe avec le type raster. Le niveau d'abstraction des simulations est centré sur le niveau micro et méso, ce qui s'explique par le fait que les systèmes multi-agents sont adaptés à ces types de simulation et proposent une alternative pour représenter un phénomène non complètement déterministe. Dans chacune des simulations, les raisonnements spatiaux, généralement simples, et les méthodes de perceptions différentes utilisées reflètent leur forte dépendance à la modélisation du phénomène étudié. Peu d'agents possèdent la capacité de changer de comportement et de s'adapter à ce qu'ils perçoivent de leur environnement et des événements. La capacité d'interagir par échange de messages est très peu développée dans ces modèles agents, ce qui réduit fortement l'expressivité de tels agents.

Nom	CityDev	PadiSimul	Simulation de trafic
Thématique	Urbain	Foule	Trafic
Niveau de la simulation	Méso	Micro	Micro
Modèle de l'espace	Grille régulière	Grille régulière	Grille régulière
Perception de l'espace	Connaissance totale	Cône de visibilité	Cases voisines
Raisonnement spatial	Aucun	Relation de proximité	Relation de cardinalité
Changement de comportement	Aucun	Profil	Aucun
Communication inter-agents	Aucune	Messages	Aucune

Tableau 1.1 — Comparaisons de simulations multi-agents où l'espace est un support.

1.6 Espaces géographiques comme acteurs de la simulation

Les agents qui parcourent l'espace géographique ne sont pas les seuls à devoir évoluer au cours du temps. L'espace géographique est aussi susceptible d'être modifié durant la simulation. Afin de modéliser la complexité d'un environnement, il est essentiel d'en modéliser la dynamique, ainsi que celle des individus le peuplant y compris leurs interactions pour exprimer toute la complexité du phénomène. Par exemple, l'exploitation de ressources renouvelables ne peut être modélisée sans réaliser un modèle dynamique de leur renouvellement, l'espace évolue ainsi temporellement et représente au cours du temps, les changements de l'espace géographique.

Dans le but de transformer l'espace en référentiel dynamique, il existe des plates-formes multi-agents comme NetLogo [NetLogo, 2005] ou StarLogo [StarLogo, 2005] et des applications de recherche dédiées comme les travaux de [Batty *et al.*, 2003] qui utilisent les agents pour décrire l'espace dans leurs modèles mais peu d'applications utilisent cette capacité ou alors de manière peu complexe. La communauté francophone est très active dans ce domaine de recherche et a développé des systèmes multi-agents modélisant l'espace comme un agent [Servat, 2001, Le Page *et al.*, 2000].

Dans les sous-sections qui suivent, l'utilisation d'agents dans le but de représenter la dynamique de l'espace est explorée à travers des exemples d'applications [Servat, 2001, Le Page *et al.*, 2000]. Ces exemples sont ensuite analysés en utilisant les critères définis dans la section 1.3.

1.6.1 RIVAGE

L'application RIVAGE, développée par [Servat, 2001], modélise et simule les dynamiques de flux. Le domaine d'application est centré sur la simulation de processus de ruissellement, d'infiltration et d'érosion effectués par l'eau. L'eau est, soit considérée comme un objet continu, soit à l'échelle moléculaire comme une succession d'éléments voisins, les molécules d'eau. L'idée est de diviser l'eau, non pas en molécules car leur nombre aurait été trop important, mais de la diviser en particules élémentaires appelées "boule d'eau". Chacune de ces "boules d'eau" contient un volume d'eau au début de la simulation. Au cours de la simulation, si l'érosion et l'infiltration sont prises en compte, et pas seulement le ruissellement, le volume d'une "boule d'eau" et la quantité de sol arrachée par le phénomène d'érosion sont modifiés. Les agents se déplacent sur une surface topographique. Cette surface topographique est construite à l'aide d'un modèle numérique de terrain ou à partir de courbes de niveau. Elle est construite et administrée par un ou plusieurs agents topographiques qui fournissent aux agents "boule d'eau" une altitude et une pente locale pour chaque position. Ainsi, les agents "boule d'eau" se déplacent sur cette surface en suivant la pente donnée par l'agent topographique et la hauteur d'eau calculée grâce à un voisinage obtenu à partir des agents "boule d'eau" présents dans un rayon autour de l'agent considéré. L'agent topographique

n'est pas uniquement présent pour construire la surface initiale. Il permet de modifier cette surface au cours de la simulation. Il est en effet en charge de répercuter les modifications dues à l'érosion effectuées par le passage des agents "boule d'eau" sur la surface. Durant la simulation, l'espace va être modifié par les agents "boule d'eau" qui le parcourent. D'autres agents sont créés afin d'étudier les configurations des agents "boules d'eau" en les regroupant à un niveau supérieur d'abstraction. A partir de ces regroupements, apparaissent des patrons interprétables tels que les mares et les chemins d'eau.

Le modèle agent est dédié au domaine étudié. L'apport de cette application se situe au niveau de son approche pour représenter un flux continu par une représentation discrète composée d'agents, ce qui fait entrer cette simulation dans la catégorie des micro-simulations. Le raisonnement spatial se résume à la définition d'une relation de proximité simple où les agents inclus dans le rayon autour de l'agent réalisant le raisonnement spatial sont tous considérés de la même manière. L'utilisation de cette relation semble cependant approprié à l'application et ne nécessite pas l'utilisation de raisonnement spatial plus complexe.

1.6.2 CORMAS

L'équipe de recherche dirigée par Bousquet a réalisé la plate-forme de simulation multi-agents CORMAS [Le Page *et al.*, 2000]. Cette plate-forme est générique pour le domaine de la simulation d'écosystème et a déjà été utilisée dans un certain nombre d'applications [Zunga *et al.*, 1998, Lacombe *et al.*, 2005]. Trois types d'entité sont décrits dans CORMAS :

- Les entités spatiales, leurs unions forment l'espace ;
- Les agents qui sont les entités actives du système, peuvent contenir des entités spatiales rendant active la portion de l'espace qu'ils regroupent ;
- Les objets situés représentent les entités qui ne sont ni des agents, ni des entités spatiales.

Les agents sont sous-divisés en trois catégories :

- Les agents situés ;
- Les agents communicants ;
- Les agents localisés communicants.

La troisième catégorie n'est qu'un regroupement des deux premières. Un agent situé possède un lien avec une entité spatiale et un agent communicant possède une boîte aux lettres et un canal de communication. Les agents déposent leurs messages dans les boîtes aux lettres (liste de messages que l'agent peut venir consulter) des agents avec lesquels ils sont en communication, ce qui leur permet de relever les messages de manière asynchrone. Plusieurs représentations de l'espace sont possibles en fonction de l'entité spatiale utilisée. Par défaut, l'entité spatiale est une cellule qui doit être définie comme la plus petite entité spatiale homogène. Par exemple, une portion de l'espace uniquement recouvert de forêt est considérée

comme homogène. Les entités spatiales peuvent être agrégées sous forme de polygone afin de former une hiérarchie d'entités et d'avoir un niveau de représentation supérieur. Elles peuvent être considérées comme dynamiques et avoir un comportement propre. Pour ces entités, la perception est réalisée au travers d'une construction de voisinage (quatre, six ou huit voisins selon le type de cellule choisi).

Un exemple tiré de [Bousquet et Gautier, 1998] illustre l'utilisation de l'espace comme agent dans CORMAS. Cet exemple simule l'implantation d'une communauté d'agro-éleveurs qui défrichent autour de leur village les zones fertiles pour réaliser des cultures et font pâturer leurs troupeaux dans la savane. Quatre agents sont définis : les agents village, champs, forêt et savane. Ces agents sont considérés comme des agents communicants composés d'une collection d'entités spatiales. Les agents, en fonction de leur état interne (nombre d'entités spatiales) et de la perception de leurs voisins, vont s'échanger des entités spatiales. Par exemple, l'agent village va demander à l'agent champs de lui céder des entités spatiales (le village s'agrandit) et va demander à l'agent savane de céder des entités spatiales à l'agent champs.

CORMAS n'est pas dédiée à une application particulière et son but est d'être utilisée par des thématiciens dans le cadre de micro-simulations. L'intérêt de cette plate-forme réside dans le fait qu'elle permet, d'une part de modéliser l'espace en utilisant un découpage, non seulement en cellules uniformes mais aussi par des polygones et, de réaliser des simulations où l'espace a un rôle d'acteur comme pour l'exemple exposé ici.

Les agents ont des comportements définis au début de la simulation et n'ont pas la possibilité d'en changer au cours de celle-ci. Ils ne semblent pas posséder de mécanisme de raisonnement spatial (à part une notion de voisinage simple), ce qui rend la simulation plus simple à appréhender mais moins réaliste. L'exemple montre que la gestion de ressources peut être modélisée en utilisant l'espace comme acteur et non uniquement comme support. Ainsi, le lien entre les entités spatiales d'une même catégorie est directement explicité par leur présence au sein d'un même agent. Les contraintes spatiales telles que la croissance du village en fonction du nombre de champs et de leur proximité sont ainsi plus aisément explicitées dans le cas où le village est considéré comme un acteur de la simulation.

1.6.3 Synthèse

Il existe encore peu d'applications parmi lesquelles [Bousquet et Gautier, 1998, Servat, 2001, Parenthoën *et al.*, 2004], qui utilisent les agents afin de rendre l'environnement actif. Le tableau 1.2 récapitule, d'après plusieurs critères, les simulations utilisant un environnement dynamique présentées dans les sections précédentes. Il montre que la représentation de l'espace n'est plus seulement définie par une représentation discrète de l'espace mais aussi par une représentation continue et notamment des entités spatiales vectorielles. Toutefois, le raisonnement spatial est souvent simplifié par l'utilisation d'un voisinage. Comme pour les simulations présentées dans la section précédente, le choix de la manière de percevoir l'espace dépend de l'application. Les agents interagissent entre eux par l'envoi de messages. Les agents

ont ainsi notamment la capacité d'échanger des ressources, ce qui est réalisé dans CORMAS.

Nom	RIVAGE	CORMAS
Thématique	Phénomène naturel	Ecosystème
Niveau de la simulation	Micro	Micro
Modèle de l'espace	Modèle numérique de terrain	Grille régulière et Polygones
Perception de l'espace	Cercle de visibilité	Cases ou Polygones voisins
Raisonnement spatial	Aucun	Voisinage
Changement de comportement	Aucun	Selon applications
Communication inter-agents	Aucune	Messages et Boîte aux lettres

Tableau 1.2 — Comparaisons de simulations multi-agents où l'espace est acteur.

1.7 Discussion

Ce chapitre a présenté les principes (niveaux d'abstraction, représentation et échelle spatiale, et granularité temporelle) qui qualifient les simulations dans le domaine géographique. Il a aussi montré les techniques actuelles de modélisation d'agents dans un espace géographique, et celles, plus récentes, qui modélisent tout ou une partie de ce même espace géographique à partir d'agents. Les simulations présentées illustrent la diversité d'utilisation des systèmes multi-agents dans un nombre important de domaines. Chaque simulation utilise un modèle qui permet d'étudier le phénomène et de corroborer, à l'aide d'observations, la pertinence des résultats de la simulation par rapport au phénomène réel. Cet état de l'art fait apparaître les faibles capacités des agents en terme de raisonnement dans l'espace géographique. La perception et la prise en compte des relations spatiales sont encore généralement limitées à des notions simples de voisinage (ex : 6 ou 8 voisins pour une grille régulière) [Drogoul, 2005]. D'autres notions fondamentales pour raisonner dans l'espace doivent être intégrées, et notamment [Galton, 2000] :

- La localisation d'une entité par rapport à un référentiel relatif ou absolu, comme le positionnement longitude/latitude d'un navire ;
- La proximité relative ou absolue séparant deux entités, ce qui permet d'apprécier par exemple, si deux trajectoires de navire sont proches l'une de l'autre ;
- La direction, à savoir l'orientation relative ou absolue d'une entité, ce qui donne l'occasion de déterminer si un navire est à bâbord d'un autre ;

- La topologie qui précise les relations binaires entre entités telles que la disjonction, l'adjacence et l'intersection, et de détecter si un navire est dans une zone particulière de l'espace ;
- La forme qui spécifie si une entité possède des particularités reconnaissables régulières ou irrégulières, ce qui donne la possibilité de reconnaître une entité significative dans l'espace géographique comme les amers dans le domaine maritime ;
- La taille qui détermine les dimensions d'une entité. Elle permet ainsi de différencier un chalutier d'un tanker.

L'utilisation de telles notions est susceptible de fournir à l'agent une analyse plus fine de ce qu'il perçoit et lui permet d'avoir des actions et des comportements particuliers selon ses observations. Un navire va essentiellement se concentrer sur les navires qui se trouve à tribord, pour des raisons dues au code maritime lorsqu'il est en pleine mer. Par contre, lorsqu'il se trouve dans un port, il doit être attentif à tous les autres navires qui manœuvrent. Il est donc nécessaire de développer un modèle de raisonnement spatial adapté au contexte simulé.

La plupart des simulations modélisent actuellement l'espace géographique comme une grille régulière. Ce type de représentation est en effet aisé à appréhender d'une part, et à mettre en œuvre d'autre part. Ce type de représentation de l'espace amène une perte de finesse de la représentation d'un phénomène spatio-temporel comme une trajectoire et crée une perte d'information au niveau des relations (topologie, orientation, proximité) entre les entités représentant cet espace. Si un espace contient une zone maritime et une zone terrestre, lors de la discrétisation de l'espace en une grille, les seules portions de l'espace de la zone maritime qui vont être voisins avec les parties de la zone terrestre sont celles situées à la frontière des deux zones. Par contre, si les zones ne sont pas partitionnées en cellules, elles sont dans leur ensemble considérées comme voisines. Notre choix de la représentation spatiale se porte alors de ce fait sur une représentation spatiale vectorielle afin de conserver au mieux le caractère continu des trajectoires simulées et d'exploiter plus aisément les informations topologiques.

La façon dont la perception des agents est modélisée et la manière dont ils raisonnent sur l'espace dépendent de la simulation et de l'objectif que le concepteur souhaite atteindre. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des mécanismes de perception et de raisonnement spatial si ce n'est pas utile pour la simulation.

Si nous reprenons l'exemple de la simulation d'un navire, pour avoir une représentation fine de sa trajectoire, les représentations de l'espace et du temps doivent être continues. Un navire possède des caractéristiques propres, réagit et éventuellement change son comportement de lui-même grâce à ses perceptions et aux interactions avec les autres navires en fonction de ses objectifs (ex : destination). Le modèle, qui semble adapté à ces fonctionnalités (autonomie, perception, action, raisonnement, interactions et but), paraît être le modèle multi-agents. Enfin, les navires simulés par les agents doivent avoir une capacité de raisonnement sur l'espace adapté afin de déterminer les actions qu'il est nécessaire de réaliser par

rapport à la position des autres agents.

Nous venons de poser les premiers principes de l'intégration de la dimension spatiale dans le cadre d'une simulation multi-agents (figure 1.11). Il reste alors à définir dans un premier temps, le raisonnement spatial et le système multi-agents. Puis dans un deuxième temps, il est nécessaire d'intégrer le raisonnement au sein du système multi-agents.

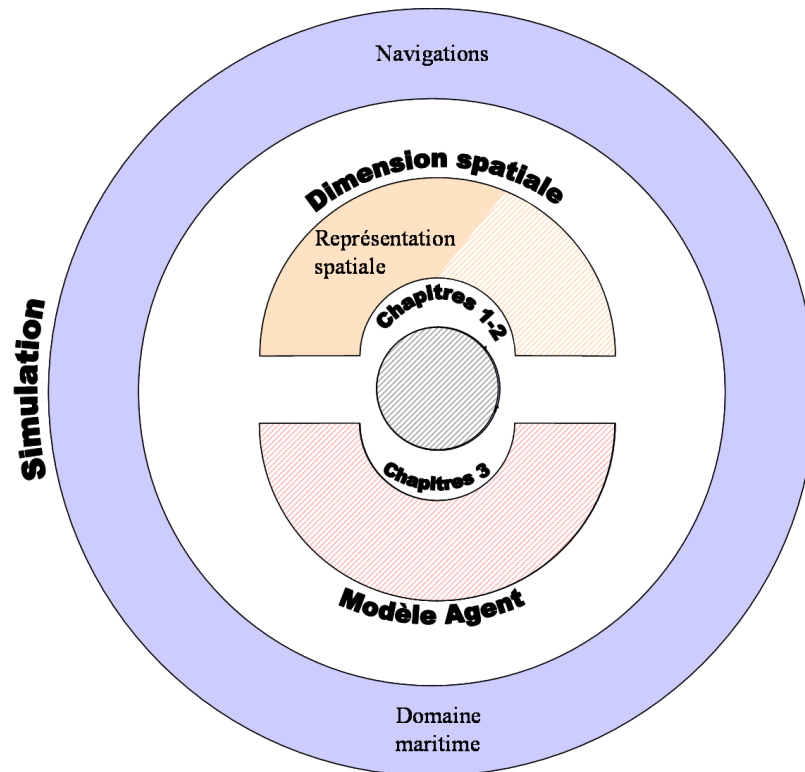


Figure 1.11 — Concepts développés au chapitre 1.

Agents et perceptions contextuelles de l'espace géographique

Simuler les entités autonomes et complexes que sont les navires dans un environnement géographique nécessite de le percevoir et d'y agir. Dans le but d'agir dans un tel environnement, ces entités ont besoin de raisonner à partir de la perception d'autres entités et des caractéristiques qui leurs sont propres. Ces caractéristiques et celles des autres entités perçues comprennent des composantes spatiales dont la principale concerne leur position. Il est donc primordiale que les entités dans le but d'agir dans l'espace géographique raisonnent spatialement. La prise en compte du contexte dans la construction du raisonnement spatial donne une cognition adaptée aux processus de décision menant à l'action appropriée.

Ce chapitre est organisé selon le plan suivant. La section 1 introduit le raisonnement spatial qualitatif et son intérêt pour la simulation de navigations maritimes. La section 2 expose les principes essentiels de notre démarche. La section 3 donne les premiers éléments de modélisation et aborde tout comme la section 4 l'influence des facteurs contextuels et de la dynamique sur le raisonnement qualitatif spatial, et en particulier sur les relations de proximité et d'orientation en se basant sur le domaine de la navigation maritime. Dans la section 3, cette influence s'exprime par une déformation des partitionnements génériques. La section 4 développe une approche de modélisation orientée vers la notion de groupe spatiaux et d'héritage. La section 5 discute des implications de notre approche de modélisation spatiale. La conclusion résume notre contribution et aborde les perspectives ouvertes par cette recherche.

2.1 Introduction

Les critères quantitatifs, qui correspondent le plus souvent à l'utilisation des propriétés de l'espace euclidien et principalement de la métrique, sont des outils privilégiés en représentation et en raisonnement spatial. Depuis une dizaine d'années, nous assistons en représentation spatiale, en complément du quantitatif, à l'émergence de l'utili-

sation de critères qualitatifs. Ces derniers sont utilisés dans de nombreux domaines tels que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) [Egenhofer et Mark, 1995], la navigation robotique [Moratz et Fischer, 2000], [Moratz *et al.*, 2002] et la vision assistée par ordinateur [Ferryhough *et al.*, 2000]. Ils définissent une relation qualitative entre une ou plusieurs entités spatiales et une entité de référence. Le raisonnement spatial qualitatif utilise pour l'essentiel les notions de proximité, d'orientation, de topologie, de taille et de forme des objets géométriques [Cohn et Hazarika, 2001]. Ces relations d'orientation qualitatives [Freksa, 1992], [Frank, 1996], [Goyal et Egenhofer, 2000], [Claramunt et Thériault, 2004] et de proximité [Zimmermann et Freksa, 1996], [Moratz *et al.*, 2003] sont plus aisément manipulables par l'esprit humain que les données quantitatives comme les distances ou les mesures d'angles [Freksa, 1992], [Clementini *et al.*, 1997].

Les informations qualitatives sont cependant imprécises, partielles et subjectives [Zimmermann et Freksa, 1996], ce qui entraîne des problèmes d'indécidabilité dans l'expression des différentes relations d'orientation ou de proximité. Ces relations dépendent également de l'utilisateur et du contexte, ce qui les rend entplus difficiles à modéliser, mais reflète mieux la perception et la représentation qu'un être humain peut avoir de l'espace. L'influence du contexte est en effet prépondérante dans notre capacité à positionner ce qui nous entoure dans l'espace. Cette affirmation est confirmée par de nombreux travaux de chercheurs en science cognitive et notamment [Gibson, 1979], à travers les notions d'affordances qui montrent que la façon dont est perçue une entité est influencée par la fonction que lui attribue l'observateur, voire la prise en compte de l'aspect culturel qui conditionne la manière de définir les relations d'orientation et de proximité selon les origines des observateurs [Levinson, 1998]. C'est la conjonction de l'influence des entités perçues, des influences culturelles, ainsi que leur combinaison avec les règlements et les usages définissant ce que nous considérons comme le contexte, qui entraîne une part de subjectivité dans la modélisation des relations qualitatives. Dans la suite de ce chapitre, nous nous focaliserons sur ces facteurs contextuels en tentant d'en dériver quelques règles stables qui permettent d'affiner les modèles courants de représentation de relations d'orientation et de proximité.

Le cadre des travaux exposés par cette recherche est celui de la simulation de navigations maritimes. La représentation des relations d'orientation et de proximité est en effet déterminante en navigation [Röfer, 1999]. Ces représentations permettent aux entités mobiles ou statiques de se situer relativement à d'autres entités présentes et de réagir en fonction de celles-ci. Notre objectif est de montrer que les facteurs contextuels modifient les approches conventionnelles de modélisation de relations spatiales dans un contexte maritime. Ces facteurs doivent donc être intégrées en aval des modèles qualitatifs de raisonnement spatial actuels comme une composante de déclinaison spécifique de ces relations. Le raisonnement spatial qualitatif défini dans ce chapitre donne un cadre pour la simulation de navires évoluant simultanément au sein d'un environnement maritime complexe. Ces mécanismes de raisonnement sont intégrés à la plate-forme TRANS (Tractable Role Agent prototype for concurrent Navigation Systems) [Fournier *et al.*, 2003]. L'objectif de TRANS est de simuler des com-

portements de navires comme l'évitement de collisions et des manœuvres d'anti-échouement basées sur l'application de règles de navigation, et dont l'un des critères d'entrée relève justement de la prise en compte des relations d'orientation et de proximité. Un objectif important de cette plate-forme est de proposer des processus d'aide à la décision pour le chef de quart, et plus généralement de permettre aux futurs marins de se former sur des situations réalistes simulées afin de les préparer à la gestion de situations à risque.

Les processus de prise de décision en navigation maritime imposent d'intégrer un ensemble important d'informations qui vont du domaine de la perception de données de position et de proximité, jusqu'à celui de la lecture d'informations spécialisées à partir de cartographies automatisées. Dans le domaine maritime, les informations dont les marins se servent au travers leurs expertises pour prendre des décisions, proviennent aussi bien de la perception du monde réel que de la carte maritime et des instruments du bord comme le GPS, le gyroscope et de nouveaux outils émergents de positionnement cartographique [Desvignes *et al.*, 2002]. Afin de mieux comprendre et de modéliser les processus de décision pour des objectifs de mise en place d'outils d'aide à la navigation, il devient indispensable d'approfondir les contraintes et les influences mutuelles entre les mécanismes de cognition de l'environnement d'une part, et d'autre part les modèles de raisonnement spatiaux qualitatifs actuellement proposés pour représenter les relations de proximité et d'orientation. Notons que cette démarche appliquée au domaine de la navigation maritime peut être généralisée dans ses principes à d'autres situations de représentations et de modélisations qualitatives de trajectoires. Les simulations de navigations pédestres, routières et aériennes peuvent, par exemple, tirer partie de cette démarche en appliquant leurs caractéristiques contextuelles spécifiques.

L'utilisation du raisonnement qualitatif appliqué au domaine maritime, dans le cadre de la simulation de navigation, va donner aux navires simulés la possibilité d'obtenir et de qualifier des informations de positionnement sur les entités se trouvant à leur voisinage (ex : autres navires, amers). Les informations collectées servent principalement à :

- Définir des règles d'évitement lors de risques de collision entre navires.
- Permettre aux navires de juger si un changement de cap est dangereux ou non en indiquant les régions potentiellement dangereuses.
- Diffuser l'information aux utilisateurs de manière immédiatement compréhensible.

2.2 Principes de modélisation spatiale contextuelle

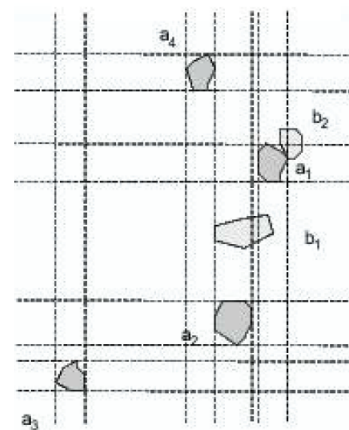
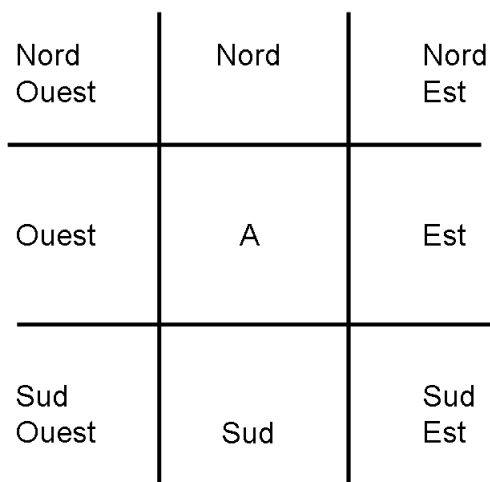
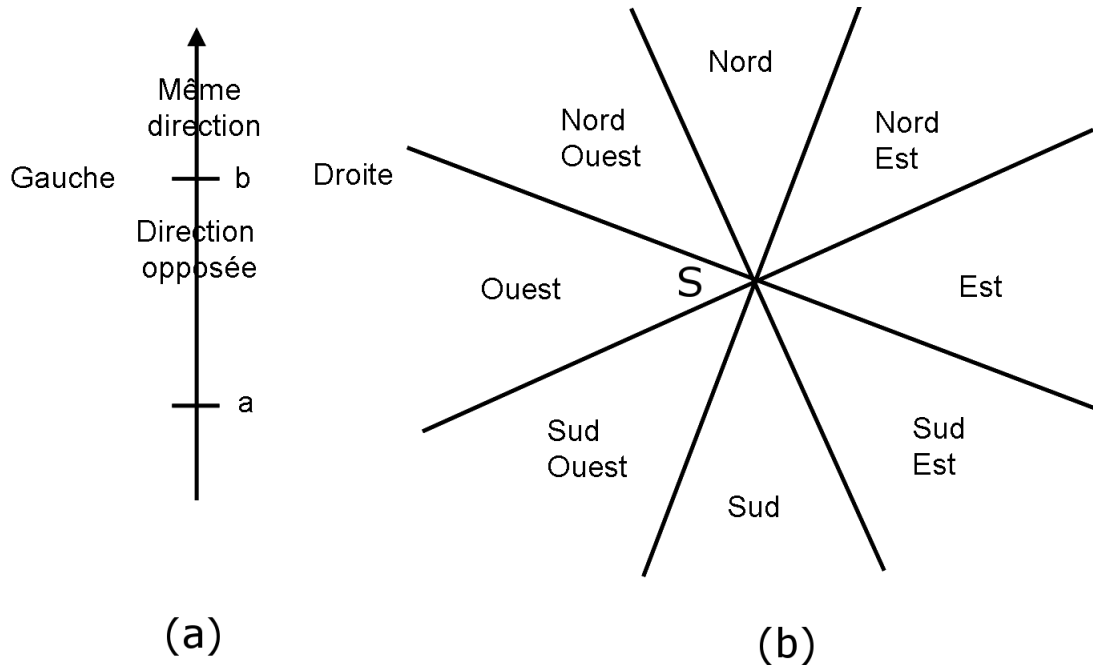
Plusieurs types de partitionnement de l'espace sont actuellement utilisés en modélisation spatiale. Ils sont basés sur des référentiels absolus ou relatifs, ou la combinaison des deux, et ce, à différents niveaux de granularités [Papadias et Egenhofer, 1997], [Goyal et Egenhofer, 2000], [El Geresy, 2003]. Les relations d'orientation et de proximité en raisonnement spatial peuvent être traitées séparément puis combinées afin de réaliser un partitionnement plus fin de l'espace.

2.2.1 Relations d'orientation

Il existe deux façons d'aborder la notion d'orientation. La première est l'utilisation d'un repère relatif et la seconde l'utilisation d'un repère absolu. Dans le cas d'un repère relatif, les concepts utilisés sont basés sur les notions usuelles de droite, gauche, devant et derrière et des compositions de ces concepts de base [Freksa, 1992], [Zimmermann et Freksa, 1996], [Moratz *et al.*, 2002]. Le repère est relatif à une entité de référence, il effectue les mêmes mouvements que celle-ci et dépend du sens d'observation de celui-ci. La partition réalisée à partir de ces concepts permet d'obtenir la position des autres entités présentes par rapport à l'entité de référence (ou référent). Ainsi, lorsque le référent effectue une rotation ou se déplace, le positionnement des objets par rapport à lui est modifié. Ce type de repère est essentiellement utilisé dans un cadre local où les dimensions de l'espace sont relativement réduites. La figure 2.1(a) montre un partitionnement relatif réalisé en utilisant un point de vue a et un référent b . Le positionnement des entités est obtenu par la perception que a en a par rapport à b .

Le partitionnement de l'espace suivant les points cardinaux (N, O, E, S) est le deuxième concept (Figures 2.1(b) et 2.1(c)) utilisé dans le but de traduire de manière qualitative l'orientation [Frank, 1996], [Goyal et Egenhofer, 2004], [Ligozat, 1998]. Cette partition, contrairement à la première, est définie par un repère absolu. Le positionnement est toujours donné par rapport à un point de référence mais les directions ainsi définies sont invariantes par rotation. Ce type de partitionnement est très utilisé en cartographie d'où il tire son origine. Il donne la possibilité de positionner des entités qui se trouvent relativement éloignées du point de référence. La figure 2.1(c) représente un partitionnement absolu où le référent et le point de vue sont identiques et se situent au point A . La figure 2.1(b) présente un partitionnement de même type que celui de la figure 2.1(c) mais il se distingue de celui-ci par sa forme iconique. Tout comme précédemment le référent et le point de vue sont confondus et se trouvent dans cet exemple au point S .

[Isli *et al.*, 2001] ont réalisé un modèle de raisonnement qualitatif spatial qui combine un partitionnement relatif et un partitionnement absolu, ce qui augmente l'expressivité des relations. [Clementini *et al.*, 1997] considèrent les notions de droite/gauche et les points cardinaux comme des labels spécifiant le partitionnement. Ces labels dépendent de l'échelle de l'environnement dans lequel ces notions sont utilisées. [El Geresy, 2003] considère ces deux notions comme nécessaires pour pleinement représenter une relation entre deux objets. En effet, si le modèle s'appuie sur un repère relatif qui est modifié lors de rotations du référent, il peut être utile d'avoir un repère absolu en plus du repère relatif afin d'obtenir des informations supplémentaires et indépendantes de la rotation du référent. Il garde cependant ces deux notions disjointes. Claramunt et Thériault étendent le modèle réalisé par Goyal et Egenhofer à la notion d'orientation d'objets définis par N composants distincts [Claramunt et Thériault, 2004]. Dans la figure 2.1(d), l'entité a , formée des éléments $a1$, $a2$, $a3$ et $a4$ est le référent ainsi que le point de vue. Les informations concernant les autres objets sont alors données à partir des éléments composant l'entité a . Généralement le parti-



(c)

(d)

Figure 2.1 — Différentes manières d'exprimer les relations d'orientation.

tionnement de l'espace utilisé pour définir les relations d'orientation est un partitionnement uniforme (mêmes angles si la partition est conique ou même dimension s'il s'agit de formes géométriques).

Bien que les marins utilisent un repère absolu pour positionner leur navire, ils utilisent un repère relatif en ce qui concerne les manœuvres d'évitement de collision. Dans notre démarche de modélisation, nous avons donc choisi d'étudier l'influence du contexte sur les relations d'orientation à travers un partitionnement relatif de forme iconique qui présente l'avantage, dans ses principes, de se rapprocher des partitions utilisées en navigation maritime. Ce partitionnement est centré sur un point, cas qui s'apparente à celui d'un observateur situé dans un environnement géographique maritime.

2.2.2 Relations de proximité

La notion qualitative de distance, quant à elle, est représentée par les notions de proximité ou d'éloignement du point de référence (proche, distance moyenne, lointain). Généralement, cette notion est associée à une partition isotrope de l'espace. A chaque terme définissant une notion de proximité particulière est associée une région circulaire de taille différente centrée sur le référent (i.e. de proche à lointain) (figure 2.2). Cependant, la notion de proximité peut être dépendante du contexte et représentée par une surface anisotrope [Clementini *et al.*, 1997],[Ferryhough, 1997]. Toutefois, Clementini et De Felice supposent qu'il est toujours possible de revenir, grâce à une transformation, à une surface isotrope.

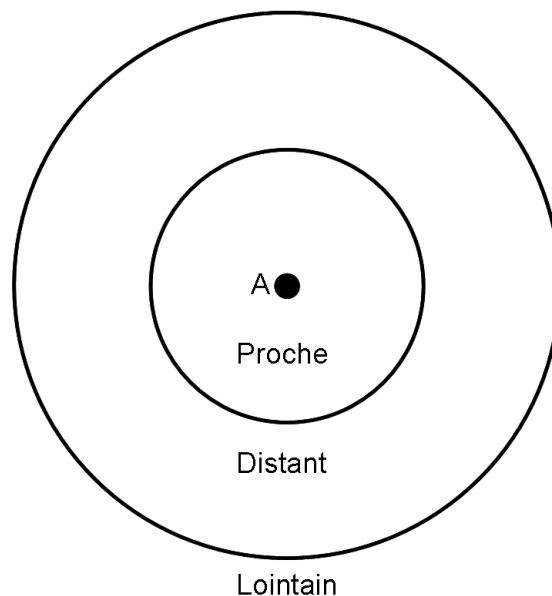


Figure 2.2 — Partitionnement exprimant les relations de proximité.

2.2.3 Combinaison des relations de proximité et d'orientation

La combinaison des relations d'orientation et de proximité donne un partitionnement plus fin de l'espace. Par exemple, il est possible de dire qu'un objet est proche à droite ou lointain au nord, selon l'utilisation d'un repère relatif ou absolu pour les relations d'orientation.

La figure 2.3 montre la combinaison des relations de proximité avec des relations d'orientation sous forme iconique dont le repère est absolu. Dans cet exemple, le référent a perçoit l'entité b positionnée dans la région formée par la relation de proximité *distant* et la relation d'orientation *Nord-Est*. Pour modifier la région d'appartenance de l'entité b , le référent doit réaliser une translation.

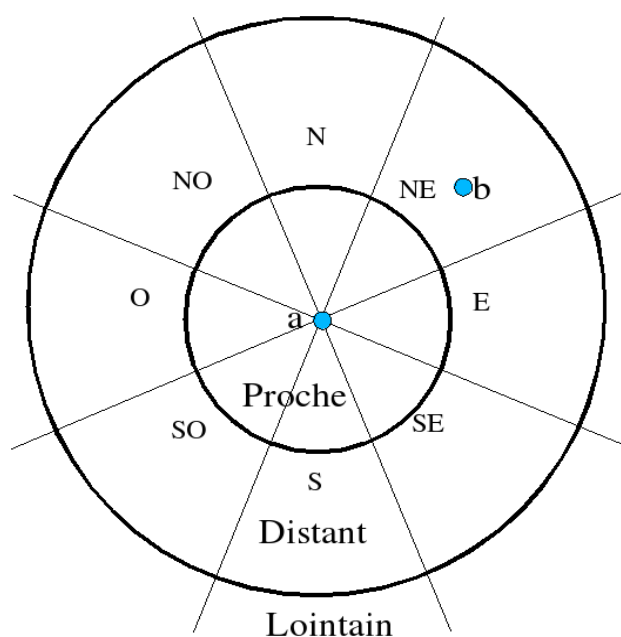


Figure 2.3 — Partitionnement combinant relations d'orientation cardinales et de proximité.

La figure 2.4 montre la combinaison des relations de proximité avec celles d'orientation sous forme iconique dont le repère est relatif. Dans cet exemple, le référent a perçoit l'entité b positionnée dans la région formée par la relation de proximité *distant* et la relation d'orientation *droite*. Pour modifier la région d'appartenance de l'entité b , le référent doit réaliser soit une translation soit une rotation ou une combinaison des deux.

2.2.4 Principes

Les différents partitionnements proposés par [Freksa, 1992], [Frank, 1996], [Zimmermann et Freksa, 1996], [Moratz *et al.*, 2003], [Goyal et Egenhofer, 2000] et [Claramunt et Thériault, 2004] sont génériques et donnent des résultats satisfaisants lors d'utilisations indépendantes du contexte. Par contre, lors d'utilisations dans un contexte particulier, il est nécessaire de raffiner de tels partitionnements afin de tenir compte des conditions de perception de l'environnement spatial (lieu, situation, niveau de perception

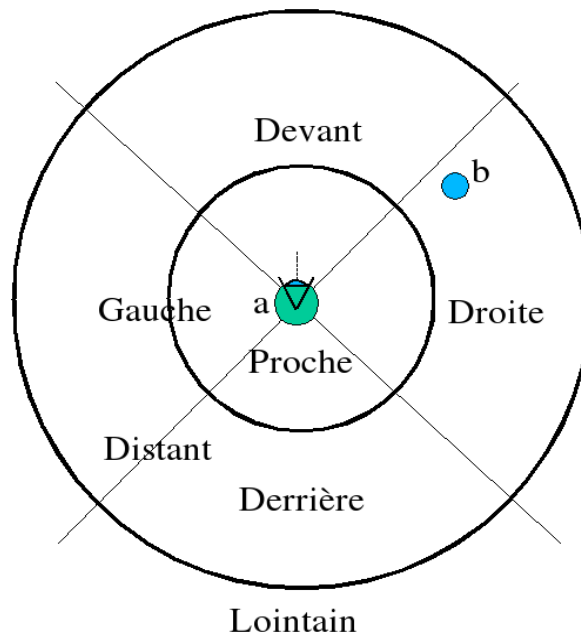


Figure 2.4 — Partitionnement combinant relations d'orientation relatives et de proximité.

et configuration spatiale des entités à situer), des contraintes externes (usages et règles de comportement du référent dans son milieu) et du caractère dynamique des entités spatiales.

Dans notre démarche de modélisation, nous avons choisi d'étudier l'influence du contexte sur les relations d'orientation à travers un partitionnement de forme iconique qui présente l'avantage, dans ses principes, de se rapprocher des partitions utilisées en navigation maritime. Ce partitionnement est centré sur un point, cas qui s'apparente à celui d'un observateur situé dans un environnement géographique maritime.

Le niveau de perception correspond à la position qu'occupe un observateur pour appréhender son environnement, et à la fonction associée à cette perception. A chaque niveau de perception correspond une granularité d'observation de l'espace et du temps. L'influence de la perception peut être analysée à deux niveaux : statique ou dynamique. Le niveau statique concerne toutes les situations où le référent et les entités qu'il observe sont immobiles (dans la suite de ce chapitre, un observateur est le plus souvent associé au référent). Le niveau dynamique représente les situations où l'une des entités spatiales observées ou le référent sont en mouvement.

Une première contrainte à considérer lors de la perception dans la modification des relations d'orientation et de proximité provient de critères physiques. Considérons un espace, vide dans un premier temps, et entièrement visible et accessible à un observateur, le référent. Imaginons dans un deuxième temps, des entités spatiales perçues en terme de proximité et d'orientation. Si le nombre de ces entités spatiales augmente, l'espace visuel et accessible va être modifié. Ces entités spatiales peuvent alors former des groupes spatiaux qui pourront être considérés, à un niveau d'abstraction supérieur, comme une unité homogène aux propriétés

de proximité et d'orientation agrégées et homogènes. Une deuxième propriété émergente d'un tel espace est la constitution de parties de l'espace accessibles ou inaccessibles. Nous modélisons ce phénomène de rupture de l'espace par la notion de barrière.

Les règlements, les usages et les actions forment des contraintes qui imposent une certaine forme au partitionnement. Ces modifications sont généralement spécifiques aux contraintes exprimées par le domaine et ne permettent donc pas de généralisation. Le concepteur des outils de raisonnement est alors tenu pour chaque contrainte de spécifier, dans le cas où cela est possible, comment celle-ci va agir sur le partitionnement.

2.3 Modélisation contextuelle de relations spatiales

Nous modélisons dans cette section les modifications de relations spatiales liées au positionnement relatif d'une entité spatiale selon plusieurs aspects. Ces contraintes observées relèvent des facteurs de perception, des usages, des règlements, des actions du domaine maritime et de l'influence de la dynamique du milieu et celle de l'encombrement de l'espace géographique.

2.3.1 Modélisation

Nous définissons des préalables nécessaires à la construction de notre modèle de raisonnement spatial contextuel. Ces notions sont définies selon les termes suivants :

Définition 1 *Une entité spatiale est une entité homogène perçue et située dans un espace géographique. Le terme entité spatiale englobe tous les éléments présents dans l'environnement qui peuvent avoir une influence sur la perception.*

Définition 2 *Une entité spatiale mobile est une entité spatiale qui se déplace dans un environnement (d'un point de vue physique et/ou visuel). A contrario, une entité spatiale statique est une entité spatiale qui ne se déplace pas.*

Définition 3 *Une entité spatiale de référence ou référent $o \in E$, l'ensemble des entités spatiales, est une entité spatiale à partir de laquelle les autres entités spatiales sont positionnées dans l'espace, ces dernières sont appelées entités à situer.*

Chaque entité spatiale possède des régions d'influence qui vont d'une part spécifier leurs relations de proximité envers les autres entités spatiales, et d'autre part déterminer l'influence spatiale que celle-ci exerce sur les autres entités spatiales (figure 2.5).

Définition 4 *Pour chaque entité spatiale $e_i \in E$, trois régions d'influence $AP(e_i)$, $AD(e_i)$, $AL(e_i)$ formant une partition de l'espace sont définies :*

- $AP(e_i)$ pour les proximités proches ;

- $AD(e_i)$ pour les proximités distantes ;
- $AL(e_i)$ pour les proximités lointaines.

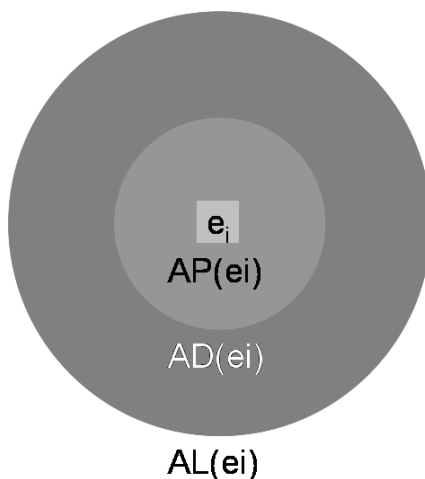


Figure 2.5 — Régions d'influence d'une entité spatiale.

2.3.2 Niveaux de perception

La distinction entre plusieurs niveaux de perception s'exprime par une ou plusieurs différences internes ou externes dues aux caractéristiques de l'observation et de l'observateur, en fonction de l'objectif poursuivi. Ces différences peuvent être de deux ordres : soit physique (encombrement, manœuvrabilité), soit propre à l'observateur (culture, âge). Par exemple, un chef de quart dans un navire va tendre à percevoir les relations spatiales extérieures à partir du référentiel attaché au navire, hypothèse mentionnée par [Dennett, 1991] en prenant le cas voisin d'un véhicule. Les fonctions intéressant le chef de quart, et à partir desquelles il agit pour l'essentiel ne sont pas directement les siennes, mais celles accessibles à travers le navire. Il y a alors passage d'un niveau de perception à un autre. Cette modification de la perception va modifier la nature des relations spatiales appréhendées. Dans l'exemple de la figure 2.6(a) issue du simulateur de l'École navale, l'observateur ne perçoit pas au travers un navire école (navire de relativement petite taille servant à l'instruction des élèves) l'environnement de la même manière qu'au travers un porte-avions comme dans le cas illustré par la figure 2.6(b). Le bateau école a la possibilité de se mouvoir dans des chenaux plus étroits que le porte-avions ou encore d'éviter plus aisément les dangers qu'il peut rencontrer. Les relations de proximité sont différentes, le porte-avions étant contraint, dans sa représentation des relations de proximité, de tenir compte de ses caractéristiques (taille, manœuvrabilité). Dans un autre registre, deux marins, l'un expérimenté et l'autre novice, du fait de leurs expériences respectives, vont avoir une perception de leur environnement différente selon une plus ou moins bonne connaissance du milieu et des navires.



Figure 2.6 — Simulation de la passerelle (a) d'un navire école de petite taille, (b) d'un porte-avions.

2.3.3 Influences des usages, des règlements et des actions

Les relations d'orientation relatives à la position et l'orientation de l'observateur sont définies selon une partition de l'espace déterminée par les quatre relations basiques : devant, derrière, droite et gauche (figure 2.7(a)). Dans le domaine maritime, un autre type de partition formée par les usages prévaut. Le partitionnement est réalisé, par trois relations d'orientation relatives à la direction de la proue du navire (figure 2.7(b)) : bâbord, tribord et arrière.

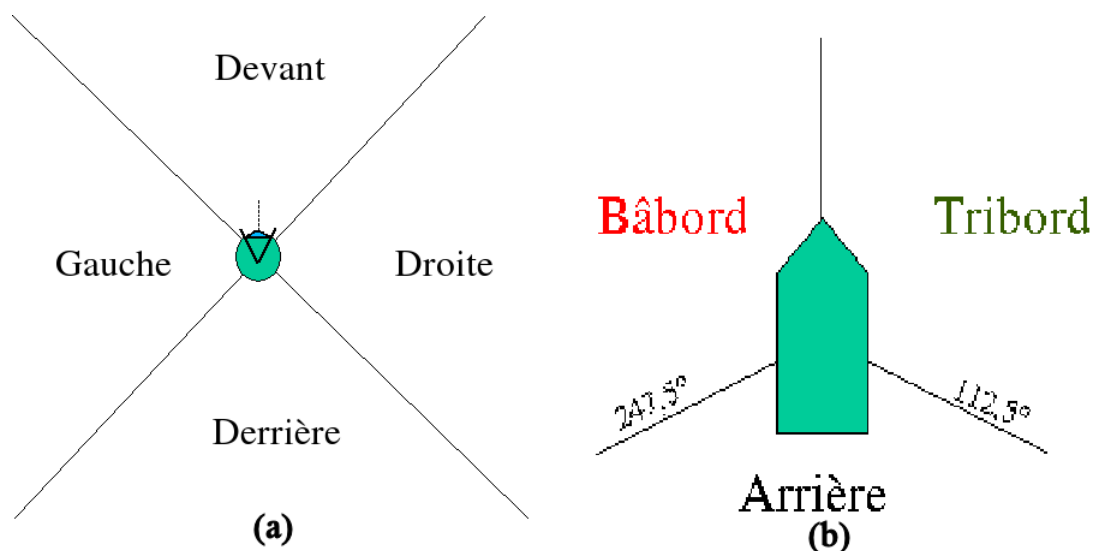


Figure 2.7 — Partitionnement des relations d'orientation (a) génériques, (b) du domaine maritime.

Les règlements peuvent aussi avoir une influence sur la perception qu'un individu a de son environnement. Dans le cadre de la navigation maritime, le partitionnement définissant les relations d'orientation et de proximité est centré sur le navire et il est défini en fonction de l'orientation du vecteur vitesse de ce navire. Il est précisé étape par étape en tenant compte de toutes les contraintes et les règles définies par L'Organisation Maritime Internationale (OMI

ou IMO) [IMO, 1997, Vagnon et Wadoux, 2002] appartenant au domaine, puis en tenant compte du milieu, de la dynamique et de la localisation des autres navires présents dans l'environnement. Les différents angles et mesures servant à définir les règles de navigation ont été obtenus auprès de la marine nationale française. Deux règles essentielles issues du code maritime, et qui vont modifier les relations de proximité et d'orientation, sont à prendre en compte :

- La règle constituant le statut de privilège d'un navire. Un navire est privilégié lorsqu'il se trouve à tribord d'un autre navire, un navire non privilégié doit céder la place à un navire privilégié en cas de risque de collision ;
- La définition d'une région autour du navire. Cette région est délimitée par un périmètre où aucun navire ne doit entrer à moins que le capitaine du navire référent ne l'ait autorisé. Cette région est appelée Zone de Distance Minimale de Passage (ZDMP).

Ces deux règles interviennent dans la modélisation des relations de proximité (figure 2.8).

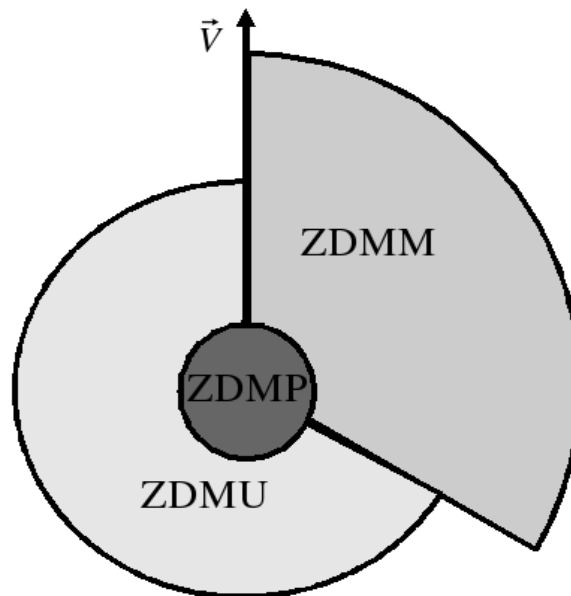


Figure 2.8 — Relations de proximité dans le domaine maritime.

La règle de privilège va déterminer deux régions de proximité, une allant de bâbord à l'arrière : la Zone de Distance Minimale d'Urgence (ZDMU) et l'autre se trouvant à tribord : la Zone de Distance Minimale de Manœuvre (ZDMM). La différence entre les deux s'explique par le fait que le navire au centre de la partition va centrer son attention sur les navires privilégiés. En effet, si un risque de collision apparaît, le navire non privilégié doit manœuvrer afin d'éviter le navire privilégié. Si le navire non privilégié ne manœuvre pas, le navire privilégié doit le faire lorsque le navire non privilégié atteint la ZDMU. Le complément de ces trois régions est nommé extérieur (Ext). En règle générale, les diamètres de la ZDMU et la ZDMM sont proportionnels à celui de la ZDMP.

En réalisant l'intersection spatiale du partitionnement obtenu par les usages (figure 2.7(b)) et celui obtenu par les règlements (figure 2.8), le partitionnement schématisé par la figure 2.9 est réalisé. Il définit les régions déterminant les manœuvres à effectuer en cas de risque de collision entre deux navires. L'ajout d'une subdivision nommée *tr* à la ZDMM permet de différencier les règles de manœuvre selon la localisation du navire impliqué dans le risque de collision. r_1 , r_2 et r_3 définissent respectivement les rayons de ZDMP, ZDMU et ZDMM.

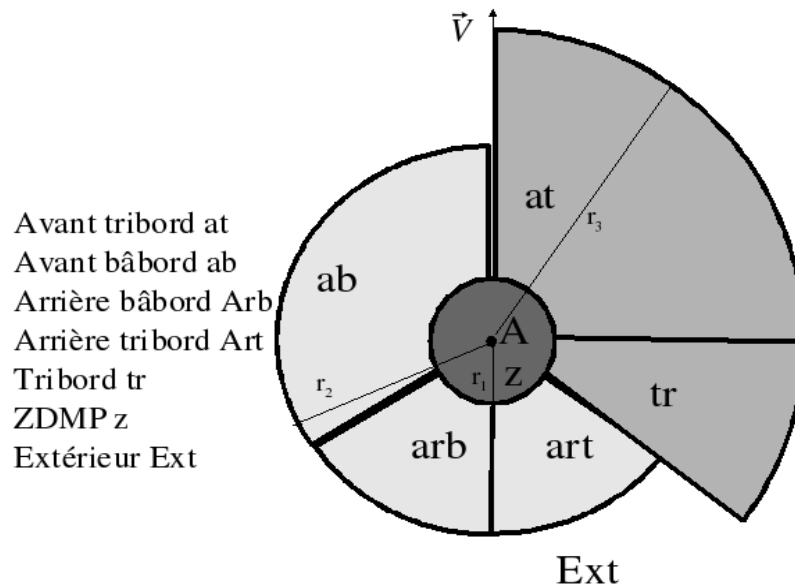


Figure 2.9 — Partitionnement particulier du domaine maritime.

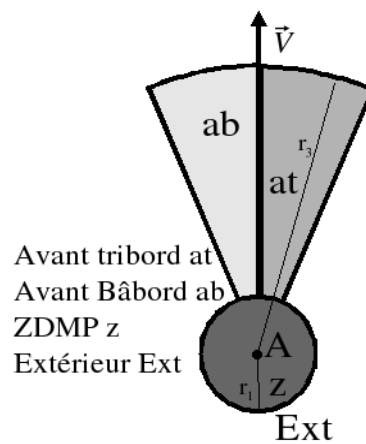


Figure 2.10 — Partitionnement modifié par l'action rattraper.

Les actions que le référent peut réaliser influencent aussi la perception de ce dernier. Lorsque par exemple un navire traverse perpendiculairement un chenal, il doit faire plus particulièrement attention aux navires arrivant de sa droite et de sa gauche. L'action "traverser le chenal" influence alors sa perception. De même, l'action de rattraper un autre navire va, comme le montre la figure 2.10, modifier le partitionnement présenté par la figure 2.9 en

adaptant dans ce cas le règlement à appliquer. L'action de rattraper un navire est réalisée par un navire lorsque celui-ci se trouve avec une vitesse supérieure et à l'arrière du navire qui le précède. Le navire qui rattrape est alors non privilégié quelque soit le coté d'où il arrive (tribord ou bâbord). Cette règle qui est associée à l'action de rattraper se reflète alors dans le partitionnement. C'est pourquoi les régions *at* et *ab* sont symétriques par rapport au vecteur vitesse du navire. Les modifications peuvent être observées aussi bien au niveau des relations définissant l'orientation qu'au niveau de celles caractérisant la proximité.

2.3.4 Influence de la dynamique

Du point de vue de la dynamique, la perception peut être modifiée par la vitesse et le sens de déplacement du référent. La vitesse d'un navire peut par exemple influencer la perception du chef de quart. Lorsque la vitesse augmente ou diminue, les relations de proximité vont elles aussi être modifiées. Ces modifications sont représentées par un étirement de la partition des relations de proximité selon la direction du vecteur vitesse et par un rétrécissement par rapport à l'orthogonale de ce même vecteur (figure 2.11). La différence entre les deux s'explique en partie par l'attention de l'observateur qui se trouve focalisée sur les entités spatiales de l'environnement dans la direction du vecteur vitesse, et par l'augmentation de la proximité des entités spatiales dans la direction de ce même vecteur, et a contrario de la réduction relative des proximités des entités spatiales se situant dans la direction orthogonale de ce vecteur vitesse. Appliqué au partitionnement de l'espace défini pour la navigation maritime, ce phénomène engendre une augmentation ou une diminution de la ZDMP, et par conséquent de la ZDMM et de la ZDMU.

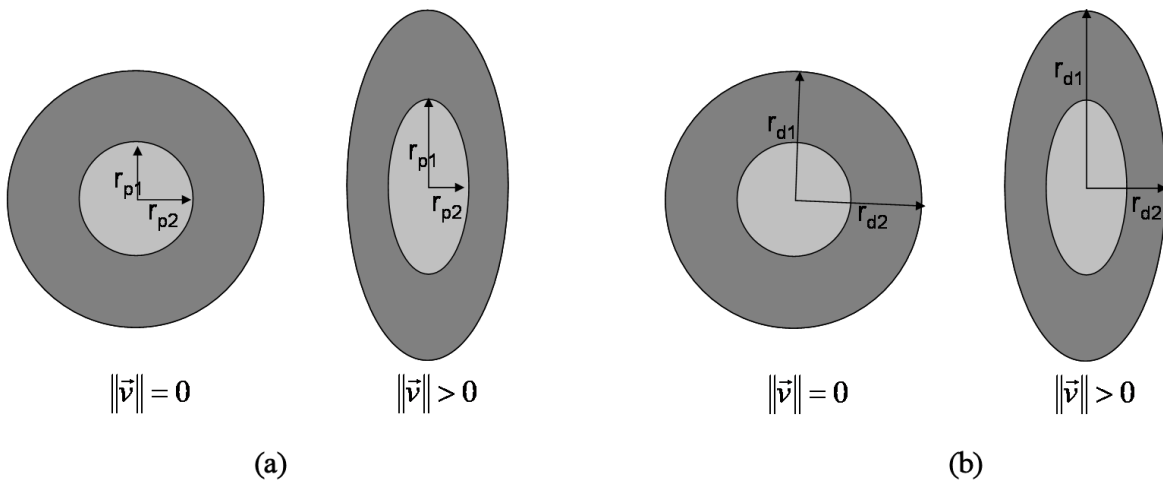


Figure 2.11 — Influence de la vitesse sur la relation de proximité (a) "proche", (b) "distant".

Plus formellement, la déformation géométrique imposée par la contrainte de vitesse est précisée pour les différents niveaux de proximité. Pour la relation *proche*, cette déformation est précisée par la définition suivante :

Définition 5 Soit \vec{v} le vecteur vitesse d'une entité mobile $e_i \in E$. Soit $\|\vec{r}_p\|$ le rayon de la région définissant la relation de proximité "proche" de cette entité spatiale e_i lorsque $\|\vec{v}\| = 0$. Soient $\|\vec{r}_{p1}\|$ et respectivement $\|\vec{r}_{p2}\|$, la demi longueur de l'axe principal et la demi longueur de l'axe secondaire formant la région "proche" de l'entité mobile. Plus formellement, \vec{r}_{p1} et \vec{r}_{p2} sont donnés par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \vec{r}_{p1} \times \vec{v} = 0 \wedge \|\vec{r}_{p1}\| &= \begin{cases} \|\vec{r}_p\| & \text{si } \|\vec{v}\| = 0 \\ \beta \|\vec{r}_p\| & \text{avec } \beta > 1 \text{ autrement} \end{cases} \\ \vec{r}_{p2} \cdot \vec{v} = 0 \wedge \|\vec{r}_{p2}\| &= \begin{cases} \|\vec{r}_p\| & \text{si } \|\vec{v}\| = 0 \\ \alpha \|\vec{r}_p\| & \text{avec } 0 < \alpha < 1 \text{ autrement} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.1)$$

La définition 5 reflète le phénomène naturel d'étirement des régions de proximité dans la direction et le sens du vecteur vitesse, et *a contrario* de son raccourcissement dans la direction orthogonale à ce vecteur vitesse (figure 2.11(a)).

Par analogie à la définition 5, il est possible de formaliser la déformation géométrique qu'entraîne la contrainte de vitesse sur la relation de proximité *distant*.

Définition 6 Soit \vec{v} le vecteur vitesse d'une entité mobile $e_i \in E$. Soit $\|\vec{r}_d\|$ le rayon de la région définissant la relation de proximité "distant" de cette entité spatiale e_i lorsque $\|\vec{v}\| = 0$. Soient respectivement $\|\vec{r}_{d1}\|$ et $\|\vec{r}_{d2}\|$, la demi longueur de l'axe principal et la demi longueur de l'axe secondaire de l'ellipse formant la région "distant" de l'entité mobile. Plus formellement, \vec{r}_{d1} et \vec{r}_{d2} sont donnés par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \vec{r}_{d1} \times \vec{v} = 0 \wedge \|\vec{r}_{d1}\| &= \begin{cases} \|\vec{r}_d\| & \text{si } \|\vec{v}\| = 0 \\ \beta \|\vec{r}_d\| & \text{avec } \beta > 1 \text{ autrement} \end{cases} \\ \vec{r}_{d2} \cdot \vec{v} = 0 \wedge \|\vec{r}_{d2}\| &= \begin{cases} \|\vec{r}_d\| & \text{si } \|\vec{v}\| = 0 \\ \alpha \|\vec{r}_d\| & \text{avec } 0 < \alpha < 1 \text{ autrement} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Les déformations spatiales de la relation de proximité *distant* sont de même nature que les modifications engendrées sur la relation de proximité "proche" précédemment modélisées (figure 2.11(b)).

2.3.5 Influence des barrières

Une barrière déforme un partitionnement considéré dans la mesure où une partie de l'espace au delà de cette barrière n'est plus accessible, ou seulement partiellement accessible au

réfèrent. Si le réfèrent tente de situer d'autres entités spatiales, il va tenir compte implicitement de ces barrières. Les barrières modifient alors les relations d'orientation et de proximité pour refléter ces différents degrés d'inaccessibilité.

Dans l'espace modélisé, nous distinguons le réfèrent d'une entité spatiale à situer (un navire pour le domaine maritime) et le reste de l'environnement. Différents cas déterminés par les éléments présents dans l'environnement sont à considérer :

- Un espace accessible où seul le réfèrent (faisant aussi office d'observateur) et une entité à situer sont présents dans l'environnement.
- Un espace accessible contraint où en plus du réfèrent et de l'entité à situer se trouvent d'autres entités spatiales perçues par l'observateur.
- Un espace semi-accessible qui est composé de régions accessibles pour le réfèrent, et de régions inaccessibles. Il possède comme les environnements précédents, un réfèrent et une entité à situer plus une ou plusieurs barrières qui rendent pas ou peu accessible pour le réfèrent, virtuellement ou physiquement, des portions de l'espace.

Un espace accessible contraint et un espace semi-accessible sont des briques élémentaires du modèle pouvant être combinées afin de former des cas plus complexes.

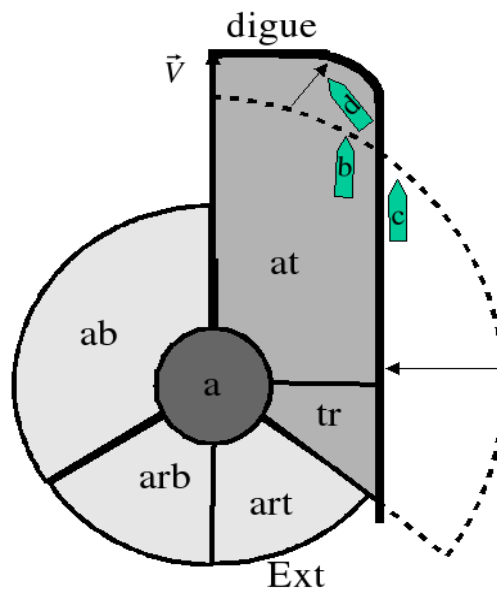


Figure 2.12 — Proximité et barrières.

Dans le cas des relations de proximité, un exemple d'espace semi-accessible est représenté par le schéma de la figure 2.12. Cette figure montre que le navire réfèrent a en estimant la proximité à laquelle se trouve les autres navires, va tenir compte des éléments présents dans l'environnement. Dans le cas de l'exemple présenté, la barrière, représentée par une ligne pleine (ex : une digue), va influencer les relations de proximité. Cette modification entraîne une différence de perception du réfèrent. Celui-ci considère que le navire b se trouve dans at alors que le navire c est considéré dans Ext . Par contre, le réfèrent considère que le

navire d se situe dans at alors qu'il devrait être dans Ext . La barrière est en effet proche à cet endroit de la frontière extérieure de la région at , ce qui entraîne une déformation de la frontière de la région vers la barrière. L'élément séparant l'environnement modifie une partie de la partition distinguant les régions de at et de Ext . Le partitionnement est déformé pour refléter la modification de la perception du référent par une barrière de l'environnement.

Dans le cas des relations d'orientation, un exemple d'espace semi-accessible est présenté par la figure 2.13. Dans l'exemple, les régions représentant l'avant tribord et tribord sont déformées pour prendre en compte les régions accessibles allant dans ces directions. Les limites des régions accessibles forment des barrières naturelles en dehors desquelles aucune entité spatiale n'influence la navigation du référent. Il existe alors deux espaces différents : un espace accessible entre les barrières et un espace non accessible, le reste de l'environnement. Les relations d'orientation sont déformées en suivant ces barrières. Dans cet exemple, le référent (le navire a) va considérer qu'il situe le navire b se trouvant dans une région accessible du canal dans la région at . En effet, cette orientation est la direction globale vers laquelle il observe en suivant la région accessible du canal. La partition est déformée afin de refléter l'influence des canaux.

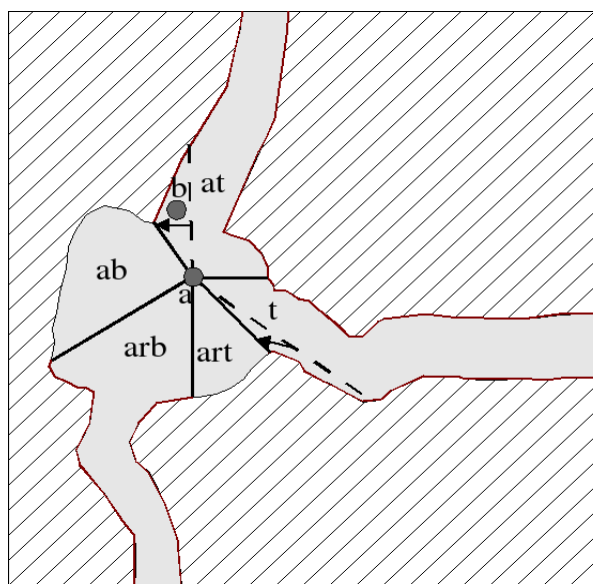


Figure 2.13 — Orientation et barrières

Dans le cas de l'espace accessible, l'utilisation d'un partitionnement générique pour les relations d'orientation et de proximité est adéquate à l'étude du positionnement de l'entité à situer. Aucune distorsion du partitionnement n'est observée dans ce cas.

Les barrières, tant pour les relations d'orientation que celles de proximité, créent des déformations plus ou moins franches de la perception de ces relations et des partitions de l'espace que ces dernières engendrent. Les régions qui composent les barrières et les régions au-delà sont des régions inaccessibles, à moins de contourner les barrières, pour le référent. Le partitionnement résultant de la combinaison entre un espace semi-accessible et le parti-

tionnement utilisé est formé de la différence des régions de ce partitionnement et des régions inaccessibles pour le référent plus, diverses déformations de celles-ci.

2.4 Groupes spatiaux et relations spatiales contextuelles

D'après une des lois de la Gestalt, un observateur amalgame les entités proches les unes des autres créant ainsi un groupe qui est considéré dans sa globalité, à un niveau d'abstraction supérieur, comme une entité homogène [Koffka, 1935]. Dans le cas du domaine maritime, cela s'exprime par le regroupement de navires qui se trouvent proches les uns des autres comme c'est le cas pour une flottille de pêche.

Plusieurs niveaux d'abstraction sont à considérer dans une démarche de perception de relations spatiales. A un niveau désagrégé, l'observateur perçoit les entités spatiales individuellement. A un niveau agrégé, les entités spatiales s'assemblent par groupes spatiaux homogènes. Au niveau du groupe spatial, les propriétés agrégées sont dérivées des propriétés locales remarquables des entités spatiales. Dans le cas de la navigation maritime, les cas les plus défavorables pour la navigation dans l'expression des relations spatiales ont tendance à être retenus. Dans le cas où le positionnement d'orientation ou de proximité d'une entité spatiale qui fait partie d'un groupe spatial est défavorable pour l'observateur, comme l'augmentation de risque de collision, cette caractéristique va se répercuter sur le groupe spatial. Dans un deuxième temps, une caractéristique qui est importante et significative pour l'observateur peut se propager, lorsque le niveau d'abstraction de référence est le groupe spatial, aux autres entités spatiales formant le groupe spatial qui vont ainsi en hériter. Il est alors nécessaire de définir une notion de groupe spatial que nous choisissons de modéliser à partir de l'exécution récursive d'un critère de proximité spatiale, c'est à dire lorsqu'au moins deux entités spatiales sont suffisamment "proches" l'une de l'autre.

Définition 7 Soit un ensemble d'entités spatiales $G = \{e_1, \dots, e_n\}$, $G \subseteq E$. G est un groupe spatial de E si et seulement si :

$$\forall e_i \in G, \exists e_j \in G \text{ avec } e_i \neq e_j \text{ tel que } AP(e_i) \cap AP(e_j) \neq \emptyset \quad (2.3)$$

Définition 8 Un groupe spatial possède des régions d'influences qui sont dérivées de celles des entités spatiales :

$$\begin{aligned} AP(G_i) &= \bigcup_{i=1}^n AP(e_i) \\ AD(G_i) &= \bigcup_{i=1}^n AD(e_i) - AP(G_i) \\ AL(G_i) &= \bigcup_{i=1}^n AL(e_i) - AP(G_i) - AD(G_i) \end{aligned} \quad (2.4)$$

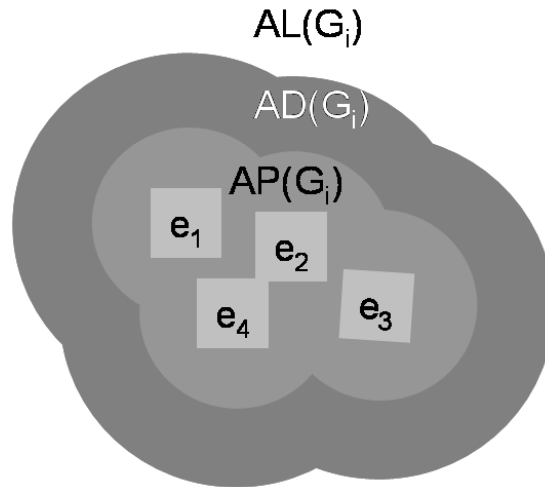


Figure 2.14 — Groupe d'entités spatiales et ses régions d'influence.

La figure 2.14 montre le partitionnement de l'espace en régions d'influence dans le cas d'un groupe spatial. Ces régions d'influence ne sont alors plus des cercles concentriques autour d'une entité spatiale. Le lien entre les entités spatiales et un groupe spatial peut être décrit aisément par un schéma UML (Unified Modelling Language) représenté par la figure 2.15.

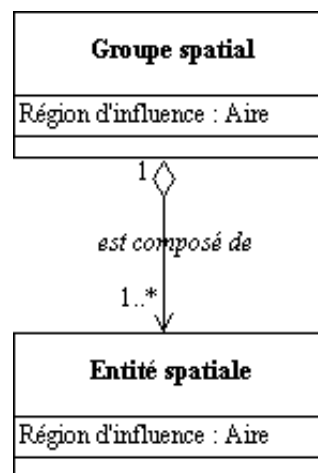


Figure 2.15 — Lien entre groupe spatial et entités spatiales.

Dans les deux sections suivantes nous allons appliquer et formaliser la démarche d'héritage des caractéristiques du groupe spatial pour les relations de proximité et d'orientation. Afin de faciliter la présentation de notre démarche, nous utilisons un partitionnement lié au domaine maritime avec un référent à vitesse nulle. Nous utilisons donc des partitionnements simplifiés, un pour les relations d'orientation et l'autre pour les relations de proximité. Le partitionnement de la figure 2.9 est utilisé ensuite en exemple pour illustrer notre propos.

2.4.1 Proximités de groupes spatiaux

Dans le cadre de la navigation maritime, la partition représentant les relations de proximité est contrainte par les critères de sécurité. Dans le but de maintenir les navires avec le plus de marge de manœuvre sur le plan de leur sécurité, ils doivent dans la plupart des cas anticiper leurs actions le plus tôt possible. Plus un navire est proche, plus la situation est défavorable pour le navire considéré. En conséquence, la relation de proximité d'un groupe spatial est définie par la relation qui positionne l'entité spatiale la plus proche du référent. Afin de tenir compte de ce critère, nous classons les régions d'influence selon une intensité d'appartenance.

Définition 9 Soit ZP une fonction qui indique l'intensité de la région d'influence du référent auquel une entité spatiale $e_i \in E$ appartient. Soit $Z(e_i)$ la région où est située e_i . Cette fonction est définie selon :

$$ZP : E \times E \longrightarrow \mathbb{N}$$

$$ZP(e_i, o) = \begin{cases} \alpha & \text{si } Z(e_i) \cap AP(o) \neq \emptyset \\ \beta & \text{si } Z(e_i) \cap AD(o) \neq \emptyset \wedge Z(e_i) \cap AP(o) = \emptyset \\ \gamma & \text{autrement} \end{cases} \quad (2.5)$$

Avec $\alpha > \beta > \gamma$ et $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{N}$. Pour chaque région d'influence d'une entité spatiale $e_i \in E$, il existe une unique valeur de l'intensité d'influence et pour chaque valeur d'intensité d'appartenance il existe une unique région d'influence d'une entité spatiale $e_i \in E$.

Définition 10 Soit $o \in E$ une entité référent et $G \subseteq E$ un groupe spatial, avec $o \notin G$. L'intensité d'appartenance de G par rapport à o est définie par la fonction $MaxFP(G, o)$:

$$MaxFP : E \times E \longrightarrow \mathbb{N}$$

$$MaxFP(G, o) = \max_{e_i \in G} (ZP(e_i, o)) \quad (2.6)$$

Où max est une fonction qui donne le maximum d'une liste de valeurs.

A partir de ces définitions, nous introduisons une règle qui permet de spécifier à partir de quelle région d'influence un groupe spatial d'entités spatiales va être perçu. Cette règle comporte trois cas orthogonaux qui reflètent le nombre de régions d'influence.

Règle 1 Soit un référent $o \in E$, un groupe spatial d'entités spatiales $G = \{e_1, \dots, e_n\}$, avec $o \notin G$. La région d'influence auquel le groupe spatial G appartient par rapport au référent o est notée $ZI(G, o)$

$$ZI(G, o) = \begin{cases} AL(o) & \text{si } MaxFP(G, o) = \gamma \\ AD(o) & \text{si } MaxFP(G, o) = \beta \\ AP(o) & \text{autrement} \end{cases} \quad (2.7)$$

Dans le cas où $MaxFP(G, o) = \gamma$. Remarquons que toutes les entités spatiales $e_i \in G$ se trouvent dans la région AL du référent o . Cette région est en effet considérée par l'observateur comme celle qui lui est la plus favorable. Il en résulte selon la règle 1 que si une entité spatiale du groupe spatial ne se trouve pas dans la région $AL(o)$ alors $MaxFP(G, o) \neq \gamma$.

La figure 2.16 illustre le cas où $MaxFP(G, o) = \beta$. Dans ce cas, au moins une des entités spatiales $e_i \in G$ se situe dans la région AD du référent $o \in E$. Cette région est plus défavorable que AL pour l'observateur, la perception de la proximité du groupe est celle de la région AD du référent o .

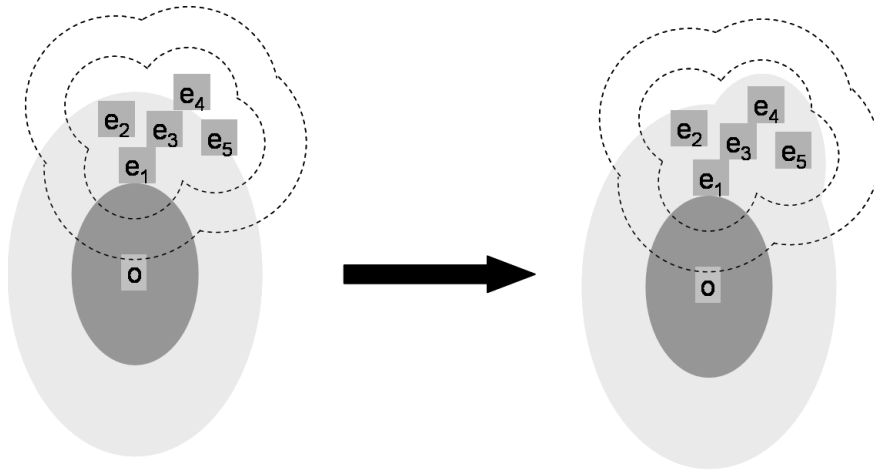


Figure 2.16 — Impact de la présence d'un groupe spatial sur la relation de proximité "distant" du référent.

La figure 2.17 expose le cas où $MaxFP(G, o) = \alpha$. Ce cas est similaire au précédent mais avec la région $AP(o)$. La présence d'entités spatiales dans la région $AP(o)$ est le plus défavorable pour le référent. Il perçoit la proximité du groupe spatial selon la région AP du référent o .

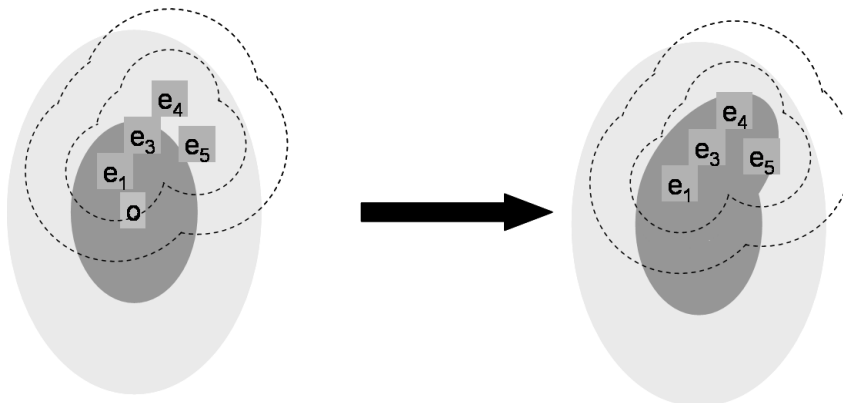


Figure 2.17 — Impact de la présence d'un groupe spatial sur la relation de proximité "proche" du référent.

En considérant le référent dans un espace accessible contraint, nous appliquons la démarche présentée au partitionnement établi pour le domaine maritime et illustré par la

figure 2.9.

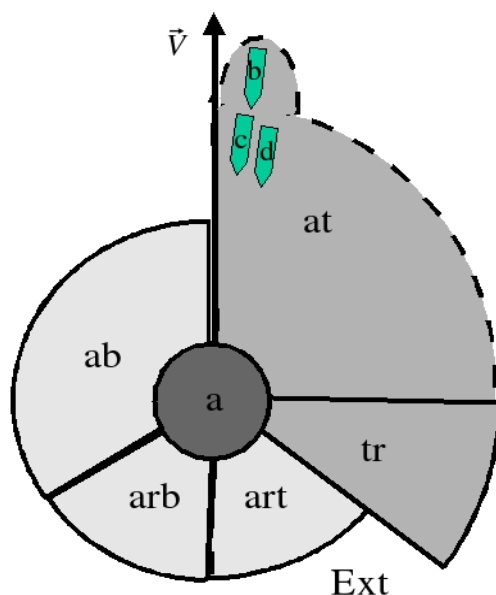


Figure 2.18 — Héritage de relations de proximité par la formation d'un groupe spatial.

La figure 2.18 présente un espace accessible contraint. Les navires c et d et le navire à situer b sont proches les uns des autres. Ils s'agrègent donc ensemble pour former un groupe spatial. Les navires c et d sont dans une position plus défavorable pour l'observateur que le navire à situer. De ce fait, l'observateur, par rapport au niveau d'abstraction du groupe va considérer que la relation de proximité caractérisant le navire à situer b est celle héritée de son groupe spatial.

2.4.2 Groupes spatiaux et orientations

Les modifications des relations d'orientation causées par la présence d'un groupe spatial se modélisent par analogie à celles engendrées pour les relations de proximité. La composante de sécurité prise en compte en navigation va nous aider à spécifier ces modifications. Les régions les plus défavorables pour le navire sont celles qui vont avoir les intensités d'appartenance les plus importantes. L'intensité d'appartenance de la région tribord, par exemple, qui privilégie les autres navires, est plus élevée que celle des autres régions d'orientation. Les navires proches les uns des autres s'agrègent pour constituer un groupe spatial. Comme pour les relations de proximité, si le groupe spatial est localisé entre plusieurs régions, toutes les entités spatiales du groupe spatial vont alors hériter de la région d'orientation offrant au navire le plus de sécurité. Les entités spatiales du groupe spatial héritent de la région qui possède la force d'appartenance du groupe spatial la plus importante.

Définition 11 Pour un référent $o \in E$, trois régions d'orientation $AA(o)$, $AT(o)$, $AB(o)$ qui forment une partition de l'espace sont définies selon :

- $AB(o)$ pour la relation bâbord;
- $AT(o)$ pour la relation tribord;
- $AA(o)$ pour la relation arrière.

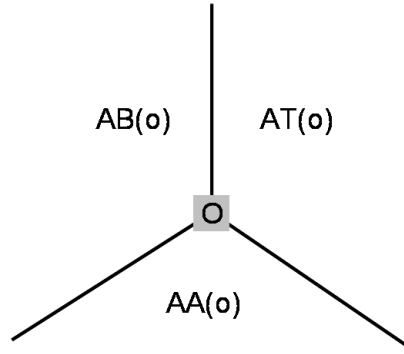


Figure 2.19 — Représentation des régions d'orientation.

La figure 2.19 présente les régions d'orientation d'une entité spatiale o , trois régions sont ici définies : les régions $AT(o)$, $AB(o)$ et $AA(o)$.

Définition 12 Soit ZO , une fonction qui indique l'intensité d'appartenance de la région d'orientation du référent auquel une entité spatiale $e_i \in E$ appartient. Soit $Z(e_i)$ la région où est située e_i . Cette fonction est définie selon :

$$E \times E \longrightarrow \mathbb{N}$$

$$ZO(e_i, o) = \begin{cases} \alpha & \text{si } Z(e_i) \cap AT(o) \neq \emptyset \\ \beta & \text{si } Z(e_i) \cap AA(o) \neq \emptyset \wedge Z(e_i) \cap AT(o) = \emptyset \\ \beta' & \text{autrement} \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec $\alpha > \beta = \beta'$ et $\alpha, \beta, \beta' \in \mathbb{N}$

Définition 13 Soit un référent $o \in E$, un groupe spatial $G = \{e_1, \dots, e_n\}$, avec $o \notin G$. L'intensité d'appartenance de la région d'orientation de G par rapport à o est définie par la fonction $MaxFO(G, o)$:

$$E \times E \longrightarrow \mathbb{N}$$

$$MaxFO(G, o) = \max_{e_i \in G} ZO(e_i, o) \quad (2.9)$$

Où max est une fonction qui calcule le maximum d'une liste de valeurs.

A partir de ces définitions, nous introduisons une règle qui permet de spécifier selon quelle région d'orientation l'appartenance d'un groupe spatial d'entités spatiales va être perçue. Cette règle compte quatre cas orthogonaux.

Règle 2 Soit un référent $o \in E$, un groupe spatial $G = \{e_1, \dots, e_n\}$, avec $o \notin G$. La région d'orientation auquel le groupe spatial appartient par rapport au référent est notée $RO(G, o)$.

$$RO(G, o) = \begin{cases} AT(o) & \text{si } MaxFO(G) = \alpha \\ AA(o) & \text{si } MaxFO(G) = \beta \wedge \forall e_i \in G, e_i \in AA(o) \\ AB(o) & \text{si } MaxFO(G) = \beta' \wedge \forall e_i \in G, e_i \in AB(o) \\ AB(o) \cap AA(o) & \text{autrement} \end{cases} \quad (2.10)$$

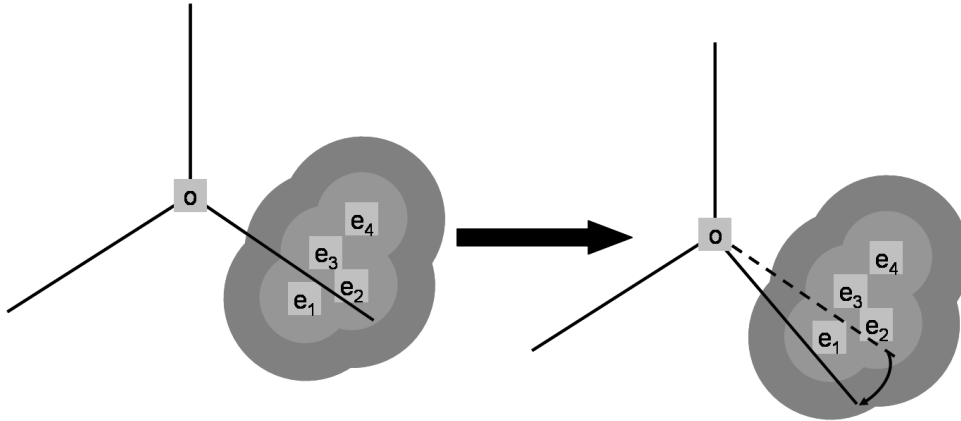


Figure 2.20 — Impact de la présence d'un groupe spatial orienté tribord et arrière.

La figure 2.20 montre un cas où $MaxFO(G) = \alpha$. Dans ce cas, les entités spatiales e_i du groupe spatial G sont positionnées soit dans la région d'orientation $AA(o)$, soit dans la région d'orientation $AT(o)$ du référent $o \in E$. La présence d'entités spatiales dans $AT(o)$ est cependant plus défavorable pour le référent que celles présentes dans $AA(o)$. Le référent (et observateur), en considérant les entités spatiales dans leur ensemble et non plus individuellement, va alors estimer que le groupe spatial possède une orientation relative perçue comme l'orientation la plus défavorable. Les entités spatiales vont alors hériter de cette orientation. Un cas similaire est observable pour la présence d'un groupe spatial positionné à la fois dans la région $AT(o)$ et $AB(o)$.

Dans le cas où des entités spatiales $e_i \in E$ forment un groupe spatial G réparti entre deux régions d'orientation. La présence d'entités spatiales dans l'une ou l'autre des régions n'est pas plus défavorable pour l'entité de référence. En conséquence, lorsque le référent considère les entités spatiales au niveau d'abstraction du groupe spatial, il réalise toujours une distinction entre les deux régions d'orientation, aucune n'ayant une intensité d'appartenance supérieure à l'autre.

Dans le cas où les entités spatiales $e_i \in E$ formant le groupe spatial G se trouvent uniquement dans la région $AA(o)$. Le groupe spatial est alors perçu comme se trouvant dans cette même région d'orientation. Il est possible d'observer des cas similaires pour les régions $AB(o)$ et $AT(o)$.

En considérant le référent dans un espace accessible contraint, appliquons la démarche présentée au partitionnement établi pour le domaine maritime par la figure 2.9.

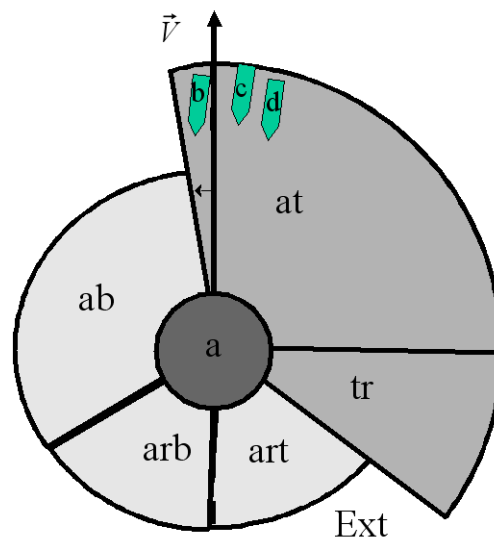


Figure 2.21 — Déformation de relations d'orientation par contraintes d'agrégation.

Le cas d'un espace accessible contraint est présenté par la figure 2.21. Dans cet environnement sont présents : le référent a , le navire à situer b qui se trouve dans un groupe spatial G aussi composé des navires c et d . Ce groupe existe par l'agrégation des navires proches les uns des autres. Le navire à situer se trouve alors dans une direction héritée de celle du groupe spatial, en l'occurrence le tribord avant du référent.

2.5 Discussion

Cette recherche montre que les partitionnements génériques des relations d'orientation et de proximité ne sont pas suffisants lors de leur application à un contexte particulier. Il est donc nécessaire de modifier en aval les partitionnements définissant ces relations en appliquant les contraintes spécifiques au contexte de l'application. Dans notre démarche, nous nous sommes attachés à modéliser les facteurs qualitatifs qui influencent directement la perception des relations spatiales et non les phénomènes physiques qui influencent directement le positionnement des navires dans leur milieu et la dynamique (ex : vents, courants et marées). Nous avons identifié plusieurs contraintes qui influencent les relations d'orientation et de proximité dans le cadre du domaine maritime. Ces contraintes, qualifiées de contextuelles, sont dérivées à partir de la dynamique du milieu, de la structure spatiale de l'espace environnant, des contraintes applicatives et de la perception de l'ensemble par un observateur. Ces contraintes sont identifiées à des niveaux de modélisation complémentaires : les entités spatiales au niveau désagrégé et les groupes spatiaux au niveau agrégé. Les contraintes modélisées sont orthogonales, ce qui permet leur combinaison et la mise à disposition d'un formalisme de raisonnement spatial flexible.

La possibilité de modifier les partitions génériques représentant les relations de proximité

et d'orientation donne à l'utilisation des règles de navigation une adaptabilité au milieu. En effet, dans un environnement en mouvement, la perception des règles de navigation a besoin de s'ajuster aux particularités du milieu afin de s'adapter aux situations que le navire rencontre. La modification du partitionnement permet à la fois de simplifier certaines situations, et d'éviter de gérer certaines situations inutiles. L'intégration des contraintes présente un avantage particulier lors de l'analyse de situations extrêmes de navigation à risque où les décisions prises par l'individu diffèrent de l'application stricte des règles de navigation. Dans ces situations, le chef de quart modifie implicitement, à cause de navires ou de barrières physiques rendant des espaces inaccessibles, les relations d'orientation et de proximité. C'est cette composante implicite dans le raisonnement de l'observateur que ce modèle s'attache à caractériser.

Au vu de notre recherche actuelle, il est impossible de déterminer si le contexte influence plus les relations d'orientation que celles de proximité. Les contraintes contextuelles présentées dans ce chapitre modifient généralement l'une ou l'autre de ces relations voire les deux, mais il semble cependant plus aisé de modifier cognitivement et formellement les relations de proximité. Les relations d'orientation forment des partitions plus fines de l'espace et possèdent des représentations différentes et multiples, ce qui les rend plus complexes à appréhender et à formaliser.

Si notre démarche est illustrée et formalisée à travers le support de la navigation maritime, les principes utilisés dans la prise en compte de l'influence du contexte peuvent s'appliquer à d'autres situations de perception de relations spatiales d'orientation et de proximité. Plusieurs critères cognitifs à caractère objectif ou subjectif peuvent aussi prendre part aux choix d'agrégation des navires pour former un groupe spatial tels que les différences sémantiques (ex : de catégorie) et les différences physiques (ex : de forme et de taille) entre les navires ainsi que des contraintes extérieures comme l'aspect sécurité que nous avons utilisé. Si nous retenons l'exemple de la navigation de véhicules en milieu urbain, l'environnement est fortement contraint par l'architecture urbaine qui influence grandement l'environnement perçu, les corridors accessibles aux véhicules, et les règles de conduite. La constitution de groupe spatiaux agrégés répondra ici vraisemblablement à d'autres logiques liées en particulier aux phénomènes de trafic urbain. Il sera alors nécessaire de raffiner la notion de groupe spatial qui est adapté au cadre de la navigation maritime où généralement les groupes spatiaux sont constitués de relativement peu d'entités spatiales et sont donc peu étendus dans l'espace.

Cette méthode de raisonnement rencontre cependant des limites lorsque le groupe spatial est constitué de nombreuses entités spatiales. Les modifications des relations de proximité et d'orientation peuvent alors être trop importante pour être utilisable de manière intuitive pour un être humain. Ces limites correspondent d'ailleurs à celles rencontrées lors de l'application des règles usuelles de navigation maritime. Dans les cas limites difficilement solvables, il est délicat d'appliquer les règles de navigation maritime. D'autres stratégies, plus empiriques, telles que l'attente sont nécessaires pour les résoudre. Ces cas sont très rares en navigation maritime et peuvent être résolus par des comportements et des décisions adaptés à la situation

et l'expérience du marin.

2.6 Conclusion

Le développement récent de modèles formels de raisonnement spatial qualitatif ouvre de nombreuses perspectives pour les applications de représentation et de simulation de phénomènes géographiques dynamiques. Ces perspectives s'accompagnent cependant de nouveaux besoins d'adaptation des mécanismes de raisonnement aux particularités applicatives. La recherche présentée dans ce chapitre apporte une réponse basée sur un principe de modélisation contextuelle, où les caractéristiques du domaine applicatif conditionnent l'application des mécanismes de raisonnement de la navigation maritime.

Ces concepts identifiés sont catégorisés à plusieurs niveaux d'abstraction : le niveau des entités spatiales et celui du groupe spatial. Les contraintes identifiées au niveau d'abstraction désagrégée de l'entité spatiale concernent des modificateurs centrés soit sur le référent comme ses actions, ses déplacements et son niveau de perception associé, soit sur des éléments externes au référent comme les règlements, les usages et les barrières. Les modifications des relations d'orientation et de proximité dues à la vitesse des entités spatiales sont formalisées par la modification des rayons définissant les régions de ces relations. Les règlements et les règles de navigation du domaine maritime modifient la partition de l'espace. La composante de perception entraîne l'introduction d'un concept de barrière qui modifie le partitionnement représentant les relations d'orientation et de proximité en réalisant une différence entre les régions utiles du partitionnement et les régions de l'espace inaccessibles au référent.

A un niveau d'abstraction supérieur, des contraintes impliquant des modifications des relations d'orientation et de proximité apparaissent lors de la formation de groupes spatiaux. Ces modifications sont formalisées par une agrégation des propriétés de positionnement locales au niveau supérieur, avec le choix dans notre démarche, d'un critère de conservation des propriétés les plus défavorables tant pour les relations de proximité que celles d'orientation. Un principe d'héritage de caractéristiques entre le groupe spatial et les entités spatiales complète cette approche en permettant la rediffusion des propriétés du groupe spatial au niveau des entités spatiales locales. La relation d'orientation et de proximité la plus remarquable est désignée par le référent comme étant celle du groupe. L'aspect sécurité est l'élément le plus important en navigation maritime, c'est donc cette composante qui détermine la relation d'orientation et de proximité d'un groupe spatial de navire perçu par le référent.

Prendre en compte le contexte dans la modélisation et la perception des relations spatiales en navigation maritime peut donner des indications utiles à une meilleure analyse des situations conflictuelles et des incidents. L'un des problèmes posés est celui de la façon dont les règles standard de navigation maritime sont appliquées. Dans ces cas, les différentes influences contextuelles que nous avons caractérisées montrent des pistes d'analyses de ces situations et de leurs configurations spatiales et temporelles. L'objectif n'étant pas de proposer une modification des règles de navigation mais plus généralement de caractériser les cas où leur

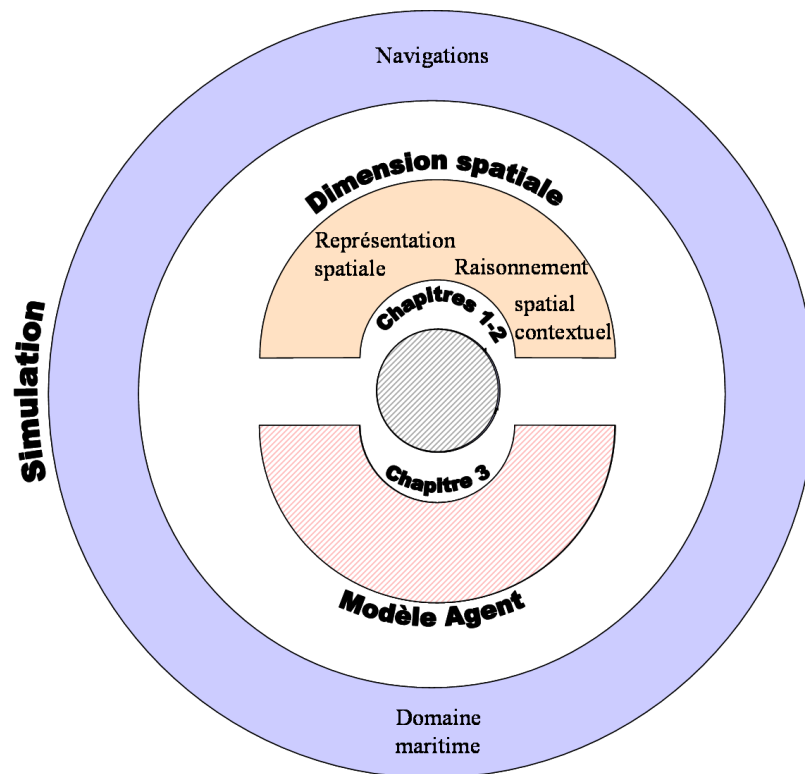


Figure 2.22 — Rappel des concepts développés aux chapitre 1 et chapitre 2.

perception diverge de leur normalisation.

Ce modèle de raisonnement contextuel est intégré au sein de la plate-forme multi-agents TRANS (c.f. chapitre 4). Les agents "navires" modélisés ont ainsi la capacité de raisonner dans l'espace en utilisant un partitionnement contextuel adaptable qui leur permet de détecter et de réagir aux risques de collision qu'ils peuvent rencontrer. Nous avons désormais déterminé les éléments qui composent la dimension spatiale (figure 2.22). Il nous faut maintenant spécifier le modèle agent utilisé. Ensuite, il est nécessaire de définir la place qu'occupe l'environnement en son sein et comment le modéliser.

Modèle agent à base de rôles

Simuler les comportements et la dynamique des mouvements des navires sont des outils nécessaires à une meilleure compréhension et planification des activités, en temps réel ou différé, de navigations maritimes. Les modèles multi-agents basés sur la notion de rôle proposent un cadre potentiellement pertinent pour modéliser ces phénomènes en raison de leurs caractères adaptatifs et flexibles. Cette flexibilité devrait permettre la modélisation de comportements changeants, propriétés mises en évidence par la nature contextuelle des actions des navires dans l'espace, et la dimension fonctionnelle qui représente le type d'action qu'un navire exécute à un instant donné. Si ces modèles sont essentiellement définis à partir des concepts d'agent, de rôle et de groupe, plusieurs stratégies sont actuellement spécifiées au sein de ces modèles pour prendre en compte les composantes de modélisation, de gestion d'acquisition et de résolution de conflits des rôles. Elles expriment la dynamique des changements de comportements des agents au sein d'un système.

L'objectif de ce chapitre est multiple. À partir d'une motivation de l'approche et d'un état de l'art des modèles multi-agents à base de rôle, nous analysons les potentialités de ces systèmes pour construire un modèle multi-agents à base de rôle orienté vers la description de la dynamique d'un système de navigations maritimes. Ce chapitre s'articule autour de cinq sections. La première section expose les motivations des méthodes multi-agents basées sur les paradigmes de rôle et de groupe. La seconde section introduit un état de l'art de ces modèles et, notamment les mécanismes liés à la gestion des rôles. La troisième section propose, à partir de l'analyse réalisée à la section précédente, un nouveau modèle multi-agents à base de rôles adapté au contexte de la navigation maritime. La quatrième section expérimente ce modèle au domaine de la navigation maritime. La dernière section de ce chapitre résume les propriétés de ce modèle et discute de ses potentialités.

3.1 Agents, groupes et rôles : motivation

Dans le domaine maritime, les entités spatiales, comme les navires, sont souvent hétérogènes, du point de vue de leurs propriétés, et possèdent donc naturellement des com-

portements différents. Ces comportements ne sont pas figés et évoluent suivant les situations. Par exemple, si un navire se retrouve en difficulté, d'autres navires dans la même zone modifient alors leurs comportements et viennent à son secours. Dans ce cas, les navires changent de comportement en choisissant de devenir exclusivement des sauveteurs, et délaissent leurs activités précédentes. Pour coordonner leurs actions, dans le cas des sauveteurs par exemple, les navires doivent également s'organiser pour être plus efficaces. Il est alors nécessaire pour les navires de s'organiser dynamiquement en différents groupes, selon divers critères. Ces critères sont de plusieurs ordres. Les critères spatiaux, comme la proximité, vont ainsi être la source de formation de groupes spatiaux. Des entités spatiales proches vont former des groupes spatiaux afin de spécifier ainsi leur appartenance à une région spatiale commune. La formation de tels groupes est formalisée dans le chapitre précédent. D'autres critères prennent aussi part à la formation de groupes. Ils concernent, par exemple, la volonté d'arriver à un but commun comme dans le cas des sauveteurs, l'appartenance à une même structure sociale, et des similarités de comportement. Flexibilité dans le comportement, organisation et impact sur la spatialisation des agents sont donc les deux composantes que nous allons aborder. Il est alors primordial d'introduire dans le système multi-agents utilisé pour modéliser la navigation maritime, les notions de :

- Comportement ;
- Changement de comportement ;
- Environnement ;
- Organisation.

Les modèles multi-agents les plus appropriés pour ce type d'objectif sont les modèles organisationnels basés sur le paradigme de rôle : les modèles basés sur les notions d'Agent, de Groupe, et de Rôle (AGR). Dans ces modèles, les rôles sont vus comme des parties composant le comportement de l'agent, le structurant en autant d'éléments constituant le comportement global. Le changement d'un de ces éléments, au cours de la vie de l'agent, modifie alors partiellement ou totalement son comportement. Ces modèles définissent des organisations ou groupes qui structurent les agents et leurs interactions.

3.2 Modèles agents à base de rôles (AGR) : état de l'art

Il apparaît dans la communauté multi-agents plusieurs méthodes d'analyse et de conception associées généralement à des plates-formes multi-agents dont le paradigme commun est l'utilisation des rôles et la présence de groupes. Notons que ces méthodes ne sont généralement pas dédiées à une application particulière comme les systèmes multi-agents que nous avons pu voir lors du chapitre 1. Ce paradigme est apparu au milieu des années quatre vingt dix avec les travaux de [Collinot *et al.*, 1996]. La motivation initiale de ces travaux portait sur l'objectif de pallier les déficiences conceptuelles existantes pour exprimer la modélisation d'une tâche collective par des comportements individuels. Le véritable essor de ce paradigme intervient plus récemment avec les travaux de

[Wooldridge *et al.*, 2000, Hilaire, 2000, Hannoun *et al.*, 2000, Dury, 2000, Gutknecht, 2001] qui posent les principes de base de ces modèles utilisant le paradigme de rôle. Les travaux de [Querrec, 2002, Amiguet, 2003, Odell *et al.*, 2003, Abrami, 2004] abordent par la suite une phase de consolidation et d'amélioration de ces modèles. Cette section réalise un état de l'art de ces modèles et de ces plates-formes multi-agents basés sur les rôles. Nous n'étudierons toutefois pas [Abrami, 2004, Odell *et al.*, 2003] qui sont très proches d'AALAA-DIN [Gutknecht, 2001] et de MOCA [Amiguet, 2003], ni [Collinot *et al.*, 1996] qui par rapport aux points que nous souhaitons étudier est similaire à [Wooldridge *et al.*, 2000, Hilaire, 2000]. Lors de notre étude, nous nous attardons sur les points suivants :

- **La gestion et les contraintes d'acquisition des rôles.** Tout agent a la possibilité d'acquérir dynamiquement différents rôles au cours de sa "vie". Cette acquisition nécessite de la part des agents de respecter des pré-requis. Chaque modèle agent fournit ou non des pré-requis pour obtenir des rôles sous différentes formes tels que la compatibilité entre deux rôles, ou le nombre de fois qu'un rôle est joué par des agents.
- **La gestion des conflits entre les rôles.** Les agents jouent plusieurs rôles de manière simultanée. Des conflits entre ces rôles sont alors susceptibles de survenir que ce soit concernant les objectifs à atteindre, les capacités et les ressources utilisées ou bien encore de manière plus globale.
- **La gestion des capacités.** Les agents bénéficient de capacités qui expriment leurs moyens d'interaction et d'actions. Ces capacités concernent notamment, l'envoi de messages et leurs déplacements dans l'environnement. Trois choix s'offrent lors de la conception du modèle pour définir l'appartenance des capacités : uniquement l'agent, uniquement le rôle et à la fois l'agent et le rôle ;
- **La présence au niveau conceptuel de la notion d'environnement.** L'existence d'un environnement est importante pour un système multi-agents et encore plus primordial pour la simulation multi-agents [Odell *et al.*, 2002, Klügl *et al.*, 2005]. Il est le support des actions et de la perception des agents. Il définit les lois que les agents vont devoir suivre et ainsi contraint leurs possibilités d'actions (Un navire ne peut pas, par exemple, se mouvoir sur la terre ferme). Les AGR ont des politiques très disparates en ce qui concerne la gestion de l'environnement. Cette politique va de l'absence d'environnement à une modélisation complète de celui-ci. Plusieurs possibilités de modélisation de l'environnement s'offrent au concepteur :
 - Un modèle centralisé et global défini par des lois appliquées à tous les agents sans tenir compte de leur positionnement ;
 - Un modèle décentralisé et local à une région de l'environnement. Un agent qui change de région est aussi susceptible de changer de loi (les lois de déplacements ne sont par exemple pas les mêmes sur terre et sur mer) ;
 - Une combinaison des deux. Certaines lois sont globales à l'environnement et d'autres locales à une région de celui-ci.

- **La correspondance entre le modèle et son implémentation.** Elle indique d'une part si le modèle conceptuel est implémenté, et d'autre part si cette implémentation reprend strictement les concepts développés dans le modèle.

Ces points sont essentiels lors de l'utilisation d'un système multi-agents pour la simulation, et en particulier pour la simulation de navigations maritimes. L'environnement étant dynamique, les comportements des entités présentes dans la simulation doivent aussi pouvoir évoluer et même gérer plusieurs rôles en simultané. C'est pourquoi, une gestion des conflits possibles et des mécanismes d'acquisitions des rôles sont deux conséquences fondamentales pour l'étude du modèle, tant d'un point de vue de la mise en œuvre de celui-ci que de celle de son intialisation. De même, la gestion des capacités qui encadrent le comportement des agents, est primordiale pour des systèmes multi-agents où les agents sont hétérogènes.

3.2.1 GAIA

[Wooldridge *et al.*, 2000] définissent une méthodologie, nommée GAIA, pour l'analyse et la conception orientées agent et en particulier pour des applications à large échelle. Cette méthodologie est conçue, comme l'illustre la figure 3.1, à partir d'une architecture en deux couches qui spécifient ce dont le système a besoin. La première couche représente le processus d'analyse et la deuxième la phase de conception. Le processus d'analyse est lui-même scindé en deux phases appelées respectivement phase de définition des rôles (roles model) et phase de définition des interactions (interactions model). **Un rôle est défini comme une description abstraite de la fonction qu'une entité peut avoir au sein d'un système.** Chaque rôle est décrit par :

- Des permissions qui identifient les ressources que le rôle a la possibilité d'utiliser ;
- Des responsabilités qui définissent les fonctionnalités du rôle, et donc ce qu'il est capable de réaliser ;
- Des protocoles qui symbolisent les interactions entre les rôles. Ils sont conçus dans la phase de définition des interactions.

La couche de conception est découpée en trois modèles : celui des agents (agent model), celui des services (services model) et celui des accointances¹ (acquaintance model). Elle est définie à partir de la couche précédente. La phase qui définit le modèle agent, est réalisée par l'agrégation des rôles pour former les agents. L'agent possède ainsi les permissions, les responsabilités et les protocoles de chacun des rôles agrégés. Les services correspondent aux fonctions des agents, ils dérivent directement des responsabilités en spécifiant plus précisément les entrées (ce dont le service à besoin), les sorties (ce dont le service produit), les pré-conditions et les post-conditions (les contraintes liées à l'utilisation du service). Enfin, les accointances déterminent par des graphes, les voies de communications possibles entre les agents en s'appuyant principalement sur les protocoles.

¹Les accointances regroupent l'ensemble des agents dont il a connaissance et avec qui il va interagir

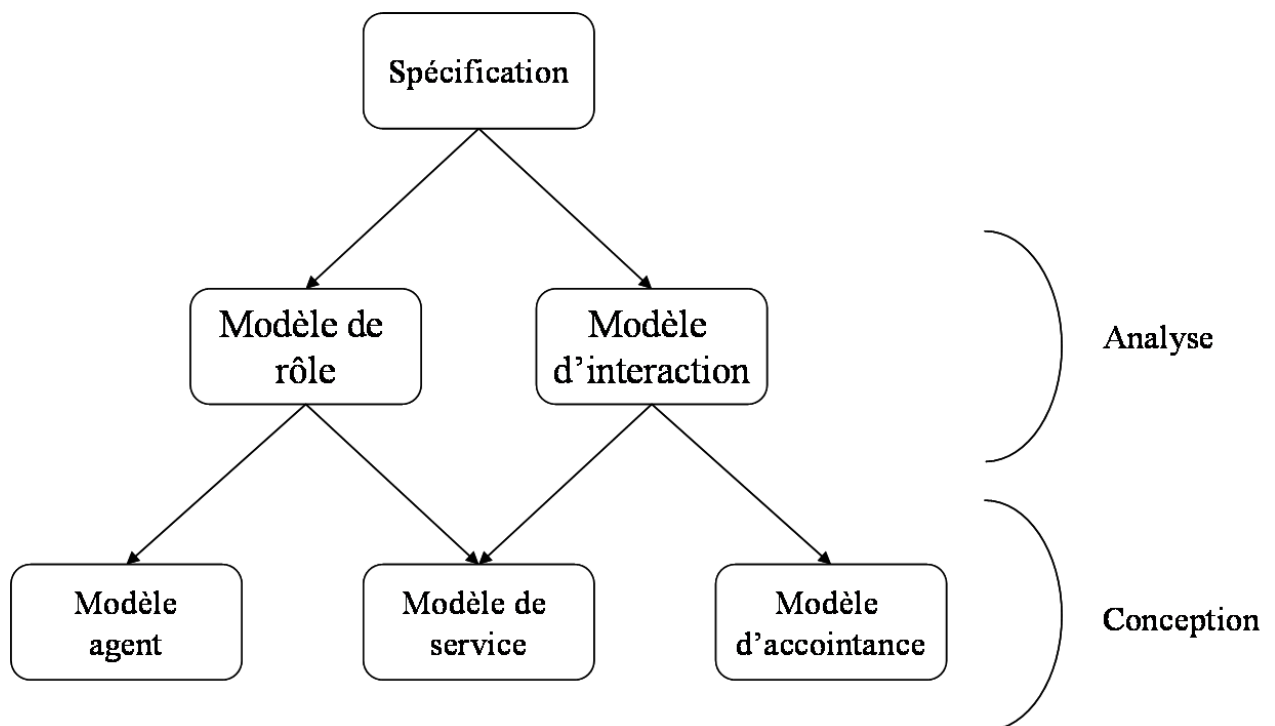


Figure 3.1 — Relations entre les différents modèles de la méthodologie.

La méthodologie GAIA est généraliste et permet de créer un modèle agent complet en spécifiant étape par étape, les besoins du concepteur. Cette méthodologie guide le concepteur durant les phases d'analyse et de conception sans aller jusqu'à la phase d'implémentation. L'accent est essentiellement mis sur une définition fonctionnelle des rôles et sur le réseau d'accountances qui découle des interactions possibles entre les rôles. Malgré quelques précisions comme le nombre d'agents et leur modélisation par des processus de type UNIX, les auteurs n'ont délibérément pas associé à leur méthodologie un niveau d'implémentation. Il existe donc un certain flou entre le dernier niveau de leur méthodologie et le niveau d'implémentation. Leurs concepts peuvent donc se traduire de différentes façons selon le langage utilisé.

La notion de rôle est uniquement utilisée lors de la phase d'analyse et disparaît ensuite lors de la phase de conception. De ce fait, les rôles ne peuvent pas apparaître dans la phase d'implémentation. Tout mécanisme de changement de rôles au cours de l'exécution de l'application est donc impossible. La notion d'organisation est définie implicitement par le réseau d'accountances mais mériterait, comme les auteurs le spécifient eux-mêmes, une définition explicite pour mieux spécifier l'architecture de l'organisation. Aucune notion d'environnement n'est présente quelle que soit la couche.

3.2.2 MODELE HILAIRE

Le modèle développé par [Hilaire, 2000] a pour but de réaliser des spécifications formelles de systèmes multi-agents dont les entités mettent en œuvre des rôles et leurs interactions. Ce

modèle est composé de trois concepts :

- Les rôles qui représentent **l'abstraction d'un comportement commun à un ensemble d'entités**. Un rôle est une unité cohérente de services, de fonctionnalités et de caractéristiques.
- Les interactions qui sont les uniques liaisons de communication entre les rôles. Les communications expriment tous les types d'action qu'un agent effectue envers un autre agent tels que les échanges de données et le partage de ressources.
- Les organisations qui sont définies par un ensemble de rôles et d'interactions dans un contexte commun.

Les interactions avec l'environnement sont symbolisées par la notion de rôle environnemental. Ces rôles particuliers permettent de faire interagir les rôles avec des parties de l'environnement. Ainsi, la dynamique temporelle, qui n'est pas interne aux rôles mais fait partie de l'environnement, est modélisée par un rôle environnemental. Les rôles, à la manière des classes pour le paradigme objet, sont capables d'hériter de rôles plus abstraits. Ce modèle est spécifié dans un formalisme à base d'Object-Z [Smith, 2000] et de diagramme d'états. Il ne possède cependant pas d'implémentation.

L'apport de ce modèle se situe dans l'utilisation de l'expression du formalisme qui est complet et relativement aisé à manipuler et à comprendre. A contrario, l'organisation n'est pas modifiable dynamiquement, et les agents ne sont pas capables de changer de rôles. Les agents sont uniquement considérés comme les réceptacles des rôles. Un agent est capable de jouer plusieurs rôles de manière simultanée, mais aucun mécanisme n'est présent pour garantir l'absence de conflits.

3.2.3 MOISE

[Hannoun *et al.*, 2000] propose le modèle MOISE (Model of Organization for multiAgent SystEms) pour permettre de structurer les comportements sociaux dans un SMA et de modéliser des organisations complexes. Ce modèle est défini selon une architecture composée de trois niveaux :

- Le niveau individuel qui est composé des agents et des tâches dont un agent est responsable à travers le concept de rôle. Un rôle spécifie **l'ensemble des activités qu'un agent peut réaliser dans une organisation**. Lorsqu'un agent joue un rôle, il réalise l'ensemble des actions qui sont associées à ce rôle. Chaque mission est composée de buts, de sous-buts et de plans. Pour atteindre les buts fixés, des actions sont utilisées à travers les plans et nécessitent des ressources pour les effectuer. Les plans sont des graphes orientés où les sommets sont les actions et les sous-buts, et où les arcs décrivent les transitions possibles entre ces actions et ces sous-buts ;
- Le niveau agrégé qui représente la formation d'agrégat d'agents grâce au concept de groupe. Les groupes sont définis par un ensemble de rôles, un ensemble de missions et un ensemble de liens organisationnels. Cet ensemble est un sous-ensemble des liens

pour lesquels le rôle source de l'interaction et le rôle cible de l'interaction appartiennent à l'ensemble des rôles du groupe. Les trois niveaux sont rassemblés pour former une structure organisationnelle composée d'un ensemble de rôles, d'un ensemble de liens organisationnels et d'un ensemble de groupes ;

- Le niveau sociétal qui est modélisé par les liens organisationnels entre les agents. Un lien organisationnel correspond à une jonction entre deux rôles. Un ensemble de contraintes, définissant par exemple le protocole utilisé, peut être associé à ces liens. Ces liens sont de différentes natures, il en existe trois types :
 - Les liens de communication qui symbolisent des échanges d'information possibles entre deux rôles ;
 - Les liens hiérarchiques qui définissent les relations hiérarchiques entre les rôles et principalement les subordinations lors de la réalisation de missions ;
 - Les liens d'accointances qui représentent les connaissances qu'un agent possède des autres agents.

MOISE+ [Hübner *et al.*, 2002] enrichit ce modèle implémenté en JAVA en y ajoutant :

- L'héritage entre les rôles au sens orienté objet du terme ;
- La notion de groupe récursif. Un groupe peut en contenir d'autres ;
- La notion de compatibilité entre rôles et celle de cardinalité. Un rôle ne peut être joué qu'un certain nombre de fois et deux rôles doivent être compatibles pour être joués simultanément ;
- Les concepts de permission et d'obligation qu'ont les agents sur leur mission. Une permission donne à un agent la possibilité de réaliser une mission d'un rôle pendant un intervalle de temps déterminé. Une obligation force un agent à effectuer la mission dans l'intervalle de temps donné.

Le modèle MOISE et son extension MOISE+ apportent un cadre flexible de modélisation formé autour des concepts de rôles, de liens organisationnels, de groupes, et permettent la spécification d'organisations complexes. Les agents n'effectuent des actions qu'à travers des missions qu'ils prennent via des rôles. L'architecture qui définit les rôles autour des missions ne permet pas cependant l'expression d'agents moins cognitifs². De tels agents agissent en effet plus dans une optique de stimulus/réponses que de planification des actions à entreprendre pour atteindre un but particulier. Le modèle dans sa version MOISE+ possède deux contraintes d'acquisition des rôles par les agents : une contrainte de compatibilité et une contrainte de cardinalité. Ces contraintes ne permettent pas notamment de modéliser les rôles pour lesquels l'agent doit se consacrer de manière exclusive en abandonnant les missions qu'il effectuait jusqu'alors. Le modèle donne la possibilité d'acquérir plusieurs rôles simultanément. Par contre, il ne donne aucun moyen de gestion des conflits entre les rôles si leurs objectifs sont antagonistes. Il est possible d'associer la notion de structure organisationnelle à celle d'environnement.

²Un agent cognitif est un agent qui possède une capacité de raisonnement complexe

3.2.4 AALAADIN

Le modèle AALAADIN est un modèle AGR généraliste développé pour la création de systèmes complexes [Gutknecht, 2001]. Ce modèle, comme le montre la figure 3.2, est basé sur les concepts d'agents, de groupes et de rôles et permet la description d'organisations. Ces concepts sont définis selon les modalités suivantes :

- Dans AALAADIN aucun formalisme ne définit la notion d'agent. L'agent est seulement perçu comme une entité communicante qui joue des rôles dans des groupes. Le concepteur a alors la possibilité de choisir le formalisme qui lui semble le plus approprié pour définir ses agents en fonction des objectifs de son application. Un agent est capable d'appartenir à plusieurs groupes, d'en créer, d'adhérer à des groupes existant et de les quitter.
- Un groupe est un ensemble d'agents en relation, et qui partagent un élément en commun comme par exemple le même métier. Dans un groupe, un agent doit jouer un rôle qui constitue une partie de son comportement.
- Un rôle est **la représentation abstraite d'une fonction et d'une interaction dans un groupe**. Il permet aussi d'identifier un agent au sein d'un groupe particulier. Chaque agent a la possibilité de jouer plusieurs rôles simultanément dans le même groupe ou dans des groupes différents.

Le modèle AALAADIN est implémenté dans la plate-forme MADKIT qui utilise le langage JAVA.

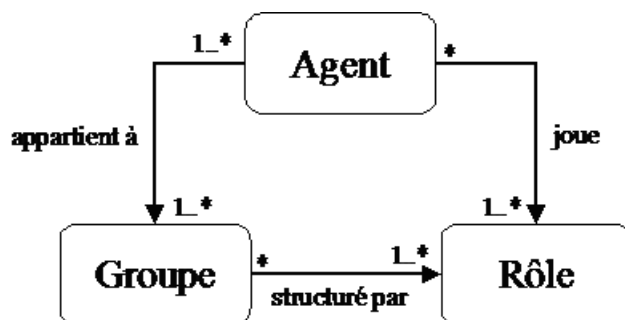


Figure 3.2 — Architecture principale de la méthodologie AALAADIN.

Le modèle AALAADIN est un modèle générique, donnant au concepteur un cadre méthodologique, en le laissant suffisamment libre pour exprimer au mieux les besoins particuliers de son application. Les concepts que sont les agents, les groupes et les rôles sont exprimés dans le modèle comme étant des classes au sens orienté objet. Or, les concepts de groupe et de rôle sont seulement traduits au niveau de l'implémentation par une étiquette. La richesse du niveau conceptuel n'est donc pas traduite au niveau implémentation. Les rôles étant gérés comme des étiquettes, les agents bénéficient de toutes les fonctionnalités liées aux rôles qu'ils sont capables de jouer, même si ceux-ci n'en ont pas besoin. De ce fait, aucune gestion des conflits entre rôles n'a été implémentée. En outre, le niveau conceptuel n'exprime pas

de contrainte à l'acquisition. L'auteur propose cependant quelques exemples de contraintes comme la possession de certaines compétences ou le nombre d'agents pouvant jouer des rôles dans un groupe.

3.2.5 MASCARET

Le modèle MASCARET (MultiAgent System for Collaborative and Adaptive Realistic Environment for Training) est un modèle défini pour la création d'environnement virtuel de formation [Querrec, 2002]. Il s'inspire du modèle AALAADIN. Ce modèle est basé sur quatre concepts dont la figure 3.3 expose le diagramme UML (Unified Modelling Language). Ces concepts sont :

- L'organisation qui est composée d'un ensemble d'agents et d'un ensemble de rôles. Elle fournit le cadre des interactions des agents la composant ;
- Les rôles qui désignent **les responsabilités des agents dans l'organisation**. Ces responsabilités sont définies par des éléments de comportement ;
- Les agents qui réalisent des interactions et dont les comportements sont contraints par les rôles qu'ils jouent ;
- Les éléments de comportement qui sont les briques élémentaires de l'exécution des rôles. Ces éléments de comportement utilisent les capacités de l'agent pour lui fournir le comportement lié au rôle.

Du point de vue contrainte d'acquisition, chaque agent doit posséder les pré-requis nécessaire en terme d'attributs et de fonctions obligatoires à l'exécution du rôle qu'il compte jouer. Certains rôles sont joués un nombre limité de fois. Une contrainte associée à chaque rôle permet donc de savoir si ce nombre a été atteint. L'implémentation du modèle se fait en utilisant la plate-forme AREVI/ORIS [Reignier *et al.*, 1998, Harrouet *et al.*, 2002] et respecte le modèle conceptuel.

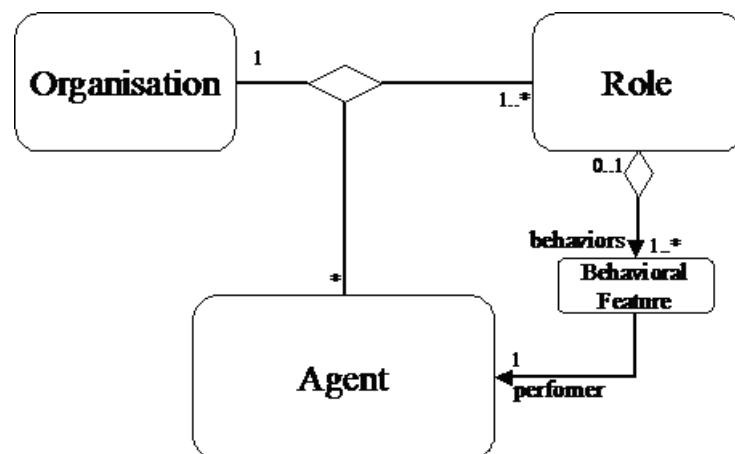


Figure 3.3 — Diagramme UML de la méthodologie MASCARET.

MASCARET apporte plusieurs modifications intéressantes du modèle AALAADIN qu'il enrichit par notamment l'ajout de pré-requis pour l'obtention de rôles. Contrairement à AALAADIN, les rôles sont définis comme des classes, au sens orienté objet. Néanmoins, les agents doivent posséder préalablement toutes les fonctions dont les rôles vont avoir besoin. Cependant, ces fonctionnalités sont alors uniquement utilisées lorsqu'ils jouent un rôle spécifique pour respecter ces pré-requis. Excepté les pré-requis qui sont là pour vérifier si un agent a les fonctionnalités requises pour jouer un rôle, une seule autre contrainte concerne l'acquisition des rôles. Elle spécifie le nombre d'agents qui peuvent jouer un même rôle. Il n'existe pas de gestion de conflit entre des rôles joués simultanément. Par contre, lors de la planification des actions d'un ensemble d'agents, les conflits entre ces actions sont gérés grâce à la logique temporelle d'Allen [Allen, 1983].

3.2.6 OPERA

Le modèle nommé OPERA (OPERationnalisation d'inteRActions) est basé sur la gestion des interactions [Dury, 2000]. Quatre notions sont nécessaires pour décrire cette gestion :

- Les interactions correspondent à l'endossement par un certain nombre d'agents d'un rôle pendant un intervalle de temps.
- Les rôles sont des **couples composés d'une situation déclenchante et d'un modèle de comportement**. Ce modèle est un protocole d'actions activant les effecteurs³ dont l'agent est doté.
- Les situations déclenchantes correspondent à un ensemble de perceptions que l'agent reçoit via ses senseurs.
- Les protocoles d'actions sont des arbres binaires d'actions qui définissent les choix à appliquer lors de l'échec ou de la réussite d'une action.

Les conflits entre les rôles sont gérés à l'aide d'une pile de comportements. Si une situation déclenche un comportement prioritaire, les comportements en cours sont momentanément interrompus. Ils sont alors stockés dans la pile de comportements. Une fois le comportement prioritaire achevé les comportements stockés sont dépilés en commençant par le plus prioritaire. Dans OPERA, l'environnement est le réceptacle des lois du monde qui vont décider du succès ou de l'échec des actions des agents. Ce modèle a été implémenté en utilisant le langage JAVA.

Opéra est conçu pour fournir un modèle générique d'interactions dans un système. L'acquisition d'un rôle est uniquement contrainte par la situation déclenchante associée. L'agent n'a alors pas la possibilité de décider s'il souhaite jouer ce rôle ou non. Les rôles ne durent alors que le temps d'effectuer les actions liées à celui-ci. La gestion des conflits est réalisée par une pile. Ce type de gestion pose des problèmes de temps d'attente. Des comportements très peu

³Terme qui provient de la robotique et qui spécifie les actions que l'agent peut entreprendre sur l'environnement. L'environnement est perçu par des senseurs.

prioritaires, par exemple, peuvent ainsi être activés très longtemps après leur déclenchement, et peuvent ainsi devenir caduque si la situation n'est plus pertinente.

3.2.7 MOCA

Le modèle nommé MOCA (Model of Organizations Centered on Agents) dont le but est la modélisation d'organisation, se décompose en deux niveaux qui séparent la partie conceptuelle de la partie implémentation [Amiguet, 2003]. Il existe une correspondance directe entre les concepts présentés à ces deux niveaux. Nous les présentons donc simultanément. Comme l'illustre la figure 3.4, ces concepts sont répartis selon deux critères orthogonaux. Ils correspondent à la partie interne d'un agent et à la partie externe de celui-ci. La partie interne décrit les compétences de l'agent. La partie externe décrit les relations de l'agent avec l'extérieur (ex : relation entre agents, relation avec l'organisation). Ces concepts sont au nombre de six :

- Organisations/groupes qui sont vus comme des graphes de rôles où les arcs entre les nœuds correspondent aux interactions entre les rôles. L'organisation est instanciée en groupe qui contient un ensemble d'agents interagissant à travers leurs rôles ;
- Relations/acointances distinguent les liens entre les rôles dans une organisation. Ces liens schématisent les interactions entre les agents. Du point de vue de l'implémentation, un agent ne peut être en accointance avec un autre agent uniquement si une relation existe entre deux rôles respectivement joués par ces agents ;
- Types d'influence/influences est un terme générique qui spécifie tous les types d'interaction qu'un agent peut avoir avec un autre agent, tel que l'échange de message par acte de langage ou l'application de forces physiques d'un agent sur un autre ;
- Descriptions de rôle/rôles qui spécifient **les patrons récurrents de comportement individuel dans une organisation**. Les rôles réalisent l'interface entre l'aspect interne de l'agent et les aspects externes. C'est en effet à travers un rôle et les liens qu'il possède qu'un agent va pouvoir interagir avec d'autres agents ;
- Descriptions de compétence/compétences qui sont les spécifications des services qu'un agent possède ou qu'un rôle peut fournir à l'agent qui le joue ;
- Types d'agent/agents qui correspondent à la description des agents du système. Ils sont capables d'instancier de nouveaux groupes, d'acquérir de nouveaux rôles et de perdre des rôles.

Afin de pouvoir jouer un rôle, un agent doit détenir un certain nombre de compétences pré-requises. Un rôle joué par un agent lui fournit des compétences supplémentaires augmentant d'autant ses compétences. Les agents sont ainsi capables de jouer plusieurs rôles simultanément. La résolution des conflits entre ces rôles est réalisée grâce à un mécanisme que l'auteur nomme "ignorance mutuelle". Ce mécanisme gère les composants qui forment les briques élémentaires des rôles et des agents. Un composant sert à encapsuler des ressources

	Niveau descriptif	Niveau exécutif
Externe	Organisation Relation Type d'influence	Groupe Accointance Influence
	Description de rôle	Rôle
Interne	Description de compétence (Type d'agent)	Compétence Agent

Figure 3.4 — Architecture de la méthodologie MOCA.

et des compétences et possède sa propre stratégie d'acceptation d'utilisation. Lorsqu'un composant a besoin d'utiliser les compétences ou les ressources associées à un autre composant, il doit en faire la demande en passant par un gestionnaire de composants (MGC). Le composant sollicité peut alors refuser la demande qui lui a été faite et ainsi mettre en attente le composant appelant. Ce mécanisme est illustré par la figure 3.5. La partie implémentation est réalisée en se basant partiellement sur le modèle AALADIN et utilise le langage JAVA.

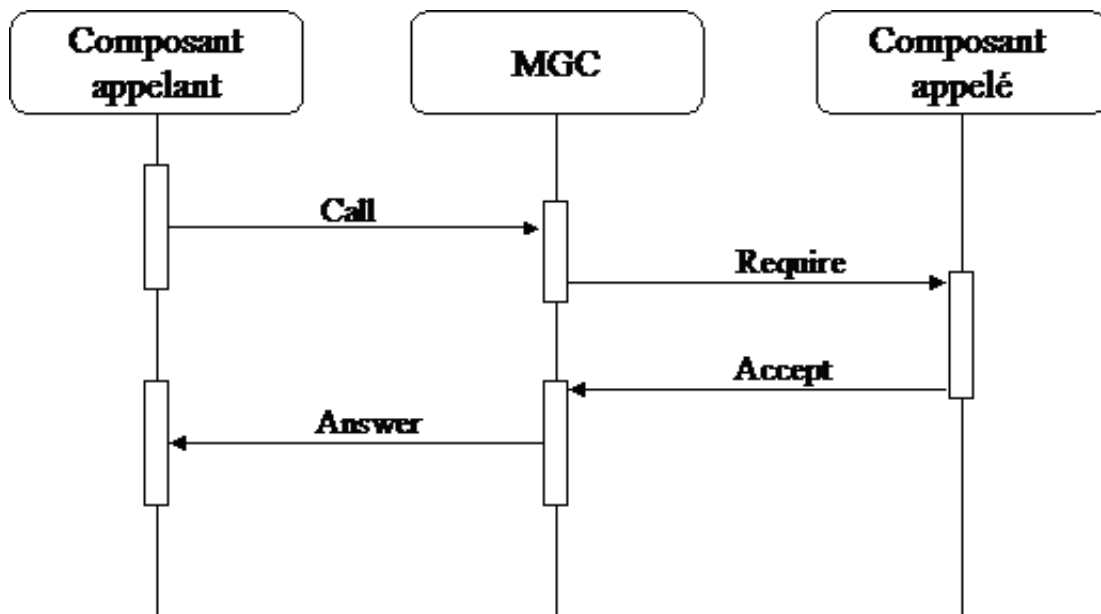


Figure 3.5 — Exemple de gestion des conflits dans MOCA.

Le modèle MOCA a été conçu à partir de l'analyse des modèles AGR existant. Il tente d'intégrer les avantages de chacun et apporte des améliorations pour corriger leurs points faibles. La gestion par composants utilisée comme base au niveau implémentation fait de cette plate-forme un moyen très flexible d'implémenter un SMA. Cette flexibilité a cependant un coût. Le système est en effet assez lourd à gérer lorsque le nombre d'agents et de composants

est important. Les agents, à partir du moment où ils ont les compétences requises, ont la possibilité de jouer tous les rôles présents dans un groupe. Aucune vérification de compatibilité globale n'est en effet effectuée lorsque l'agent prend un rôle.

3.2.8 Synthèse

Le tableau 3.1 fournit une synthèse des modèles AGR décrits dans les sections précédentes. Ces modèles d'analyse et de conception de systèmes multi-agents sont généralement associés à une implémentation. Cette dualité permet ainsi à l'utilisateur de ces concepts de ne pas avoir à réaliser la traduction de la partie conceptuelle vers la partie implémentation. Une telle traduction est complexe et engendre parfois la modification des concepts lors de leur traduction dans un langage de programmation particulier.

Des contraintes d'acquisition des rôles par les agents sont présentes pour les modèles MOISE, MASCARET, OPERA et MOCA. Dans le cas de la méthode AALAADIN, l'auteur a délibérément laissé le soin de définir ces contraintes à l'utilisateur du formalisme. Ces contraintes concernent, sauf dans le cas de MOISE, non pas le rôle dans sa globalité mais des éléments internes tels que ses capacités et ses ressources. Ainsi, deux rôles qui ont des contraintes d'acquisition, basés sur des éléments internes, identiques mais qui engendrent des comportements incompatibles l'un envers l'autre, peuvent tout de même être joué simultanément par un agent qui valide ces contraintes. Par exemple, un chalutier possède les capacités de secourir un navire et de pêcher. Cependant, il ne peut faire les deux simultanément. Il est alors nécessaire d'avoir en plus des mécanismes ciblant les éléments internes, de posséder des contraintes portant sur le rôle dans son ensemble, pour vérifier qu'un agent à la capacité de le jouer.

La gestion des conflits entre les rôles est, comme le montre le tableau 3.1, peu présente parmi les modèles. Lorsqu'elle est prise en compte, celle-ci est basée sur les capacités des rôles dans le cas de MASCARET et de MOCA et sur une pile de comportement pour OPERA. Excepté pour OPERA, la gestion des conflits est réalisée, comme dans le cas des contraintes d'acquisition, au niveau interne des rôles et des agents (capacités et ressources). Cette gestion donne aux rôles la possibilité de continuer à être actif et cela même si une ou plusieurs capacités ou ressources dont ils ont besoin ne leur sont pas accessibles. Toutefois, ces mécanismes sont insuffisants. Des conflits peuvent survenir globalement, sans s'attacher à un aspect particulier du rôle. Reprenons l'exemple du chalutier. Il doit pêcher tout en respectant les règles de navigation. Un conflit existe entre ces deux activités. Si le chalutier s'occupe exclusivement de sa pêche, il ne peut plus réagir aux risques de collision. Le navire doit donc tenir compte des règles de navigation avant l'acte de pêche. Dans ces conditions, un traitement du conflit de manière globale par rapport aux rôles et non plus de manière locale par rapport à une capacité particulière des rôles est nécessaire.

En faisant la synthèse des mécanismes d'acquisition des rôles et de la gestion des conflits entre les rôles, deux types de contraintes se distinguent :

Plate-forme/ méthode	Correspondance Implémentation/Modèle	Contraintes d'acquisition	Gestion des conflits entre rôles	Relations rôles/capacités	Présence d'un environnement
GAIA	Pas d'implémentation	Aucune	Aucune	Toutes les capacités sont au niveau de l'agent	Non
HILAIRE	Pas d'implémentation	Aucune	Aucune	Toutes les capacités sont au niveau du rôle	Oui, à travers les rôles environnementaux
MOISE/MOISE+	Oui	Oui, par les contraintes de compatibilité et de cardinalité	Aucune	Toutes les capacités sont au niveau du rôle	Oui, par la notion de structure organisationnelle
AALAADIN	Oui, partiellement sauf les rôles et les groupes	Aucune à définir explicitement par l'utilisateur	Aucune	Toutes les capacités sont au niveau de l'agent	Non
MASCARET	Oui	Oui, par les attributs et méthodes de l'agent	Oui par la planification des capacités suivant la logique temporelle de Allen	Toutes les capacités sont au niveau de l'agent	Non
OPERA	Oui	Oui, par l'apparition d'une situation déclenchante	Oui grâce à une pile de comportements	Toutes les capacités sont au niveau de l'agent	Oui
MOCA	Oui	Oui, par les capacités des agents	Oui par un mécanisme d'ignorance mutuelle	Présence des capacités dans les rôles et les agents	Non

Tableau 3.1 — Comparatif des systèmes multi-agents AGR.

- Les contraintes locales liées aux capacités et aux ressources propres d'un agent ou d'un rôle ;
- Les contraintes globales tenant compte des rôles et des agents dans leur globalité. Ces gestions sont réalisées en tenant compte de contraintes sur les types d'agent et de rôles et non sur les capacités qu'ils utilisent.

Le choix de l'utilisation de ces deux contraintes est fortement dépendant du contexte et du but recherché. Il incombe au concepteur lors de la spécification des agents et des rôles.

Dans la plupart des méthodes présentées, toutes les capacités utilisables au cours de l'exécution du système sont uniquement détenues par les agents excepté dans les cas de MOCA, HILAIRE et de MOISE. Les rôles ne sont alors que des utilisateurs des capacités internes des agents. Ce type de modélisation entraîne différents problèmes. D'une part, les agents possèdent des capacités qu'ils n'utilisent pas durant leur exécution, ce qui n'est pas bloquant d'un point de vue implémentation mais reste conceptuellement peu correct. Un navire peut, en effet, difficilement avoir les capacités de pêcher au chalut, de transporter de lourdes charges et de transporter des voyageurs en étant un tanker. Le fait qu'un rôle puisse apporter des capacités spécifiques à un agent qui le joue rend aussi le système plus flexible et réutilisable. Prenons par exemple le cas d'un agent *navire*. S'il joue le rôle *chalutier*, il possède alors la capacité de pêcher au chalut. Ce même navire peut ensuite servir à transporter des touristes pour visiter des îles, il n'est plus à ce moment là un chalutier. MOCA est le seul modèle à proposer cette alternative contrairement à MOISE et HILAIRE où les rôles sont les seuls à posséder des capacités.

La notion d'environnement est très importante dans notre contexte de simulation. Cette notion est cependant peu représentée dans les plates-formes génériques étudiées. Dans OPERA, l'environnement est défini de manière statique et globale et il n'existe pas la possibilité de définir des lois locales à seulement une partie de l'environnement tel que le fait pour un navire de ne pouvoir se mouvoir sur la terre. MOISE et HILAIRE intègre cette notion d'environnement à travers d'autres concepts que sont respectivement la structure organisationnelle et les rôles environnementaux sans explicitement le définir. L'environnement, dans ces définitions, ne possède donc pas de caractéristiques propres comme par exemple, la présence d'un repère de coordonnées et la présence de lois globales comme la gravité. Il existe aussi une dichotomie entre la description de l'environnement et les entités simulées qui ne sont alors pas considérés comme faisant partie de l'environnement.

Le tableau 3.2 récapitule les définitions de la notion de rôle selon le modèle agent. Deux définitions légèrement différentes émergent de ces définitions. La première provient des définitions de GAIA, AALAADIN, MOISE et MASCARET et s'oriente vers un point de vue plus sociétal. La deuxième découle des définitions de HILAIRE, OPERA et MOCA et expose un point de vue plus comportemental. La simulation de navigations maritimes et en particulier, la simulation de navires demande de modéliser leurs comportements. Le modèle de cette simulation se doit donc d'appartenir au cadre des modèles AGR qui peuvent être qualifiés de comportementaux. En réalisant la capitalisation des définitions comportementales

Modèle	Définition de rôle
GAIA	Un rôle est défini comme une description abstraite de la fonction qu'une entité peut avoir au sein d'un système
HILAIRE	Un rôle représente l'abstraction d'un comportement commun à un ensemble d'entités.
MOISE	Un rôle spécifie l'ensemble des activités qu'un agent peut réaliser dans une organisation.
AALAADIN	Un rôle est la représentation abstraite d'une fonction et d'une interaction dans un groupe.
MASCARET	Un rôle désigne la responsabilité d'un agent dans l'organisation.
OPERA	Un rôle est un couple composé d'une situation déclenchante et d'un modèle de comportement.
MOCA	Un rôle est le patron récurrent de comportement individuel dans une organisation.

Tableau 3.2 — Définition de rôles selon le modèle agent.

de la notion de rôle, il est possible d'exprimer globalement un rôle comme :

L'expression du ou d'une partie du comportement d'un agent dans une organisation ou un groupe.

Les modèles les plus proches de nos attentes en terme de modélisation de simulation de navigations maritimes sont MOCA et OPERA. MOCA est en effet le modèle le plus complet parmi ceux étudiés dans cette section. Il possède cependant des lacunes dont la plus importante est l'absence de modélisation de l'environnement. Or, l'environnement est un élément clef dans le domaine maritime de part sa dynamique et la grande influence qu'il peut avoir sur les entités spatiales telles que les navires. Les autres lacunes concernent la gestion de l'acquisition des rôles et la gestion des conflits entre rôles. Cette gestion est en effet confiée à des mécanismes qui se basent sur des contraintes locales telles que les capacités qu'un agent doit avoir pour prendre un rôle. Ces mécanismes ne sont pas suffisants, et nécessitent l'utilisation de mécanismes basés sur des contraintes globales.

OPERA définit bien un environnement mais celui-ci est statique et utilise uniquement des lois globales, ce qui empêche de modéliser toute la complexité d'un environnement tel que l'environnement maritime. Les éléments qui composent un tel environnement sont effectivement dynamiques et certaines de ses lois diffèrent selon la région géographique. L'absence de mécanismes autres qu'une situation déclenchante entraînant le choix d'un rôle par un agent dénote une déficience importante dans la modélisation de comportements.

Compte tenu des insuffisances au niveau de la gestion de l'acquisition des rôles, de la gestion des conflits et de la modélisation de l'environnement, pour modéliser des simulations de navigations maritimes et du caractère expérimental de ces outils généralement issus d'un

travail de thèse, les efforts pour étendre ces modèles à de nouveaux concepts demandent au moins autant de travail, sinon plus que la réalisation d'un nouveau modèle plus adapté à notre problématique.

3.3 Modèle AGR étendu

Pour satisfaire les besoins exprimés à la section 3.1 (comportements hétérogènes et changeant, environnement géographique, organisation), la création d'un nouveau modèle multi-agents pour la simulation géographique est primordiale. Cette création s'accompagne d'une démarche de plusieurs phases ordonnées, de la définition du niveau conceptuel à la définition du niveau applicatif. La figure 3.6 montre chacune de ces phases en spécifiant les éléments développés dans cette section.

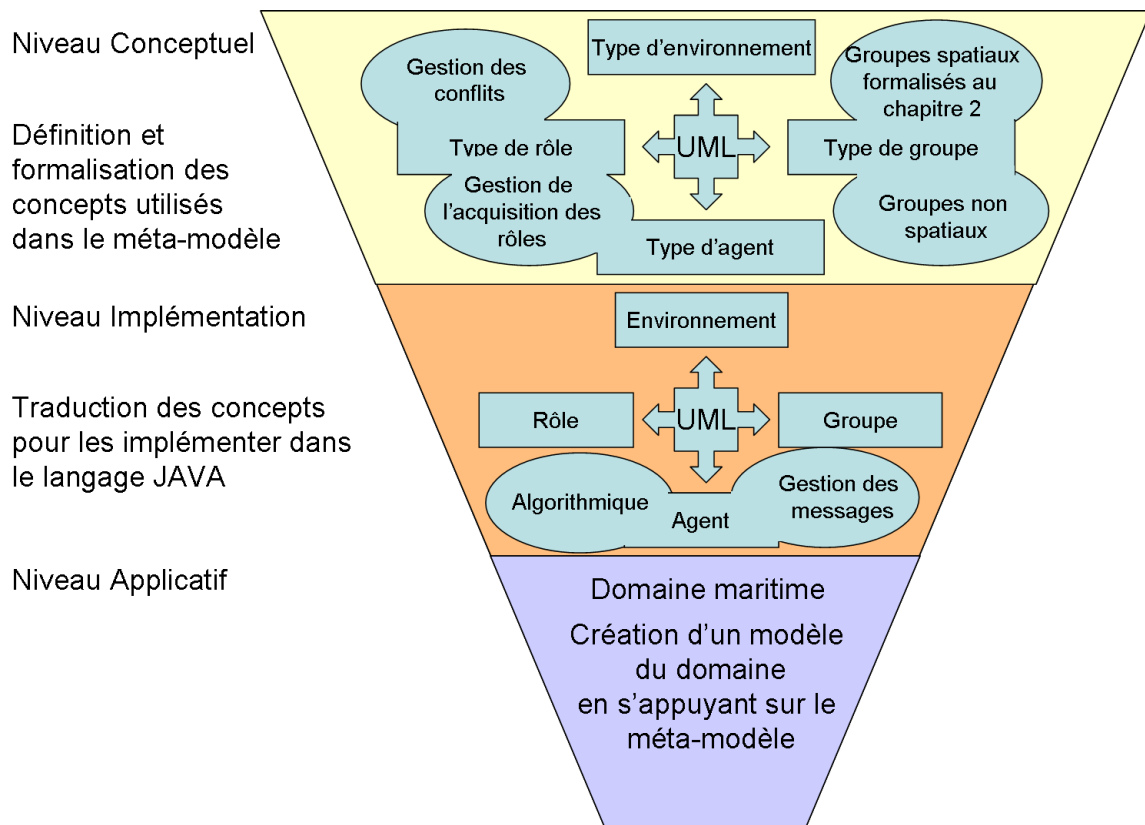


Figure 3.6 — Démarche de conception du modèle multi-agents.

La première phase est le niveau conceptuel. Ce niveau pose les fondements de notre modèle multi-agents en construisant un méta-modèle qui introduit les concepts majeurs servant de socle à l'élaboration des phases suivantes. Dans cette phase, sont définis les notions de type d'environnement, type de groupe, type d'agent et type de rôle. L'utilisation de ces notions, dites abstraites, exprime l'opposition avec le niveau implémentation où les notions correspondantes sont dites concrètes. Les liaisons entre ces notions sont exprimées à l'aide d'un diagramme de classe UML (Unified Modelling Language) qui est adapté à la représentation de

tels liens. Une fois ces premiers concepts posés, le niveau conceptuel donne les spécifications et la formalisation des mécanismes de gestion d'acquisition des rôles et de gestion des conflits entre les rôles. Ces mécanismes sont ajoutés au diagramme UML pour une meilleure lisibilité et cohérence du méta-modèle.

La deuxième phase est le niveau de l'implémentation. Ce niveau traduit les concepts du niveau conceptuel en éléments exprimables dans un langage de programmation. Il n'existe pas, à ma connaissance, de langage multi-agents définissant les concepts d'agent, groupe et rôle utilisés. Cette absence nous impose de réaliser une traduction en utilisant le paradigme objet. Cette traduction se base essentiellement sur un schéma UML de classes abstraites et une définition algorithmique des fonctions essentielles à ces classes. L'utilisation d'UML permet d'avoir un langage graphique reconnu par tous pour la spécification des classes. La gestion générique des messages entre les agents est aussi spécifiée dans cette phase.

La dernière phase est le niveau applicatif. Ce niveau détermine le modèle composé des classes qui servent à l'implémentation finale du système multi-agents orienté vers notre domaine applicatif. Il est possible, pour modéliser les entités du phénomène à simuler, de s'appuyer sur la même démarche en niveau en utilisant le méta-modèle comme point d'appui pour définir les éléments constitutifs de la simulation. Aucune autre phase n'est nécessaire dans ce cas, après le niveau implémentation, l'application étant alors terminée. Ainsi, le concepteur définit en premier lieu, au niveau conceptuel, les types d'agent, de rôle, de groupe et d'environnement dont il a besoin, puis il détermine les mécanismes d'acquisition de ses différents types de rôle et la gestion des conflits. En dernier lieu, le concepteur traduit en classe, pour les implémenter, les types qu'il a définis et décrit les algorithmes utilisés.

Afin de suivre la démarche conceptuelle et le niveau implémentation, nous introduisons dans les sections suivantes un exemple illustratif issu du domaine maritime que nous appelons "exemple du chalutier et du tanker". Cet exemple est celui de quatre navires en navigation côtière. Deux de ces navires sont des chalutiers, les deux autres sont des tankers. Les chalutiers pêchent et les tankers se dirigent vers leur destination. L'un d'eux ne possède aucun homme d'équipage en passerelle.

3.3.1 Modèle AGR conceptuel

Le méta-modèle est défini au niveau conceptuel selon une structure hiérarchique à trois niveaux. Cette hiérarchie exprime le niveau d'abstraction auquel il est possible d'observer la simulation. Elle est composée au plus haut niveau par l'environnement, puis à un niveau immédiatement inférieur par les groupes, et enfin au niveau le plus bas par les agents qui jouent des rôles dans ces groupes. Le contexte de la simulation est déterminant dans le choix des types d'agent, de groupe, de rôle et d'environnement. Chaque simulation est caractérisée par un ensemble de types d'environnement, de types de groupe, de types d'agent et de types de rôle. Il est possible d'avoir plusieurs types d'environnement dans une simulation mais dans la majorité des cas, un seul type d'environnement est utilisé. Pour une simulation donnée,

nous avons donc :

Définition 14 Soit A l'ensemble des types d'agent, G l'ensemble des types de groupe, R l'ensemble des types de rôle, E l'ensemble des types d'environnement et I l'intervalle de temps $[t_i, t_j]$ durant lequel est exécutée la simulation avec $t_i, t_j \in \mathbb{R}$ et $t_i \leq t_j$.

Afin de faire la distinction entre les types et les instances, nous utilisons les notations suivantes :

- Les types de rôle, d'agent et de groupe sont notés en majuscule. Par exemple, A_i , G_i et R_i sont respectivement un type d'agent, un type de groupe et un type de rôle tel que $A_i \in A$, $G_i \in G$ et $R_i \in R$.
- Les instances de type de rôle, d'agent et de groupe sont notées en minuscule. a_i , g_i et r_i sont respectivement les instances associées à $A_i \in A$, $G_i \in G$ et $R_i \in R$. Dans cette thèse, nous employons les termes d'agent, de groupe et de rôle pour désigner les instances de type d'agent, de type de groupe et de type de rôle.

Notion de type d'agent

Un type d'agent est la notion abstraite d'agent. Les agents sont les entités actives de la simulation. Ils possèdent des capacités qui leur permettent d'agir et d'interagir sur leur environnement. Chaque agent appartient à au moins un groupe. Un agent peut jouer un ou plusieurs rôles simultanément dans un ou plusieurs groupes. Un agent a aussi la capacité de se défaire des rôles qu'il joue s'il juge qu'il n'en a plus besoin. Prenons l'exemple d'un agent *navire* qui est en train de pêcher. Il joue le rôle *pêche*. Lorsque ses cales sont pleines, il n'a plus besoin de pêcher. L'agent abandonne alors son rôle. En ce qui concerne la communication, les agents correspondent avec les autres agents d'un même groupe via l'envoi de messages qu'ils reçoivent dans une boîte aux lettres. Dans le cadre de la simulation de phénomènes géographiques, les agents se trouvent au sein d'un environnement géographique. Ces agents sont situés et agissent, selon leur capacité de raisonnement spatial⁴, en fonction du positionnement des autres agents. Les attributs qui caractérisent de tels agents sont ceux qui déterminent la définition d'agent spatial⁵. Un agent possède dans la simulation une certaine durée de vie qui est spécifiée de la manière suivante :

Propriété 1 La période de vie d'un agent a_i de type $A_i \in A$ est donnée par l'intervalle temporel $I_{a_i} \subseteq I$ et noté $[T(a_i)_{début}, T(a_i)_{fin}]$.

L'agent reste dans un groupe une certaine période de temps, ne dépassant pas la période de vie d'un agent, appelée, période d'appartenance et qui se définit de la manière suivante :

⁴Le couplage entre les agents et le raisonnement spatial est étudié dans le prochain chapitre.

⁵Voir la définition donnée dans la section 1.2.1

Propriété 2 *La période d'appartenance d'un agent a_i de type $A_i \in A$ à un groupe g_i de type $G_i \in G$ est donnée par l'intervalle temporel $I_{a_i g_i} \subseteq I$ et noté $[T(a_i g_i)_{début}, T(a_i g_i)_{fin}]$ avec $I_{a_i g_i} \subseteq I_{a_i}$.*

Lorsqu'un agent ne joue plus aucun rôle dans un groupe, il doit le quitter.

Notion de type de groupe

Un type de groupe est la notion abstraite de groupe. Un groupe est un ensemble d'agents ayant un ou plusieurs aspects en commun en terme d'objectif, de comportement, de région géographique ou de milieu social. Des navires qui partagent une même région géographique peuvent former un groupe qui devient donc un groupe spatial. Le chapitre 2 donne un formalisme, défini autour des notions de proximité, pour la création de ces groupes spatiaux. Les entités spatiales sont alors vues comme les agents. De même, des bâtiments militaires qui font partie de la même formation sont regroupés. Un porte-avions est généralement toujours accompagné de plusieurs navires pour sa protection. Pour être dans un groupe, un agent est dans l'obligation de jouer un rôle associé à celui-ci. Un groupe a donc pour objectif de structurer les interactions entre les agents. Les interactions entre deux agents distincts ne faisant pas partie d'un même groupe sont impossibles. Par contre, si un agent a_1 fait partie de deux groupes g_1 et g_2 et un agent a_2 fait partie de deux groupes g_1 et g_3 , ils peuvent interagir ensemble du fait qu'ils aient un groupe en commun. Un agent peut également appartenir à plusieurs groupes. Un groupe n'existe pas s'il ne possède aucun agent. Lorsque cela est nécessaire, un agent a la possibilité de créer le groupe dans lequel il souhaite aller si celui-ci n'existe pas. La période de vie d'un groupe est spécifiée de la manière suivante :

Propriété 3 *La période de vie d'un groupe g_i de type $G_i \in G$ est donnée par l'intervalle temporel $I_{g_i} \subseteq I$ et noté $[T(g_i)_{début}, T(g_i)_{fin}]$ avec $I_{g_i} = \bigcup_{j=1 \dots n} I_{a_j g_i}$.*

Sa durée de vie est donc dépendante de la durée d'appartenance de ses agents au groupe.

Dans le but de déterminer si un type d'agent peut appartenir à un type de groupe, nous introduisons la définition suivante :

Définition 15 *Soit GA un sous-ensemble du produit cartésien $G \otimes A$ où $(G_i, A_i) \in GA$ si et seulement si le type d'agent $A_i \in A$ peut appartenir au type de groupe $G_i \in G$.*

Notion de type de rôle

Un type de rôle est la notion abstraite de rôle. Un rôle compose une partie du comportement d'un agent. L'association de tous les rôles d'un agent forme alors son comportement. Les rôles sont caractérisés par diverses propriétés. Des contraintes telles que l'incompatibilité entre deux rôles ou l'exclusivité d'un rôle, limitent leur acquisition par les agents. Ces contraintes sont étudiées plus en détail dans la prochaine section.

Afin de déterminer les associations entre les types de rôle et les types de groupe, nous utilisons la définition suivante :

Définition 16 *Soit GR un sous-ensemble du produit cartésien $G \otimes R$ où $(G_i, R_i) \in GR$ si et seulement si R_1 est un type de rôle du groupe G_i avec $R_i \in R$ et $G_i \in G$.*

Un type de rôle appartient à un unique type de groupe. Cette caractéristique oblige ainsi le concepteur à faire la distinction entre deux types de rôles qu'il juge similaire mais dont les groupes auxquels ils appartiennent structurent différemment les interactions entre les agents. Il est donc nécessaire de spécifier cette affirmation :

Définition 17 *Un type de rôle appartient à un unique type de groupe, donc $\forall (G_i, R_i), (G_j, R_j) \in GR, G_i \neq G_j \Rightarrow R_i \neq R_j$.*

Notion de type d'environnement

Un type d'environnement est la notion abstraite d'environnement. Un environnement est l'espace des actions et des interactions des agents. Il peut être découpé en une ou plusieurs régions, pouvant se superposer, selon l'échelle et le but de la simulation. Plusieurs éléments distincts composent l'environnement :

- Les lois. Ce sont les facteurs physiques, chimiques, biologiques et sociaux qui ont un effet sur les entités [WikipédiA, 2005] de l'environnement. Ces facteurs sont locaux à une région de l'environnement déterminée ou globaux à l'ensemble de l'environnement selon l'échelle de la simulation. Ainsi, la formation d'un courant marin due à un goulet est une loi locale. A contrario, la gravité est considérée comme une loi globale.
- L'espace environnemental. Il regroupe les entités spatiales comme la mer, la terre, le vent, les courants et la marée. Ces entités sont dynamiques et évoluent avec le temps. Cette évolution est aisément perceptible dans le domaine maritime où la période temporelle de ces évolutions est relativement courte. Ces entités possèdent une emprise qui est alors définie comme une région de l'environnement.
- Les entités situées. Elles rassemblent toutes les entités spatiales, modélisées comme des agents, qui ne font pas partie de l'espace environnemental comme les navires, les phares, les bouées et les autorités maritimes.

Dans les modèles conventionnels, seuls les entités situées sont modélisées comme des agents. Du fait de la dynamique de l'espace environnemental, les entités qui le représentent doivent aussi être modélisées par des agents. Cette modélisation cumule plusieurs avantages. Premièrement, la dynamique de ces entités peut ainsi s'exprimer par la modification du comportement de l'agent. Des courants marins sous l'action de la marée vont, par exemple, voir leurs comportements (ex : sens modifié) transformés vis à vis des navires. Deuxièmement, les lois locales de l'environnement peuvent être intégrées au sein des agents de l'espace environnemental qui définissent leur région d'application. Elles s'expriment alors comme des

capacités d'interaction de ces agents. Prenons l'exemple d'un agent terre dans le domaine maritime. Une loi qui interdit aux navires de se mouvoir sur la région liée à cet agent lui est alors associée. Contrairement aux lois locales, les lois globales sont spécifiées au niveau de l'environnement et affectent tous les agents.

Enfin, en ce qui concerne les interactions et les actions, les lois locales contraignent celles-ci selon les entités de l'espace environnemental dans lesquelles les agents sont localisés. Par exemple, un navire se voit refuser de se mouvoir sur la terre.

Les agents faisant partie de groupes, l'environnement peut être vu comme un métagroupe pour lequel les entités sont des groupes. Il ne s'agit cependant pas d'un groupe tel que nous le définissons. Les groupes ne peuvent pas, en effet, contenir d'autres groupes.

Pour synthétiser, l'environnement possède les propriétés suivantes :

- L'ensemble des groupes et en conséquence l'ensemble des agents de la simulation composent l'environnement. Deux types d'entités spatiales sont représentés et modélisés par des agents : les entités situées (navires, phares) et les entités de l'espace environnemental (mer, terre, courants) ;
- Ses composants sont dynamiques, permettant au système et à la simulation d'évoluer au cours du temps ;
- Les lois de l'environnement sont locales ou globales selon l'échelle de la simulation. Les lois locales sont liées aux agents qui représentent l'espace environnemental. Les lois globales ou locales contraignent les actions et les interactions des agents.

Dans le cadre de simulation de navigations maritimes, l'environnement dans lequel se déroule ce phénomène est géographique. L'espace environnemental est composé d'agents qui contiennent des régions. Celles-ci sont des régions géographiques et sont positionnées par rapport à un repère géographique.

La figure 3.7 expose le schéma UML du méta-modèle conceptuel. Ce schéma UML décrit les liens qui existent entre les différentes notions du modèle. Notons que, le lien entre un groupe et un agent ne peut se faire que si l'agent prend un rôle dans ce groupe. Afin de différencier les notions présentes dans ce méta-modèle de celles du niveau de l'implémentation, les notions abordées sont celles de type de rôle, de type d'agent, de type de groupe et de type d'environnement. Il existe cependant une correspondance directe de ces notions entre le niveau conceptuel et le niveau implémentation.

En reprenant l'exemple du chalutier et du tanker, il est désormais possible de définir les différents types qui sont utilisés pour cet exemple. Le tableau 3.3 présente les différents types créés. La définition des types chalutier et tanker comme type de rôle et non comme type d'agent s'explique par un choix conceptuel dépendant de la manière de gérer les conflits entre rôles et par la flexibilité que cela entraîne pour la définition du comportement de l'agent.

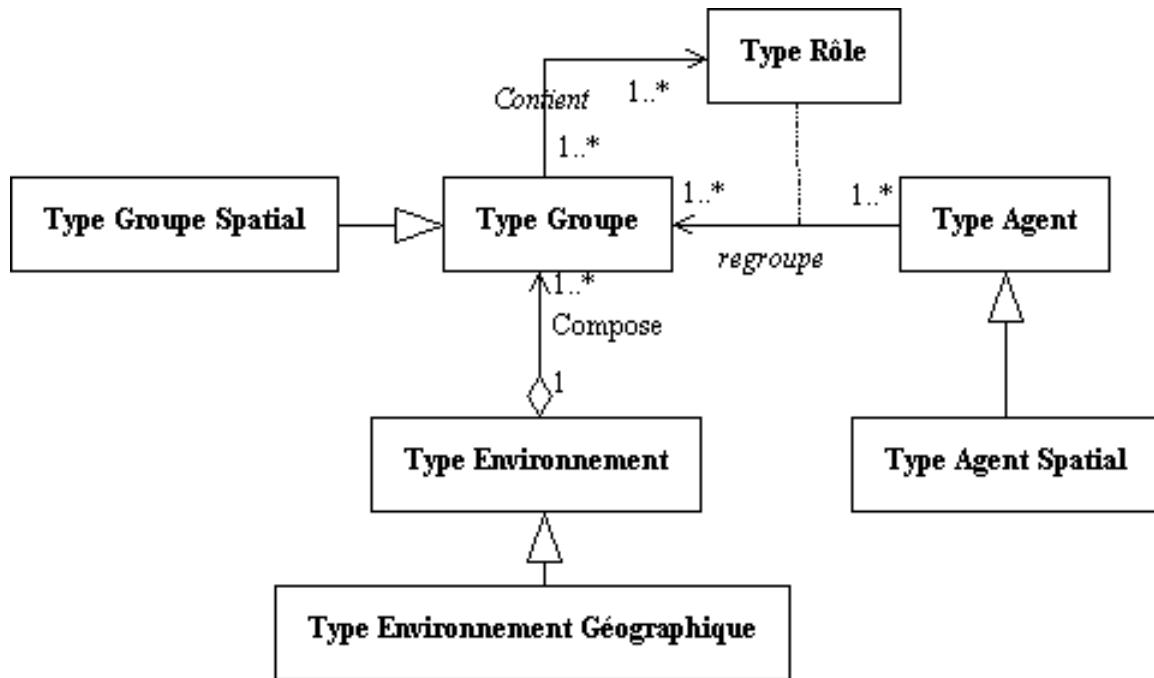


Figure 3.7 — Méta-modèle conceptuel de TRANS.

Type d'agent	Type de rôle	Type de groupe	Type d'environnement
Navire	Chalutier	Surveillance	Environnement Maritime
	Tanker		
	Pêche		
	Endormi		

Tableau 3.3 — Choix des types pour l'exemple du chalutier et du tanker.

3.3.2 Extension du modèle par l'ajout de propriétés au concept de rôle

Afin d'enrichir la sémantique de notre modèle, nous ajoutons des propriétés supplémentaires à la notion de rôle. Avant de définir ces propriétés, il est nécessaire de formaliser la capacité d'un agent à jouer un rôle dans un groupe. Cette capacité est spécifiée par la définition suivante :

Définition 18 Soit $GRAT$ un sous-ensemble du produit cartésien $G \otimes R \otimes A \otimes I$ où $(G_i, R_i, A_i, I) \in GRAT$ si et seulement si un agent a_i de type $A_i \in A$ prend le rôle r_i de type $R_i \in R$ dans le groupe g_i de type $G_i \in G$ durant i avec $(R_i, G_i) \in GR$, $(G_i, A_i) \in GA$ et $i \subseteq I_{a_i} \cap I_{g_i} \neq \emptyset$.

Dans le but de manipuler plus aisément la définition précédente, le prédicat *Joue* est introduit :

Propriété 4 Le prédicat *Joue* détermine l'action d'un agent a_i de type $A_i \in A$ qui prend le rôle r_i de type $R_i \in R$ dans un groupe g_i de type $G_i \in G$ pendant l'intervalle de temps $i \subseteq I_{a_i}$.

Ce prédicat est défini comme suit :

$$Joue(g_i, r_i, a_i, i) = \begin{cases} 1 & \text{si } (G_i, R_i, A_i, I) \in GRAT \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

Lorsque $Joue(g, r, a, i) = 1$, l'agent a joue le rôle r dans le groupe g pendant l'intervalle de temps $i \subseteq I_a$. Soit l'exemple d'un agent n de type $navire \in A$ qui joue le rôle ta de type $tanker \in R$ au sein du groupe s de type $surveillance \in G$ pendant une période de temps i , avec $i \subseteq I_n$, $(surveillance, tanker, navire, I) \in GRAT$ alors $Joue(s, ta, n, i)$ vaut 1.

Il existe une distinction entre les rôles permanents et les rôles temporaires. Pour un agent donné, nous définissons un rôle comme étant permanent, si l'agent le garde du début jusqu'à la fin de sa vie. A contrario, les rôles temporaires sont des rôles qu'un agent garde uniquement pendant une portion de sa durée de vie. Cette distinction permet de spécialiser un type d'agent tout en donnant de la flexibilité à son comportement grâce à la modification des priorités des rôles.

Propriété 5 *Un type de rôle permanent est un rôle qui est pris par un agent a_i durant toute la durée de sa vie I_{a_i} . Cette propriété se définit comme suit :*

$$Permanent(R_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \forall A_i, \exists (G_i, R_i) \in GR \text{ tel que} \\ & \forall a_i, r_i, g_i, i \subseteq I_{a_i} \text{ } Joue(a_i, r_i, g_i, i) = 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

Lemme 1 *Le fait que le rôle r_i du groupe g_i soit permanent pour l'agent a_i implique que $I_{a_i} \subseteq I_{g_i}$.*

Lorsque $Permanent(R_i) = 1$, le type de rôle $R_i \in R$ est permanent pour tous les types d'agent $A_i \in A$. Notons que si $Permanent(R_i) = 0$, le type de rôle $R_1 \in R$ est considéré comme temporaire pour tous les types d'agent $A_i \in A$. Par exemple, un agent n de type $navire \in A$ joue un rôle ta de type $tanker \in R$ pendant toute la durée de sa vie I_n dans un groupe s de type $surveillance \in G$, avec $navire \in A$, $tanker \in R$ et $surveillance \in G$. Le type de rôle $tanker$ est permanent pour le type d'agent $navire$, ce qui signifie que $Permanent(tanker) = 1$ avec la conséquence, si $(surveillance, tanker) \in GR \Rightarrow I_n \subseteq I_s$ où I_s est la durée de vie du groupe surveillance.

Il est possible d'indiquer si un rôle est incompatible avec un autre rôle. Dans ce cas, les deux rôles incompatibles ne peuvent pas être joués par un même agent, durant une période de temps commune. Cette propriété permet d'établir dynamiquement et automatiquement un blocage lorsqu'un agent tente de jouer deux rôles alors que cela est impossible dans le cas du phénomène réel.

Propriété 6 *L'incompatibilité de deux types de rôle reflète le fait que les deux rôles ne puissent être pris simultanément. Cette propriété s'applique pour tous les agents prenant ces*

deux rôles. L'incompatibilité de deux types de rôle est définie comme suit :

$$Incompatibilité(R_i, R_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } \forall (G_i, A_i), (G_i, A_i) \in GA (G_i = G_j \vee G_i \neq G_j), \\ & \forall a_i, r_i, r_j, g_i, g_j \wedge i \subseteq I_{a_i} \quad Joue(g_i, r_i, a_i, i) \neq Joue(g_j, r_j, a_i, i) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

Lorsque $Incompatibilité(R_i, R_j) = 1$, les types de rôle R_i et R_j sont alors considérés comme incompatibles. Par exemple, l'agent n de type $navire \in A$ peut jouer les rôles ta de type $tanker \in R$ et f de type $frégate \in R$ dans le groupe s de type $surveillance \in G$. Si l'agent n joue le rôle ta dans le groupe s durant l'intervalle temporel $i \subseteq I_n$ alors $Joue(s, ta, n, i) = 1 \Rightarrow Joue(s, f, n, i) = 0$.

Le concepteur peut aussi définir des types de rôle exclusifs. Un rôle exclusif est un rôle qui ne peut en aucun cas être joué simultanément avec d'autres rôles temporaires. Cependant ces rôles sont jouables en simultanée avec des rôles permanents. Dans le cas où un agent joue un rôle permanent et exclusif, il est dans l'incapacité de jouer des rôles temporaires durant toute sa durée de vie. L'intérêt de cette propriété porte sur la possibilité de simuler le comportement d'une entité qui se focalise sur une tâche précise en excluant toutes autres tel que sauver l'équipage d'un navire en détresse.

Propriété 7 *Un type de rôle exclusif est un type de rôle qui ne peut être joué uniquement qu'en concurrence avec un type de rôle permanent. Un rôle exclusif se définit comme suit :*

$$Exclusif(R_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \forall (G_i, A_i), (G_i, A_i) \in GA, R_j \in R, \forall a_i, g_i, g_j, r_i, r_j, i \subseteq I_{a_i} \\ & joue(g_i, r_i, a_i, i) = joue(g_j, r_j, a_i, i) = 1 \Rightarrow Permanent(R_j) = 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Cette propriété s'applique à tous les groupes et à tous les rôles auxquels un agent appartient tant qu'un tel rôle est joué. Si un ou plusieurs rôles temporaires sont déjà joués par l'agent, il doit s'en défaire afin de jouer le rôle exclusif quels que soient les groupes associés à ces rôles.

Lorsque $Exclusif(R_i) = 1$, le type de rôle $R_i \in R$ est exclusif. Un agent n de type $navire \in A$ prend par exemple, le rôle exclusif sa de type $sauveteur \in R$ dans le groupe s de type $surveillance \in G$ pendant la période i , avec $i \subseteq I_n$. Si $Exclusif(sauveteur) = 1$, l'agent n est dans l'incapacité de prendre ou de garder pendant la période où il joue le rôle de type sauveteur, un ou plusieurs autres types de rôle temporaires. Les rôles permanents ne sont pas affectés.

Cette dernière propriété permet de définir l'incapacité d'un agent à jouer un type de rôle durant toute sa vie. L'agent et ce rôle sont alors inconciliables. Dans le cas inverse, ils sont conciliables. Le concepteur peut ainsi définir lorsqu'il est impossible pour un agent de jouer un type de rôle particulier même s'il en possède les capacités.

Propriété 8 *L'inconciliabilité d'un type de rôle reflète le fait qu'un type d'agent ne puisse pas jouer ce type de rôle durant une simulation. Cette propriété s'applique pour un type d'agent $A_i \in A$ par rapport à un rôle $R_i \in R$ pour tout groupe $G_i \in G$.*

$$\text{Inconciliabilité}(A_i, R_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists (G_i, R_i) \in GR \forall g_i, r_i, a_i, i \subseteq I \text{ Joue}(g_i, r_i, a_i, i) = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

Lorsque $\text{Inconciliabilité}(A_i, R_i) = 1$, le type de rôle $R_i \in R$ ne peut être joué par aucune instance du type d'agent $A_i \in A$ pour n'importe quel intervalle de temps $i \in I$. Soit un agent $n \in A$ de type *navire* $\in A$ et le rôle c de type *cote* $\in R$ avec $\text{Inconciliabilité}(\text{navire}, \text{cote}) = 1$. L'agent n est dans l'incapacité de jouer le rôle c durant toute la durée de la simulation.

La figure 3.8 montre notre méta-modèle enrichi des propriétés définies dans cette section. Les notions d'exclusivité et de permanence sont alors considérées comme des attributs d'un type de rôle. Par contre, l'incompatibilité et la conciliabilité sont définies comme des associations. L'attribut priorité participe à la gestion des conflits entre les rôles (voir section 3.3.3).

Reprenons l'exemple du chalutier et du tanker. Les types d'agent, les types de rôle et les types de groupe sont désormais définis. Il s'agit maintenant de spécifier les propriétés des types de rôle. Le tableau 3.4 montre l'application de ces propriétés. Le type de rôle *chalutier* et le type de rôle *tanker* sont incompatibles puisqu'un agent *navire* ne peut être les deux à la fois. Le type de rôle *endormi* est exclusif, l'équipage du navire ne peut, en effet, rien faire d'autre.

Incompatibilité	Incompatibilité (chalutier, tanker)=1
Inconciliabilité	Inconciliabilité(navire,tanker)=0
	Inconciliabilité(navire,chalutier)=0
	Inconciliabilité(navire,pêche)=0
	Inconciliabilité(navire,endormi)=0
Exclusivité	Exclusivité(endormi)=1
Permanent	Permanent(tanker)=1
	Permanent(chalutier)=1

Tableau 3.4 — Choix des propriétés pour l'exemple du chalutier et du tanker.

3.3.3 Gestion des conflits entre rôles

La gestion des conflits entre rôles joués par un même agent est réalisée par l'ajout d'une priorité pour chaque type de rôle. Les types de rôle sont classés selon un ordre total. Le concepteur doit définir pour chaque type de rôle, une priorité initiale différente. Seuls les rôles incompatibles peuvent avoir des priorités identiques. Durant la simulation, la priorité des instances des rôles peut fluctuer en fonction des objectifs que l'agent poursuit et de ce

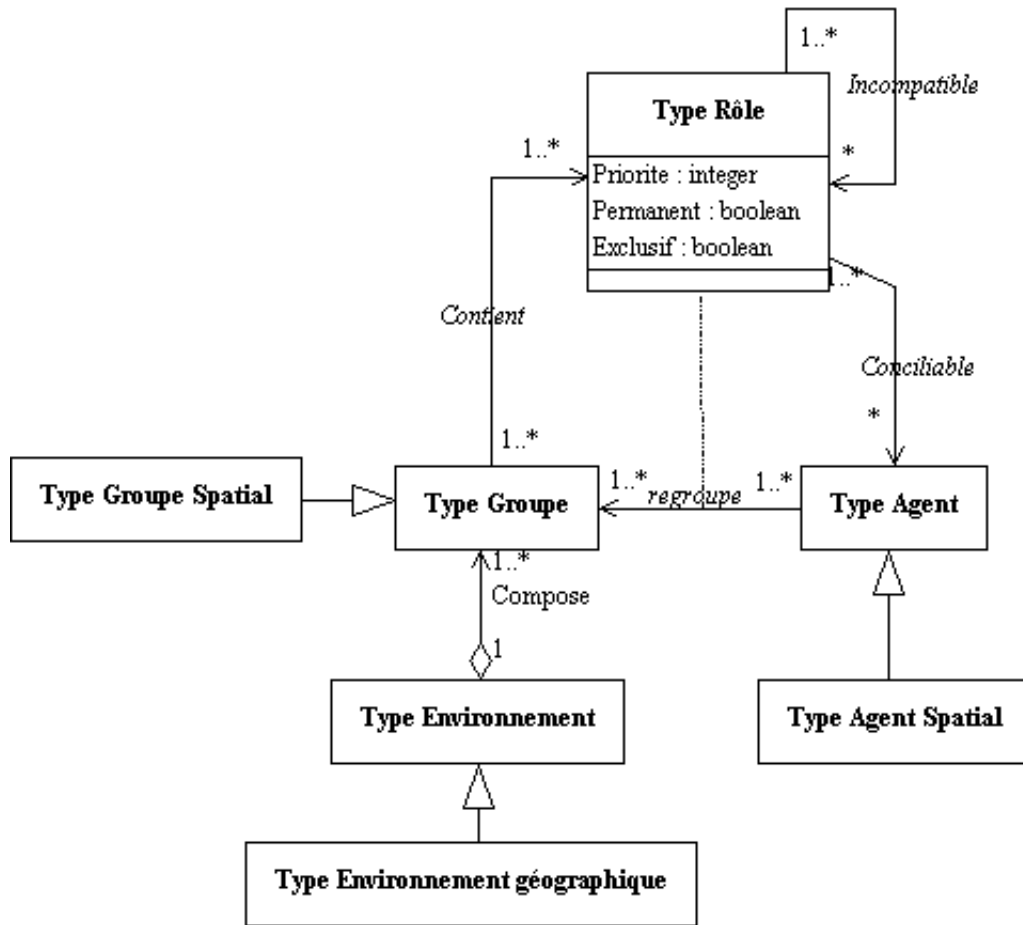


Figure 3.8 — Diagramme UML de notre modèle enrichi de nos propriétés.

qu'il perçoit. La priorité d'une instance de rôle ne peut cependant dépasser que celles qui lui sont immédiatement supérieures. Cette limitation permet de garder globalement l'ordre défini initialement par le concepteur et d'éviter des aberrations où des types de rôle très peu prioritaires comme *tanker* deviennent plus prioritaires que des types de rôle tel que *endormi*. Les priorités pour une simulation sont définies de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 & \text{Priorité}(R_i) : R \rightarrow \mathbb{N} \\
 & \text{Si } \forall R_j \in R, \text{Incompatibilité}(R_i, R_j) = 0 \Rightarrow \text{Priorité}(R_i) \neq \text{Priorité}(R_j)
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Reprenons l'exemple du chalutier et du tanker. Comme $\text{Incompatibilité}(\text{tanker}, \text{chalutier}) = 1$, $\text{Priorité}(\text{tanker}) = \text{Priorité}(\text{chalutier})$. $\text{Priorité}(\text{endormi}) > \text{Priorité}(\text{pêche}) > \text{Priorité}(\text{tanker})$. L'ordre des priorités est déterminé de cette façon pour que l'instance du rôle *endormi* puisse inhiber les autres instances. En effet, l'équipage s'il est endormi n'a pas la possibilité de réaliser d'autres actions.

3.3.4 Implémentation de notre modèle AGR

L'implémentation du modèle agent se fait dans le langage JAVA d'après le diagramme de classe UML (Unified Modelling Language) représenté par la figure 3.9. Selon ce diagramme, quatre classes qui correspondent aux quatre notions de notre méta-modèle sont définies. Une interface est ajoutée à ces concepts de base. Elle fournit aux agents un service d'instanciation des groupes, dont la gestion est laissée à l'environnement. Les associations définissant les incompatibilités entre rôles et la conciliabilité sont transformées en liste de chaînes de caractères déterminant les types. Ces contraintes s'appliquent en effet aux types et pas aux instances.

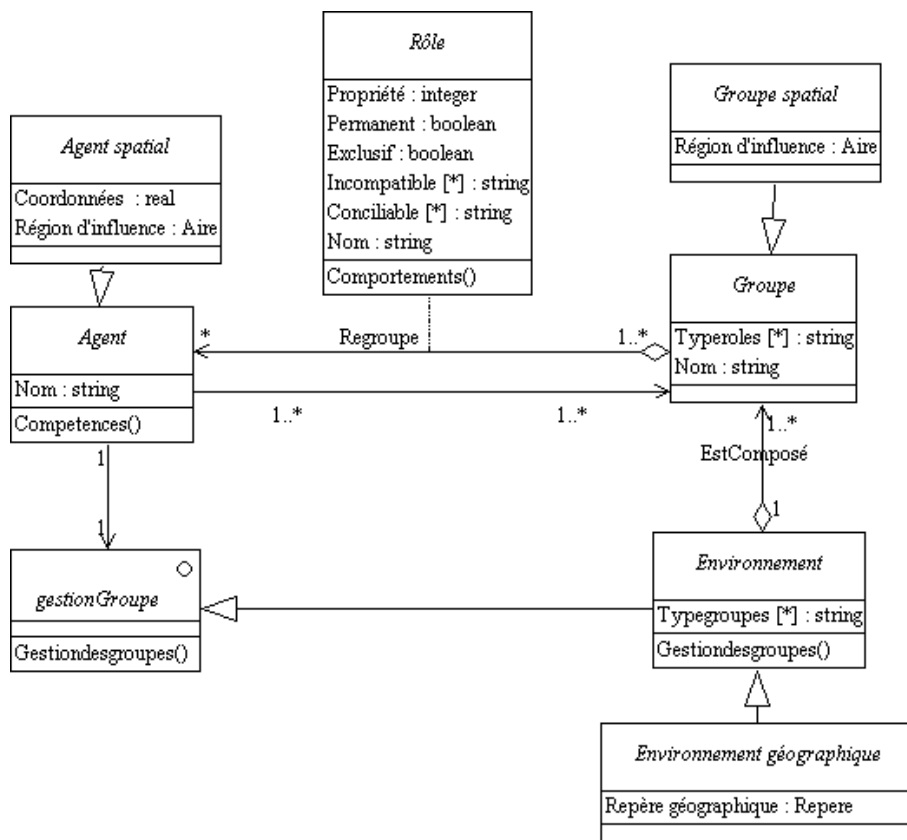


Figure 3.9 — Diagramme d'implémentation UML du modèle.

Classe *environnement*

L'instance de la classe *environnement* possède une liste des types de groupe et elle a les capacités de les gérer. Un ensemble de fonctions détermine les lois globales de l'environnement. L'unique instance de la classe environnement contient l'ensemble des instances des groupes qui ont été créés.

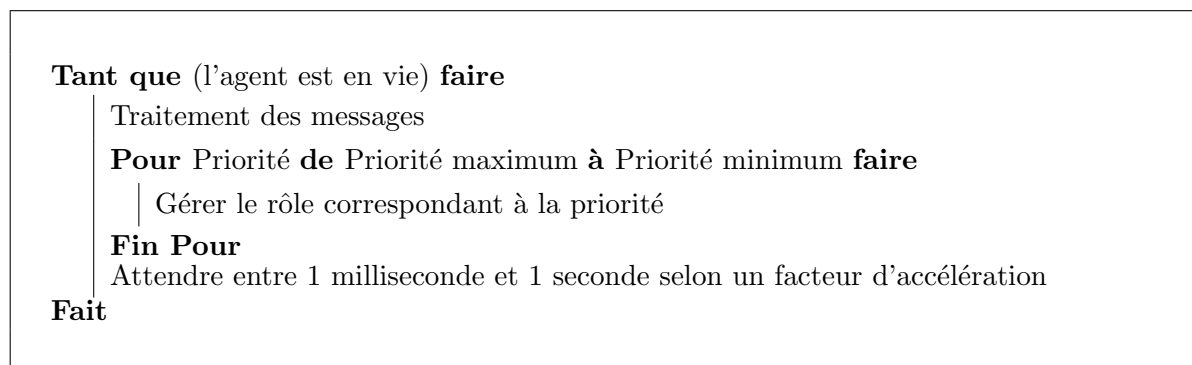
Classe *groupe*

Chaque instance de la classe *groupe* est identifiée par un nom et contient la liste des types

de rôles que les agents peuvent jouer en son sein. Elle dispose aussi de la liste de ses agents. Si le groupe est un groupe spatial, il détient, en plus des caractéristiques d'un groupe, une emprise sur l'espace géographique qui est sa région d'influence telle qu'elle est formalisée au chapitre 2. Tout agent spatial qui est situé dans cette emprise devient membre du groupe spatial. L'emprise du groupe spatial est alors augmenté de la région d'influence de l'agent spatial. Lorsqu'un agent quitte la région d'influence du groupe, il quitte, de ce fait, le groupe qui perd l'emprise que lui accordait la présence de l'agent.

Classe *agent*

Chaque instance de la classe *agent* est identifiée par un nom, et possède un ensemble de fonctions qui définissent ses capacités. Parmi celles-ci, l'agent est capable d'envoyer et de recevoir des messages ainsi que de les traiter, de prendre et d'abandonner une instance de rôle. Un agent est un *processus* au sens JAVA du terme, chaque agent est donc exécuté indépendamment des autres agents de façon pseudo-parallèle⁶. Il possède aussi la liste des instances de rôles qu'il joue ainsi que la liste des instances de groupes dans lesquels il se trouve. Il a de plus la capacité de créer des instances de groupe grâce à l'interface avec l'environnement. Lorsqu'un agent est un agent spatial, il possède aussi une emprise spatiale qui détermine sa zone d'influence et ses coordonnées géographiques.



Algorithme 1: Algorithme du fonctionnement générique des agents.

L'algorithme 1 présente la fonction principale des agents. Tout d'abord, l'agent consulte ses messages dans sa boîte aux lettres et les traite en commençant par le rôle le plus prioritaire. Cette dernière se présente sous la forme d'une liste des messages. Ensuite, les rôles sont exécutés par ordre de priorité. Enfin, l'agent est temporisé pour simuler le passage du temps et ne pas être tributaire de la seule vitesse d'exécution du processeur. Il est ainsi possible de maîtriser l'écoulement temporel de la simulation et avoir ainsi un temps simulé proportionnel au temps réel du phénomène. Le facteur d'accélération est déterminé par l'utilisateur en fonction des objectifs de sa simulation.

⁶Nous précisons pseudo-parallèle puisque la machine est monoprocesseur, il serait nécessaire pour obtenir du vrai parallélisme que chaque agent soit exécuté sur un processeur différent

Classe *rôle*

Chaque instance de la classe rôle est identifiée par un nom. Elle possède des attributs qui permettent d'identifier les caractéristiques du rôle comme sa permanence, son exclusivité et son degré de priorité. Elle est associée à deux listes dont une contient les noms des types de rôle avec lesquels le rôle est incompatible et l'autre, la liste des noms des types d'agent inconciliables. Enfin, un ensemble de fonctions décrit le comportement que le rôle apporte aux agents.

D'un point de vue implémentation, les plates-formes utilisent généralement un séquenceur pour désigner l'agent qui s'exécute. Dans le domaine de la navigation maritime, le nombre d'agents est relativement peu important, de l'ordre d'une centaine⁷, il est donc possible d'utiliser un processus pour chaque agent, ce qui permet de tendre vers une pseudo-autonomie⁸ informatique des agents.

Reprenons l'exemple du chalutier et du tanker. Il existe une correspondance directe entre les types précédemment définis et les classes. La classe *navire* hérite de la classe *agent*. Les classes *chalutier*, *tanker*, *pêche*, *endormi* héritent de la classe *rôle*. La classe *surveillance* hérite de la classe *groupe*. Enfin, la classe *environnement maritime* hérite de la classe *environnement géographique*. Autant d'instance de ces classes peuvent être créés afin de réaliser les simulations voulues.

3.3.5 Gestion des messages

Afin d'interagir et de communiquer, les agents ont besoin d'échanger des messages. Dans notre modèle, les messages sont relativement simples. Les agents et les rôles sont capables d'accéder aux messages pour les traiter. Chaque message comprend un en-tête et un corps. L'en-tête permet aux agents et aux rôles de savoir immédiatement si le message est compréhensible pour eux ou non. Dans le cas où le message serait incompréhensible, le rôle ou l'agent n'y fait pas attention et l'agent le supprime. Les agents possèdent tous une boîte aux lettres, dans laquelle tous les messages qui arrivent sont stockés puis traités en fonction de leur ordre d'arrivée. Les messages sont traités dans un premier temps par les rôles de l'agent dans l'ordre décroissant de leur priorité et dans un deuxième temps par l'agent lui-même. Un rôle a la possibilité de supprimer un message de la boîte aux lettres. Ainsi, ce rôle empêche les rôles suivants et l'agent de le traiter. Cette particularité permet principalement à des rôles qui possèdent une priorité importante, d'inhiber des rôles de moindre priorité, dont le comportement leur serait nuisible, s'ils traitaient le message.

Afin d'envoyer un message, un agent possède plusieurs stratégies. Chaque stratégie cor-

⁷Ce nombre correspond au nombre de navires que la station de surveillance de trafic d'une des plus dense du monde peut observer simultanément. Selon le discours lors de la conférence CETMEF2003, le commandant du CROSS Gris-Nez surveillant le Nord-Pas-de-Calais, le nombre de navire à surveiller simultanément peut atteindre les cent cinquante navires.

⁸Le terme pseudo-autonomie est employé ici pour spécifier le fait que chaque agent ne possède pas un processeur qui lui est spécifiquement dédié.

respond à un besoin particulier de l'agent. Les stratégies employées sont les suivantes :

- Envoi direct à un autre agent. En connaissant l'identifiant d'un agent particulier, l'agent l'envoie à un unique agent. Les autres agents n'ont alors pas connaissance du message. Un agent ne peut connaître que les agents qui font partie des même groupes que lui.
- Envoi de message à des agents jouant un rôle particulier. Tous les agents qui jouent ce rôle au moment où l'agent envoie son message le reçoivent. Le groupe est alors l'intermédiaire qui va répartir le message vers les agents destinataires. Seul les agents jouant ce rôle sont au courant du contenu et de l'envoi du message.
- Envoi de message à tous les agents d'un groupe particulier. Chaque agent qui appartient à ce groupe au moment de l'envoi va recevoir ce message. Le groupe est alors l'intermédiaire qui va répartir le message vers les agents destinataires. Comme pour les autres stratégies d'envoi de messages, seul les agents qui appartiennent à ce groupe ont conscience qu'un message a été envoyé.

Cette gestion des messages est classique et la plupart des plates-formes AGR l'utilisent. L'agent dispose ainsi des outils lui permettant de communiquer avec les autres agents.

Reprenons l'exemple du chalutier et du tanker. Quatre instances de *navire* sont créées ainsi qu'une instance de *surveillance*. Deux des instances de *navire* jouent le rôle *chalutier* et le rôle *pêche* et sont identifiés par les noms *chalutier1* et *chalutier2*. Les deux autres instances de *navire* jouent le rôle *tanker* et sont identifiés par les noms *tanker1* et *tanker2*. *tanker2* joue aussi le rôle *endormi*. L'instance de surveillance est nommée *s1*. Dans cet exemple, les navires sont capables d'envoyer et de recevoir trois types de message :

- MessageIdentification. Ce message permet de demander une identification à un navire ;
- MessageEvitement. Ce message demande aux navires qui le reçoivent de modifier leur cap ;
- S.O.S. Ce message est un appel au secours.

La figure 3.10 expose les différentes stratégies d'envoi de messages par un scénario. Le *tanker1* demande une identification au *tanker2* en s'adressant directement à lui. Puis il demande à toutes les instances de *navire* qui jouent le rôle *chalutier* de modifier leur cap. Ce message est transmis à *s1* qui retransmet directement aux agents concernés, en l'occurrence, *chalutier1* et *chalutier2*. Enfin, *tanker2* ayant des difficultés, il envoie à tous les agents de son groupe un S.O.S.. Le message transite par *s1* qui retransmet ensuite aux agents.

3.4 Application au domaine maritime

Cette section présente l'utilisation des concepts associés au modèle AGR, dans le cadre du domaine de la simulation de navigations en milieu maritime. Chaque agent, groupe et rôle sont étudiés en détail en exposant les diverses propriétés et les intérêts de chacun. La figure 3.11 montre le diagramme UML du modèle AGR appliqué au domaine maritime. Tous

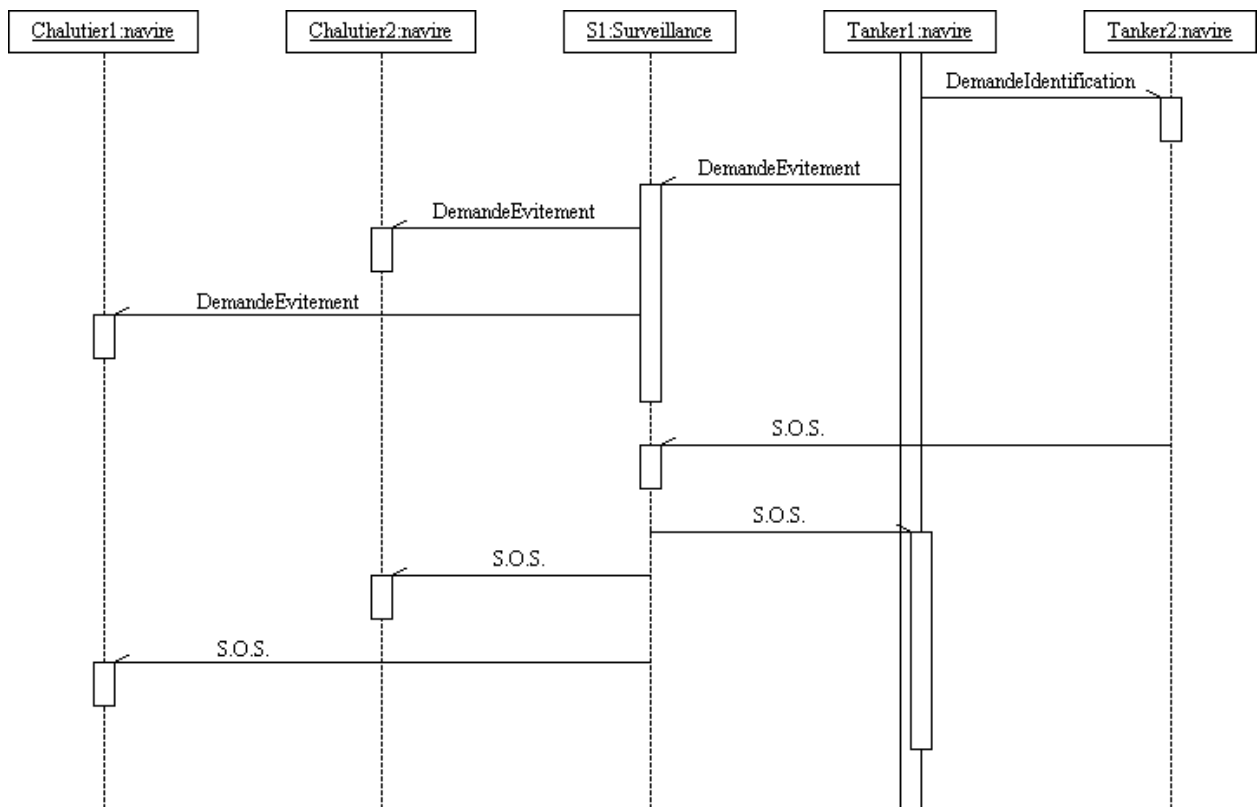


Figure 3.10 — Exemple d’envoi de message suivant différentes stratégies.

les attributs et toutes les fonctions utilisés pour l’application maritime ne sont pas présentés dans le diagramme UML.

3.4.1 Agents du domaine maritime

Plusieurs agents sont nécessaires pour décrire les interactions qui existent lors de la simulation de navigation maritime. En premier lieu, il faut modéliser les entités principales de la simulation. Ces entités sont celles qui effectuent la navigation : les navires. Les navires sont modélisés par le type d’agent *ship*. En deuxième lieu, les entités modélisées sont celles entrant en interaction avec les navires et dont le comportement est modifié au cours du temps ou par les actions des autres agents. Les infrastructures comme les bouées ou les phares, les autorités maritimes, l’espace géographique et les phénomènes naturels entre dans cette catégorie. Ces entités sont modélisées respectivement par le type d’agent *infrastructure*, *authority*, *spatial entity* et *natural phenomena*. Ces agents sont des agents spatiaux. Ils possèdent des coordonnées géographiques exceptées dans certains cas, le type d’agent *authority* et une capacité de raisonnement spatial. Ils sont décrits de la manière suivante :

- Les types d’agents *ship* modélisent toutes les entités navigantes quelque soit leur type : remorqueurs, tankers, chalutiers, cargos, navires de plaisance et bâtiments de guerre. Ces agents sont localisés par des coordonnées en latitude et en longitude et

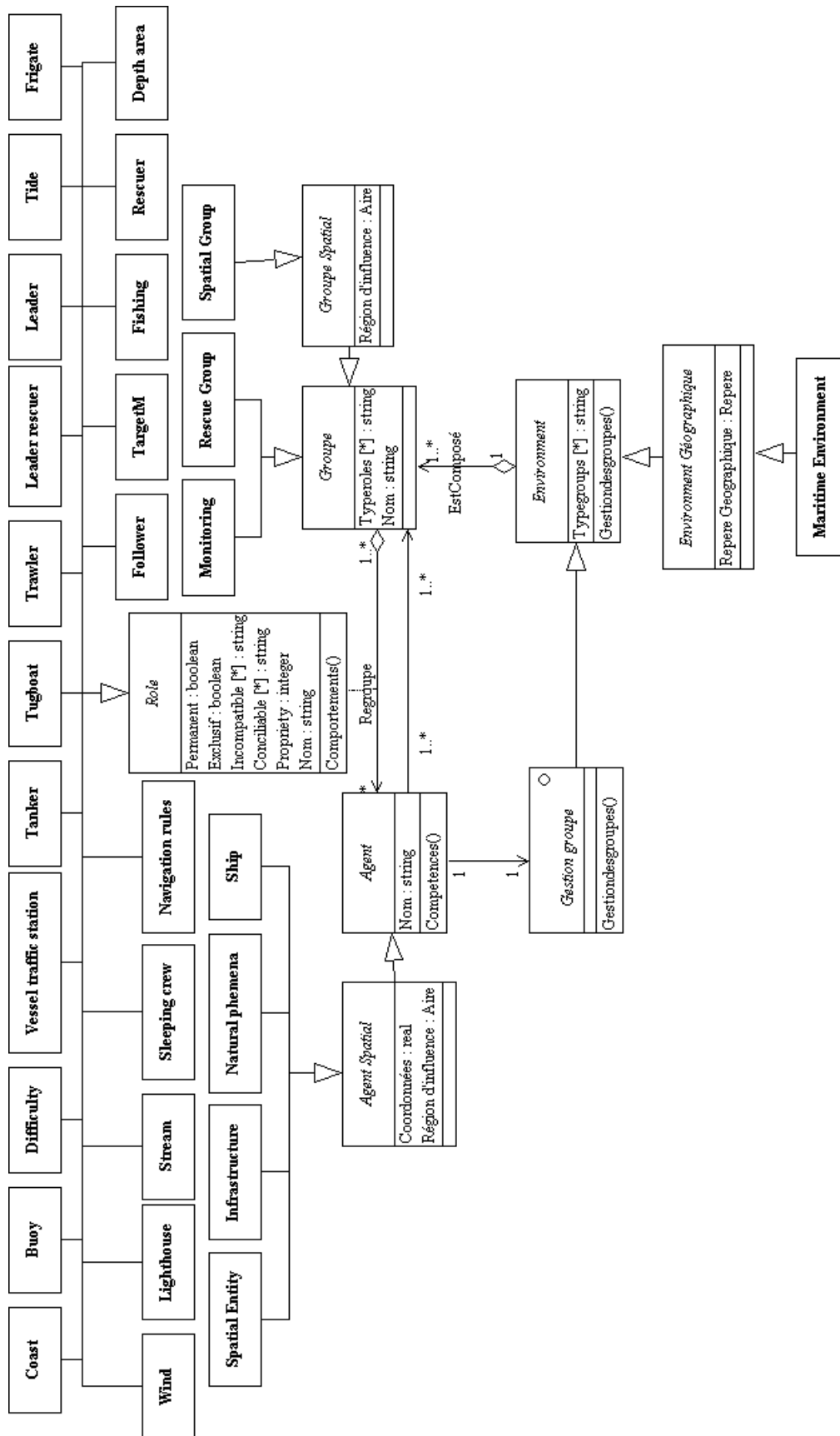


Figure 3.11 — Diagramme UML de notre modèle pour le domaine de la navigation maritime.

sont représentés par un objet ponctuel mobile. Ils possèdent un cap en degré et une vitesse en nœud. Le type de navire conditionne principalement le comportement et la trajectoire que ce dernier va réaliser lors de la simulation. Il est spécifié par un rôle permanent. Ces agents sont potentiellement en interaction avec tous les autres agents de la simulation.

- Les types d'agent *infrastructure* représentent les infrastructures réalisées par l'homme pour aider les navires à se diriger en mer. Comme pour les navires, elles sont localisées par une latitude et une longitude et sont ponctuelles. Elles sont modélisées par des agents afin qu'elles puissent modifier leurs comportements en fonction du temps (cycle jour/nuit) et éventuellement d'autres phénomènes naturels (ex : brouillard, forte houle). De plus, cela permet de ne pas centraliser tous les calculs au niveau des agents *ship* en les soulageant des calculs de détection. Chacune de ces infrastructures possède des caractéristiques spécifiques. Ainsi, les phares possèdent une signature lumineuse différente pour qu'ils soient aisément reconnaissables et différenciés par les marins. Ces agents sont uniquement en interaction avec les agents *ship* et les agents *natural phenomena*. Un phénomène naturel peut en effet modifier le comportement de l'infrastructure comme par exemple, une bouée lumineuse. Celle-ci va être allumée lors de l'apparition du brouillard.
- Les types d'agent *authority* modélisent les agents observant et agissant sur une zone géographique définie. Les autorités ont pour objectif de gérer le trafic maritime. Ces agents peuvent être localisés ou non. Ils interviennent de manière directe en envoyant des messages aux navires concernés ou de manière indirecte en dépêchant des unités mobiles comme des remorqueurs. Au moins deux types d'autorités sont à considérer. Celles dont les messages aux navires ne sont que des avis. Elles sont essentiellement employées à titre de surveillance et en temps que sauveteurs comme les CROSS (Centres Régionaux Opérationnels de Surveillance et de Sauvetage). Le deuxième type d'autorités peut arraisonner ou dérouter les navires. Les agents *authority* sont en interaction entre eux pour se coordonner et avec les agents *ship*.
- Les types d'agent *spatial entity* spécifient une partie de l'espace dans lequel les autres agents évoluent. Ils contiennent un ensemble d'entités spatiales. Chacune de ces entités est définie par un point, une polyligne ou un polygone. Ces entités spatiales correspondent notamment à la côte et aux surfaces d'isoprofondeur qui indiquent un intervalle de profondeur entre deux isobathes. Ces entités étant des agents, les phénomènes comme la marée vont pouvoir modifier les interactions qu'ils ont avec les agents *ship*. La modélisation de l'espace sous la forme d'agent permet aussi de distribuer les calculs, ces agents s'occupant de la gestion de l'anti-échouement. Ces agents sont en interaction avec les agents *ship* et les agents *natural phenomena*.
- Les types d'agent *natural phenomena* sont employés pour modéliser les phénomènes naturels tels que les courants, la marée et les phénomènes météorologiques comme le vent et le brouillard. Ces agents sont soit localisés, soit concernent toute la zone

géographique étudiée. Les données associées à ces phénomènes continus sont essentiellement discrétisées en utilisant des grilles régulières. Dans chaque cellule de la grille, se trouve une mesure du phénomène. Ces agents sont en interactions avec les agents *ship*, les agents *spatial entity* et les agents *infrastructure*.

3.4.2 Groupes et rôles du domaine maritime

Au sein de la simulation, plusieurs éléments structurent les interactions entre les agents et déterminent les rôles à leur disposition : les groupes. Les agents de la simulation ont tous un type d'interlocuteur commun, il s'agit des agents de type *ship*. Il est alors nécessaire d'avoir un groupe organisant ces interactions. Des interactions plus spécifiques entre agents sont possibles, par exemple les navires faisant partie d'une flottille de pêche ont des interactions spécifiques de même que les navires faisant partie d'une même formation militaire. En conséquence, l'application possède différents groupes et chaque groupe contient différents types de rôles.

Groupe *monitoring*.

Le groupe *monitoring* représente le groupe de tous les agents en interactions avec les agents *ship*. C'est le groupe générique de la simulation. Il est composé d'un nombre important de types de rôle. Le premier ensemble de type de rôles sont permanents et donnent pour l'essentiel des trajectoires particulières aux agents mobiles. Ces types de rôle sont les suivants :

- Le type de rôle *tanker* spécialise le comportement de l'agent en lui adjoignant les caractéristiques d'un tanker comme la trajectoire qui est linéaire avec peu de changements de cap. Le comportement réel d'un tanker est ainsi modélisé de manière simple, en prenant en compte le peu de manœuvrabilité dont il dispose ;
- Le type de rôle *trawler* donne le comportement d'un chalutier qui n'est pas entrain de pêcher à un agent *ship*. Un chalutier cherche la zone où il souhaite pêcher ;
- Le type de rôle *tugboat* (remorqueur) donne à un agent *ship* le rôle de remorqueur. Il inhibe toute réception de message ne provenant pas d'une infrastructure qui joue le rôle de *vessel_traffic_station*. Il ne répond en effet qu'aux ordres de celle-ci ;
- Le type de rôle *frigate* symbolise le comportement d'un navire militaire ;
- Le type de rôle *targetM* donne la possibilité à l'agent *ship* d'avoir une route formée de plusieurs points de passage. Ce type de rôle permet de simuler le suivi de route. Cette dernière est généralement créée lorsqu'un navire prépare sa traversée ;
- Le type de rôle *vessel_traffic_station* est un rôle permanent qui donne à un agent *infrastructure* un comportement de station de surveillance. Il va intervenir lorsqu'un navire est en difficulté (i.e. joue le rôle *difficulty*) en envoyant un agent jouant le rôle *tugboat*.

Les deux types de rôle qui suivent sont temporaires et modifient en profondeur le comportement de l'agent. Ces rôles, grâce à leur priorité élevée peuvent inhiber provisoirement les

comportements des rôles ayant une priorité plus faible. Ces rôles sont donc qualifiés de rôles inhibiteurs. Ces inhibitions sont réalisées sur toutes les ressources et capacités qu'un agent possède. Ils sont décrits de la manière suivante :

- Le rôle *sleeping_crew* (équipage endormi) est un rôle exclusif. Il empêche toute réception de messages pour l'agent. Ce rôle simule les comportements d'un navire qui ne répond à aucun message provenant des autorités maritimes. Il ne fait plus attention à son environnement. Ce comportement peut amener le navire à s'échouer ou à entrer en collision avec un autre navire ;
- Le rôle *navigation_rules* oblige l'agent à respecter les règles de navigation, en ce qui concerne la partie évitement de collision. Ce rôle intègre les mécanismes de raisonnement spatiaux présentés dans le chapitre précédent.

Pour les entités spatiales non mobiles et naturelles, deux types de rôle définissent leur comportement. Cette catégorisation peut facilement être élargie pour étoffer la simulation et le rendre plus réaliste. Ils sont permanents. Leur description est la suivante :

- Le type de rôle *depth_area* spécifie le comportement des agents *spatial entity*. Il gère des zones de profondeur et envoie un message aux agents dont le tirant d'eau est proche de la limite d'échouement ;
- Le type de rôle *coast* donne aux agents *spatial entity* la capacité de détecter les agents *ship* qui risquent de s'échouer et leur envoie un message pour les prévenir.

Les types de rôle présentés ci-après correspondent à des phénomènes naturels qui interagissent avec les navires. Ils couvrent toute la zone géographique utilisée dans la simulation. Ce sont des types de rôle permanents. Trois types de rôles sont définis dans le modèle : *wind*, *stream* et *tide*. Ils correspondent respectivement à la capacité d'agent de type *natural phenomena* de simuler : le vent, le courant marin et les phénomènes de marée sur une zone géographique particulière.

Les deux derniers types de rôle de ce groupe concernent les comportements des infrastructures. Ils sont permanents. Ce sont les types de rôles *buoy* et *lighthouse*. Ils donnent respectivement les comportements de bouée et de phare à un agent *infrastructure*. En Combinant un rôle *bouée* avec un rôle *lighthouse*, un agent possède le comportement d'une bouée lumineuse.

D'autres rôles peuvent être ajoutés en fonction de l'objectif recherché pour la simulation.

Le groupe *task force*.

Le groupe *task force* modélise les interactions de navires militaires en formation. Dans ce groupe, les agents *ship* jouent les rôles *leader* ou *follower*. Ces types de rôles vont créer une structure hiérarchique entre les agents de ce groupe. Des agents subalternes sont sous le commandement d'un agent commandant. Les agents coordonnent leurs actions en suivant les ordres de ce dernier. Le premier navire qui intègre ce groupe est considéré comme étant le leader. Ces types de rôles sont les suivants :

- Le type de rôle *leader* donne à un agent *ship* la possibilité de diriger d'autres agents qui possèdent les rôles *follower* par l'envoi de messages. Un seul rôle leader est présent par groupe *task force* ;
- Le type de rôle *follower* inhibe les autres rôles que l'agent peut réaliser. Un agent *ship* qui joue ce rôle reçoit ses ordres de l'agent *ship* qui possède le rôle *leader*.

Le groupe *flotilla*.

Le groupe *flotilla* symbolise les interactions entre les chalutiers. Un seul rôle est disponible dans ce groupe. Il s'agit du type de rôle *fishing*. Il contraint le comportement de l'agent qui le joue et plus particulièrement son déplacement. Un agent *ship* qui possède un tel rôle va avoir une trajectoire simulant l'acte de pêche.

Le groupe *rescuer team*.

Le groupe *rescuer team* représente les interactions entre les agents qui jouent le rôle de sauveteur, pour organiser l'aide qui doit être apporté aux navires en difficulté. Ces types de rôle tout comme pour le groupe *task force*, structurent les agents qui les jouent. Un agent commande et les autres agents du groupe se coordonnent en suivant ses ordres. L'agent qui reçoit le type de rôle *rescuer leader* est le premier agent de type *navire* qui entre dans le groupe. Si un agent de type *authority* est impliqué, il prend le type de rôle *rescuer leader* d'office. Leur description est la suivante :

- Le rôle *difficulty* est un rôle exclusif qui inhibe toute possibilité de mouvement. L'agent *ship* qui joue ce rôle est considéré comme étant à la dérive. Il envoie des S.O.S. à tous les agents qui se trouvent dans la même zone. Les agents souhaitant le secourir viennent alors dans le groupe créé par l'agent qui possède ce rôle ;
- Le type de rôle *rescuer leader* coordonne l'aide apporté aux navires en difficulté, c'est un rôle exclusif. Un seul de ce type de rôle peut être instancié par groupe ;
- Le type de rôle *rescuer* est exclusif et inhibe toutes les tâches qu'un agent *ship* réalise pour qu'il se rende à la localisation fournie par le message S.O.S. qu'un autre agent à envoyer.

Le groupe *spatial*.

Le groupe *spatial* modélise les regroupements spatiaux entre les navires. De tels groupes se forment lorsque des navires se trouvent proches les uns des autres. Le type de rôle *spatial object* exprime la présence d'un navire dans un groupe spatial. Ce rôle permet de savoir facilement si un agent est déjà dans un groupe spatial. La construction du groupe spatial est réalisée selon la démarche spécifiée dans le chapitre 2. Chaque navire possède les zones d'influences isotropes *proche*, *distant* et *lointain*. Si un navire se trouve dans la zone de *proche* d'un autre navire alors il forme un groupe. Si un des deux navires est déjà dans un groupe, l'autre l'y rejoint. Enfin, si les deux navires sont déjà dans deux groupes différents, les deux fusionnent. Lorsqu'un agent quitte les régions d'influence des membres de son groupe spatial, il n'en fait

plus partie et perd son rôle. Dans le cas où un groupe se sépare en deux sous-groupe, un nouveau groupe est créé.

3.4.3 Conciliabilité entre rôles et agents et incompatibilité entre rôles

Une fois les types d'agent, les types de groupe et les types de rôle nécessaires à la simulation maritime définis, il faut spécifier les conciliabilités entre agents et rôles et les incompatibilités entre rôles. Ces liens peuvent s'exprimer graphiquement en UML grâce à l'OCL (Object Constraints Language). Un exemple de l'utilisation de cette notion est montrée par la figure 3.12. Toutefois, au vu du nombre de liaison nécessaire, les liens d'incompatibilité et d'inconciliabilité sont exprimés par deux tableaux.

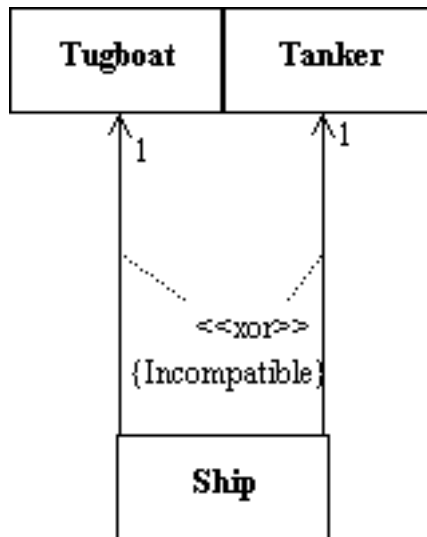


Figure 3.12 — Exemple d'utilisation d'OCL pour définir les contraintes d'incompatibilité.

Le tableau 3.5 montre les liens d'inconciliabilité des types de rôle avec les types d'agent. Si un lien existe sur la figure en un type de rôle R_i et le type d'agent A_i alors $inconciliabilité(A_i, R_i) = 1$. Prenons par exemple le type de rôle *tanker*. Ce type de rôle est inconciliable avec notamment les types d'agents *authority* et *infrastructure*. Ces deux types d'agents n'ont pas la capacité de jouer ce rôle, contrairement au type d'agent *navire* qui lui en est capable.

Le tableau 3.6 montre les liens d'incompatibilité entre les types de rôle sous forme de graphe. Seul les types de rôle incompatibles avec au moins un autre type de rôle sont représentés sur cette figure. Prenons l'exemple un type d'agent *navire* et les types de rôle *tugboat*, *rescuer*, *leader rescuer* et *wind*. L'agent de type *navire* peut jouer simultanément les types de rôle *tugboat* et *rescuer*, par contre il ne peut pas jouer les types de rôle *tugboat*, *rescuer* et *leader rescuer* à un même instant puisque ces deux derniers sont incompatibles.

Considérons les liens de conciliabilité et d'incompatibilité en même temps. Deux types de rôle conciliable avec deux types d'agents différents et inconciliables avec tous les autres

	Vessel traffic station	Leader rescuer	Frigate	Tanker	Difficulty	Leader	Navigation rules	Rescuer	Trawler	Sleeping crew	TargetM
Authority	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ship	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Natural phenomena	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Spatial entity	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Infrastructure	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fishing	Tugboat	Follower	Lighthouse	Buoy	Depth area	Coast	Stream	Wind	Tide	
Authority	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ship	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
Natural phenomena	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
Spatial entity	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	
Infrastructure	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	

Tableau 3.5 — Inconciliabilité entre les rôles et les agents du domaine maritime.

	Rescuer	Leader Rescuer	Wind	Stream	Tide	Coast	Depth area	Tugboat	Trawler	Tanker	TargetM	Frigate	Leader	Follower
Rescuer	×	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rescuer leader	1	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wind	0	0	×	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stream	0	0	1	×	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tide	0	0	1	1	×	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coast	0	0	0	0	0	×	1	0	0	0	0	0	0	0
Depth area	0	0	0	0	0	1	×	0	0	0	0	0	0	0
Tugboat	0	0	0	0	0	0	0	×	1	1	1	1	0	0
Trawler	0	0	0	0	0	0	0	1	×	1	1	1	0	0
Tanker	0	0	0	0	0	0	0	1	1	×	1	1	0	0
TargetM	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	×	1	0	0
Frigate	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	×	0	0
Leader	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	×	1
Follower	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	×

Tableau 3.6 — Incompatibilité entre les rôles du domaine maritime.

types d'agent n'ont pas besoin de définir des liens d'incompatibilité, ils ne pourront en effet jamais être joués simultanément par un même agent. Il n'existe par exemple pas de lien d'incompatibilité entre le type de rôle *tugboat* et le type de rôle *wind* puisque ces deux types de rôle n'ont pas de type d'agent en commun avec lesquels ils sont conciliables.

3.4.4 Priorités des rôles

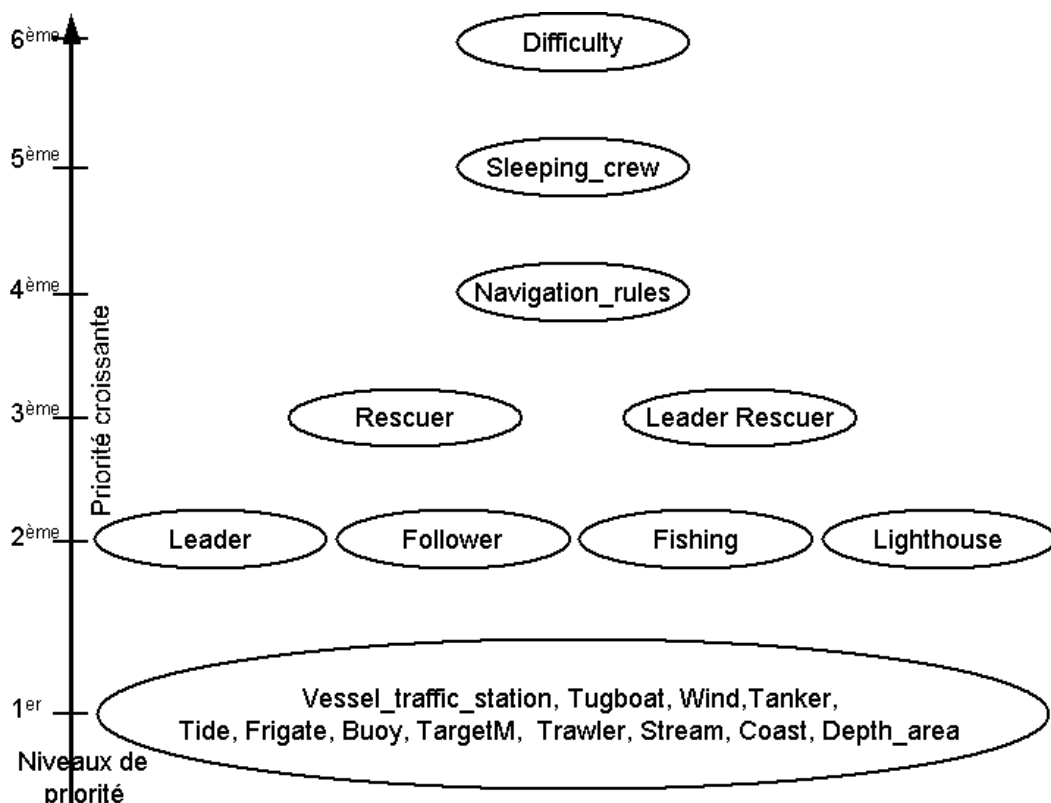


Figure 3.13 — Priorités des rôles.

Les priorités des rôles définies dans le cadre de la navigation maritime sont schématisées par la figure 3.13. Elle présente l'ordre des priorités des rôles. Cet ordre est défini lors de la phase de conception de la simulation. Au cours de l'exécution, les priorités peuvent varier. Cette variation est généralement un échange de l'ordre des priorités entre deux rôles dont les niveaux de priorité sont contigus. Le rôle *rescuer* possède une priorité plus basse que le rôle *navigation rules*. Il est néanmoins possible d'inverser cet ordre. Un navire s'attache alors plus à aider un autre navire en difficulté qu'aux règles de navigation. L'agent va alors modifier les priorités des deux rôles pour refléter ce fait. Le rôle *rescuer* est à ce moment là, plus prioritaire que le rôle *navigation rules*. Les rôles qui sont aux même niveaux de priorité, sont des rôles incompatibles entre eux ou ne possédant aucun agent conciliable en commun qui puissent les jouer.

3.5 Conclusion

En navigation maritime, les navires ont des comportements hétérogènes qui peuvent changer au cours du temps ou si une situation particulière l'exige. Ces comportements entraînent la formation de groupes qui organisent les agents. De même, les positions relatives des entités spatiales créent des structures organisationnelles fondées sur les groupes spatiaux. Il est donc essentiel, dans le but de simuler finement les trajectoires de telles entités spatiales, de tenir compte de ces phénomènes : la présence d'un environnement, les comportements hétérogènes qui sont susceptibles de changer au cours du temps et les structures organisationnelles.

Les modèles agents basés sur les paradigmes organisationnels et ceux de rôles sont adaptés à la modélisation de ces types de simulations. Il existe un nombre important de modèles qui emploient ces paradigmes. A travers un état de l'art de ces modèles, nous avons déterminé plusieurs raffinements. Ces raffinements concernent notamment, l'ajout d'un environnement, modélisé explicitement par des agents, et de mécanismes de gestion d'acquisition des rôles par les agents et de gestion des conflits entre les rôles en utilisant des contraintes globales et non locales. Ces gestions sont obtenues en considérant les rôles dans leur globalité et non plus en utilisant un sous-ensemble des caractéristiques des rôles. Ces extensions comprennent les notions suivantes :

- La notion de rôle *permanent* apporte un principe de *spécialisation* des agents en leur ajoutant un comportement de base conservé tout au long de la simulation ;
- La notion de rôle *exclusif* donne aux agents la faculté de se concentrer sur une tâche importante de manière exclusive en faisant abstraction des autres comportements qui lui sont associés, excepté ceux qui sont permanents ;
- La notion d'*incompatibilité* entre rôles qui empêche un agent de jouer de manière simultanée deux rôles dont les comportements associés ne sont pas compatibles ;
- La notion d'*inconciliableté* entre un agent et un rôle qui interdit à un agent de jouer un rôle même s'il en a les capacités.
- Les *priorités* qui ordonnent les rôles qu'un agent joue. Elles permettent d'éviter les conflits et désignent les rôles les plus prioritaires pour l'agent à chaque instant en fonction des perceptions de l'agent et du raisonnement qu'il peut mener.

Correspondance Implémentation/ Modèle	Contraintes d'acquisition	Gestion des conflits entre rôles	Relations rôles/capacités	Présence d'un environnement
Oui	Oui, par l'incompatibilité, l'exclusivité, la permanence, la conciliabilité	Oui par, les priorités	Présences des capacités dans les rôles et les agents	Oui, composé des agents

Tableau 3.7 — Synthèse de notre modèle AGR.

Le tableau 3.7 fait la synthèse des apports de notre modèle en utilisant les mêmes critères

que ceux utilisés dans la section 3.2. Notre modèle apporte des améliorations par rapport aux modèles existants, en terme de gestion de rôles qu'il enrichit par des mécanismes génériques essentiels en simulation. Ces mécanismes donnent un cadre simple, flexible et dynamique à la gestion des rôles. Ils permettent d'une part, aux agents de se focaliser sur les éléments primordiaux de leur comportement pour achever leur but et d'autre part, de gérer efficacement des rôles antagonistes. Les agents agissent et interagissent en suivant leur comportement dans un environnement dont ils sont eux-mêmes les composants. Cette modélisation explicite de l'environnement par les agents renforce l'intégration de l'aspect géographique, exprime la dynamique du milieu et encapsule des lois locales qui contraignent les actions et interactions des agents. Ce modèle est bien adapté à la simulation de navigation maritime.

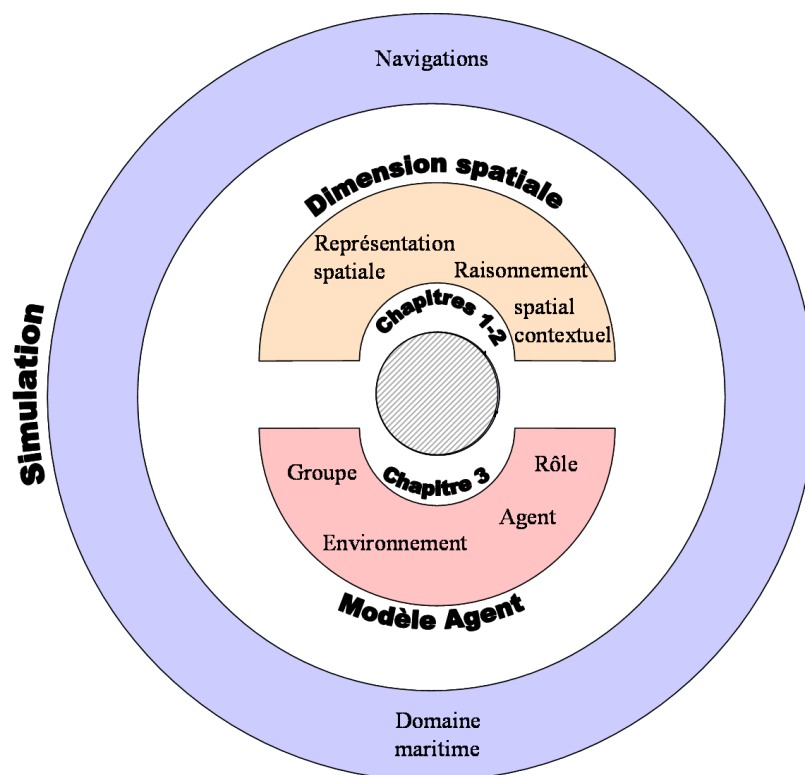


Figure 3.14 — Rappel des concepts développés aux trois premiers chapitres.

Le modèle agent et la dimension spatiale sont désormais spécifiés (figure 3.14). Afin d'expérimenter ce modèle et son intégration avec le raisonnement spatial défini au chapitre 2 dans le cadre de la simulation de navigations maritimes, le chapitre suivant présente la réalisation d'un prototype.

4 Conception d'un outil intégré de simulation de navigations maritimes

La validation des concepts de raisonnement et de modélisation introduits pour représenter une dynamique de navigation maritime passe idéalement par la réalisation d'un prototype. Ce prototype nommé TRANS simule les navigations maritimes et il répond au besoin de développement de nouveaux outils tendant à d'améliorer la sécurité maritime. Les outils actuels ne possèdent en effet pas ou peu de mécanismes d'anticipation et de simulation de situations critiques. La figure 4.1 montre les différents éléments fonctionnels qui correspondent aux différents composants du prototype TRANS. Le prototype TRANS intègre en particulier les éléments et les composants du raisonnement spatial. Le système afin de pouvoir être manipulé par un opérateur humain, offre une interface homme/machine. Cette interface fournit différentes fonctionnalités comme l'intégration de données géographiques normalisées, l'ajout d'agents et la paramétrisation de la dynamique temporelle des simulations. Une fonctionnalité d'interopérabilité est nécessaire afin de permettre à TRANS de communiquer avec des applications externes dans le but d'obtenir des données en temps réel sur les positions et les mouvements des navires.

La première section de ce chapitre présente différentes approches permettant d'intégrer le modèle multi-agents et le raisonnement spatial qualitatif, et détermine laquelle de ces approches est la mieux adaptée pour la simulation de navigations maritimes. La deuxième section présente l'interface et les diverses fonctionnalités accessibles. Elle introduit aussi la composante de gestion des données géographiques par les agents. La troisième section illustre et aborde les potentialités de TRANS à partir de divers scénarios de navigations maritimes. La quatrième section évalue les performances du prototype. La cinquième section aborde l'intégration de TRANS au sein des systèmes et des applications actuellement utilisés dans le cadre de la navigation maritime. Enfin, la dernière section résume notre contribution et aborde les perspectives ouvertes par notre recherche.

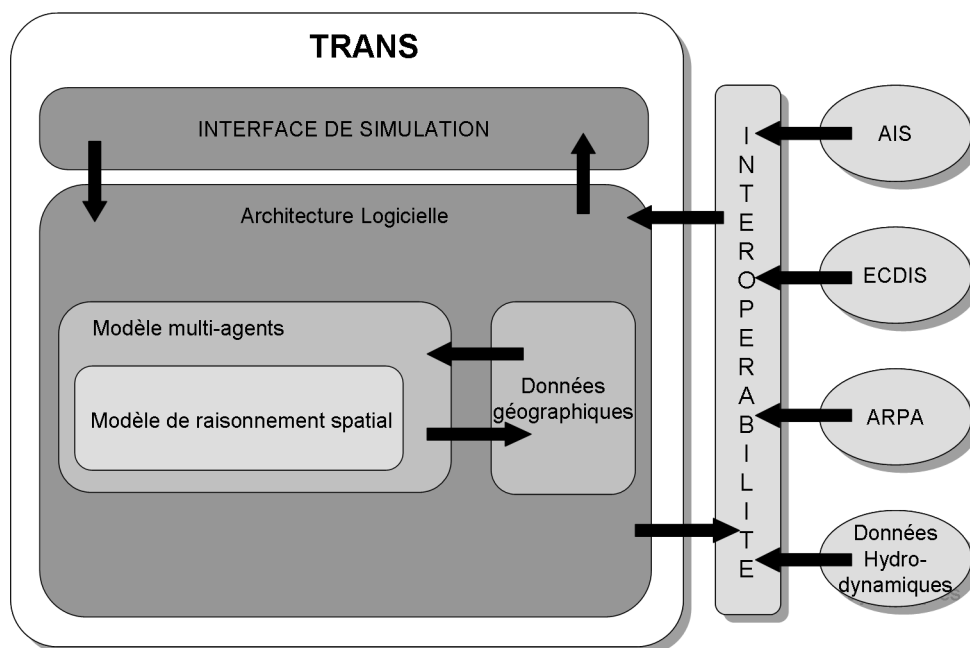


Figure 4.1 — Architecture du prototype TRANS.

4.1 Intégration du raisonnement spatial au sein du système multi-agents

Afin que les agents puissent disposer de comportements issus de la perception de leur environnement, un couplage fort entre le raisonnement spatial et les agents est nécessaire. Nous présentons et étudions dans cette section les approches de couplage possible avec notre modèle AGR, et leur intégration potentielle au sein du prototype TRANS. Le raisonnement spatial utilisé est celui défini dans le chapitre 2.

4.1.1 Approches intégrant le raisonnement spatial au sein des agents

Dans le chapitre 2, nous avons constaté que le raisonnement spatial qualitatif utilisé par un agent devait s'adapter au contexte. Le comportement de l'agent lui-même contribue à la définition de ce contexte. Les rôles, et plus particulièrement les changements de rôles, vont alors modifier le contexte et par voie de conséquence la nature du raisonnement spatial. Afin d'intégrer le raisonnement spatial au sein des agents, nous avons identifié plusieurs approches possibles : l'approche monolithique, l'approche composant, l'approche indépendante et une combinaison des approches composant et indépendante.

Approche monolithique

L'approche monolithique considère que l'agent, et uniquement l'agent, est entièrement responsable du raisonnement spatial. Le partitionnement nécessaire à la définition des relations utilisées par le raisonnement spatial est défini statiquement pour chaque agent. Il n'évolue

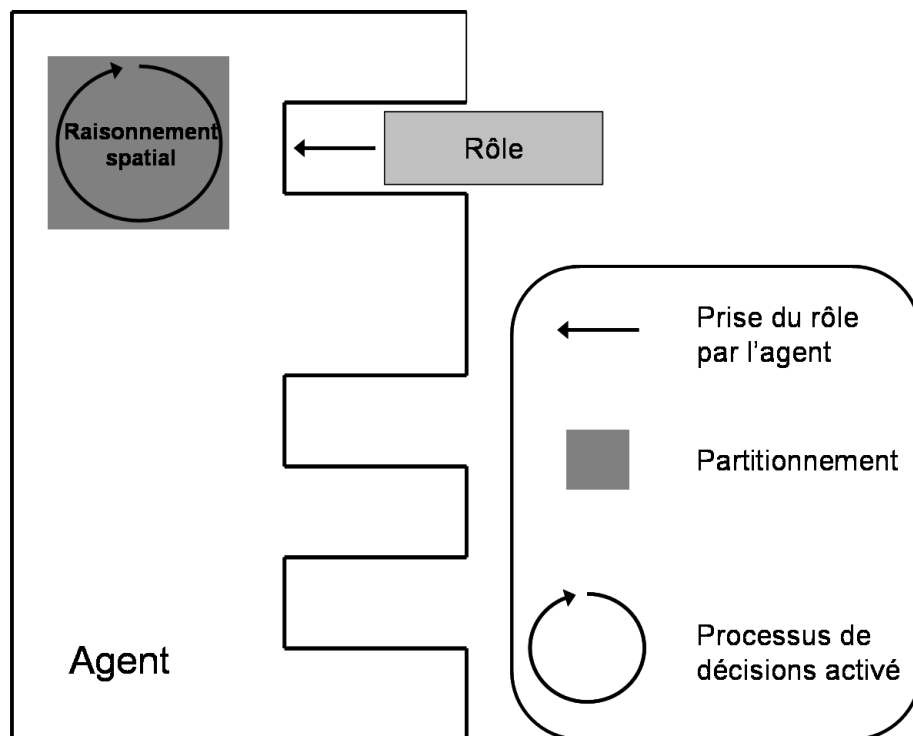


Figure 4.2 — Principe de l'approche monolithique.

donc pas au cours de la simulation. Les processus de décision associés à chaque région du partitionnement sont uniquement activés si et seulement si le rôle qui autorise ce comportement est joué par l'agent. La figure 4.2 schématise cette approche. Cette figure illustre l'approche monolithique où l'agent possède un raisonnement spatial qualitatif. Le raisonnement spatial associé est symbolisé dans la figure par un carré intégré dans le "corps" de l'agent défini lors de sa création. La prise d'un nouveau rôle n'en modifie pas la structure du raisonnement. Cette approche bien que fonctionnelle, oblige à définir pour chaque agent le raisonnement spatial qu'il est susceptible d'utiliser durant toute sa durée de vie. Ce raisonnement spatial est initialisé en identifiant le mode raisonnement spatial commun aux rôles jouables par l'agent durant toute sa vie. L'inconvénient de cette approche réside dans le fait que l'agent possède un raisonnement spatial surchargé d'éléments pas forcément utiles et imposant la résolution d'incompatibilité dans le raisonnement.

Approche composant

Dans l'approche composant l'agent possède un raisonnement spatial minimal défini a priori par le concepteur. Ce raisonnement sert de base à l'agent pour analyser sa perception et en déduire les actions appropriées. Lorsqu'un rôle est pris par l'agent, il apporte si besoin des éléments modificateurs qui vont influencer le raisonnement spatial, les relations spatiales et modifier le partitionnement lié. Afin de modéliser les éléments modificateurs, chaque rôle possède un partitionnement local qui symbolise le raisonnement spatial associé. Chaque raisonnement est symbolisé dans la figure 4.3 par des figures géométriques illustrant

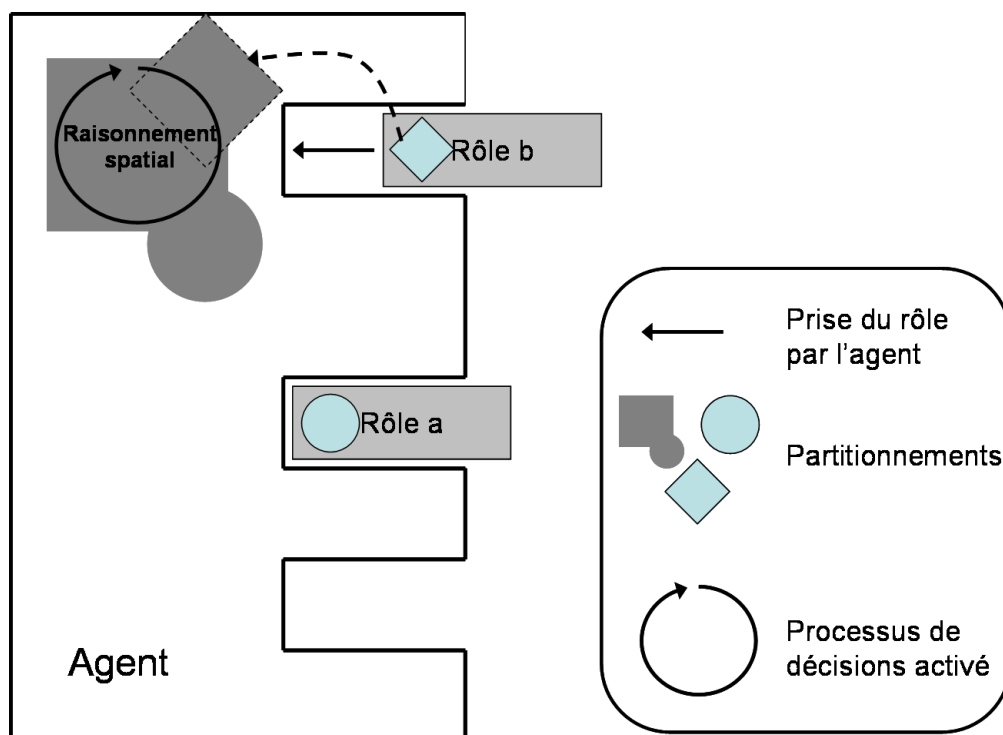


Figure 4.3 — Principe de l'approche composant.

les différences des partitionnements associés. Ce raisonnement spatial local va alors se coupler avec celui que l'agent a déjà. Le raisonnement est donc la combinaison du raisonnement minimal et des raisonnements locaux des rôles. Réciproquement, lorsqu'un agent perd un rôle, les éléments modifiant le raisonnement spatial liés à ce rôle sont retirés. La figure 4.3 expose cette approche. Dans cet exemple, un agent joue un rôle *a* et prend un rôle *b*. Avant de prendre le rôle *b*, le raisonnement spatial utilisé par l'agent est composé du raisonnement minimal et de celui fourni par le rôle *a*. Lorsque l'agent prend le rôle *b*, le raisonnement spatial de ce rôle s'ajoute à celui de l'agent. Cet ajout se caractérise par le couplage des partitionnements liés au raisonnement du rôle pris et à celui de l'agent. Cette approche est relativement complexe à mettre en œuvre. Elle nécessite de connaître l'ensemble des combinaisons des raisonnements spatiaux provenant des rôles que l'agent a la possibilité de jouer simultanément. La combinaison des raisonnements spatiaux est un problème complexe, les situations possibles sont nombreuses et ne sont toujours pas résolubles par des opérateurs spatiaux simple comme l'intersection et l'union et des conflits sont aussi possibles entre ces raisonnements. Il est de plus impossible avec cette approche de considérer des rôles dont le raisonnement spatial est indépendant de ceux des autres rôles. Le raisonnement spatial apporté par un rôle est en effet toujours couplé aux autres raisonnements spatiaux que l'agent possède. Cette approche est donc inadéquate à la modélisation de processus de décision indépendants.

Approche indépendante

Dans l'approche indépendante, les rôles tout comme les agents possèdent leur propre parti-

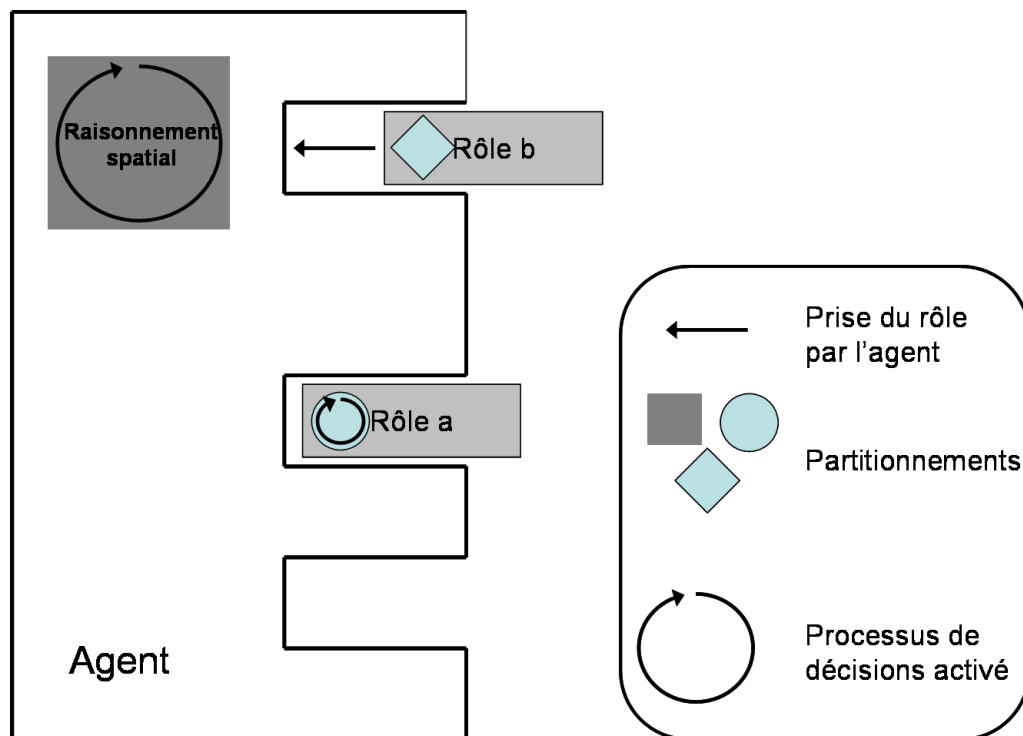


Figure 4.4 — Principe de l'approche indépendante.

tionnement associé à un processus de décision indépendant. Il est ainsi possible de définir un raisonnement spatial générique à un type d'agent. De ce fait, les raisonnements spatiaux sont donc assujettis aux priorités des rôles et peuvent éventuellement être inhibés comme les rôles. Le raisonnement du rôle le plus prioritaire est considéré en premier suivi des raisonnements des rôles suivants selon l'ordre décroissant des priorités. Enfin, le raisonnement spatial de l'agent est le dernier. L'atout de cette approche est sa relative facilité de mise en œuvre tout en se gardant d'inclure dans l'agent des éléments rarement utilisés. La figure 4.4 schématise un exemple de cette approche. Dans cet exemple, l'agent possède un raisonnement spatial et joue un rôle *a* qui en possède un autre. Ces deux raisonnements ont leur processus de décision exécutés indépendamment, sauf cas d'inhibition par le plus prioritaire. L'ensemble du raisonnement spatial de l'agent se limite à un ensemble de raisonnements indépendants.

Approche composant et indépendante

Cette approche combine les deux précédentes. Comme pour toutes les approches présentées, l'agent possède un partitionnement défini a priori par le concepteur. Le concepteur a alors le choix des stratégies à adopter pour chaque rôle, soit les partitionnements et les processus de décisions associées sont combinés avec celui de l'agent, soit comme pour l'approche indépendante, ils sont considérés indépendamment des autres. Une dernière solution consiste à laisser décider l'agent de la meilleure stratégie à adopter lorsqu'il prend un rôle en utilisant, par exemple, des techniques héritées de l'"immunocomputing" [de Castro et Timmis, 2002]. Ces techniques utilisent la métaphore des mécanismes de reconnaissance présents dans les cel-

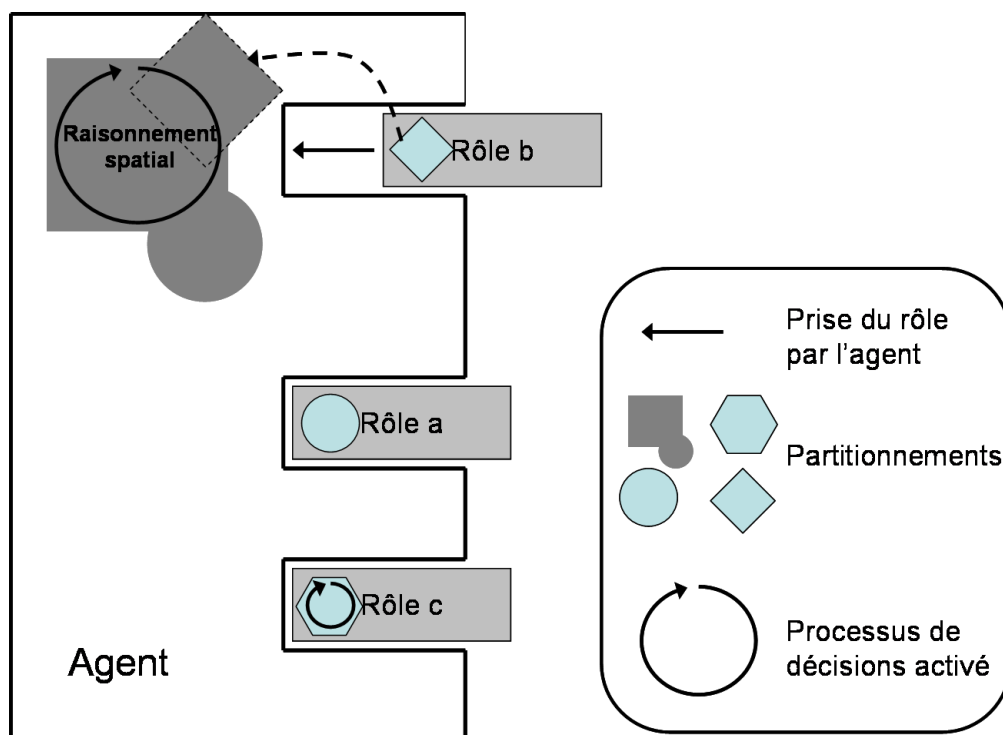


Figure 4.5 — Principe de l'approche combinant les approches composant et indépendante.

lules immunitaires. Certains raisonnements peuvent alors uniquement s'associer s'il existe des possibilités de liaisons comme c'est le cas entre un virus et un anti-corps. L'agent peut ainsi sélectionner de manière automatique les appariements entre les raisonnements. L'approche est ainsi rendue adaptative en permettant aux rôles d'en changer. Ce changement s'effectue en fonction des caractéristiques internes de l'agent (ex : les rôles qu'ils possèdent) lors de leur acquisition ou même lorsque l'agent les joue si sa perception et ses actions l'exigent. La figure 4.5 présente un exemple de cette approche. L'agent joue trois rôles. Deux rôles *a* et *b* utilisent l'approche composant et le troisième, le rôle *c*, utilise l'approche indépendante. Le processus de décision associé au raisonnement spatial du rôle *c* se fait totalement indépendamment de la combinaison des raisonnements spatiaux des rôles *a*, *b* et de l'agent. Un mécanisme, que nous n'étudierons pas dans cette thèse, est aussi nécessaire afin de savoir quel raisonnement est exécuté en premier entre celui du rôle *c* ou de la combinaison des raisonnements du rôle *a*, du rôle *b* et de l'agent. Une méthode pour gérer les conflits entre raisonnement est d'utiliser la méthode indépendante pour chacun des raisonnements qui sont en conflit. Plusieurs fonctions comme la somme ou la moyenne des priorités peuvent aussi être envisagées. Cette approche est la plus complète mais elle hérite de l'approche composant de sa complexité de mise en œuvre à laquelle vient s'ajouter la complexité de son aspect adaptatif et la nécessité de gérer les conflits potentiels. Elle demande de plus un effort supplémentaire au concepteur qui doit définir pour chaque rôle, dans le cas où cela est possible, les deux approches et les mécanismes permettant le changement d'approche.

4.1.2 Discussion

Nous choisissons d'utiliser l'approche indépendante pour le couplage entre notre modèle de raisonnement spatial et notre modèle multi-agents. Cette dernière répond en effet aux critères (dynamique et évolutivité du raisonnement spatial) que nous nous sommes fixés. Le raisonnement spatial de l'agent peut être dynamiquement modifié au cours de sa vie sans que les éléments composant ce raisonnement soient définis a priori au sein de l'agent par le concepteur. Les raisonnements associés aux rôles étant assujettis à leurs priorités, il est possible d'en modifier l'importance. Après avoir testé cette approche, de manière empirique dans TRANS, elle semble bien adaptée à la simulation de navigations maritimes. Ces tests ont été réalisés grâce à des scénarios simulant des évitements de collisions.

4.1.3 Prise en compte du raisonnement spatial dans TRANS

Nous allons détailler dans cette section l'utilisation du raisonnement spatial élaboré lors du chapitre 2. Prenons l'exemple des agents *ship* jouant le rôle *navigation rules* et qui ont besoin d'un raisonnement spatial qualitatif évolué.

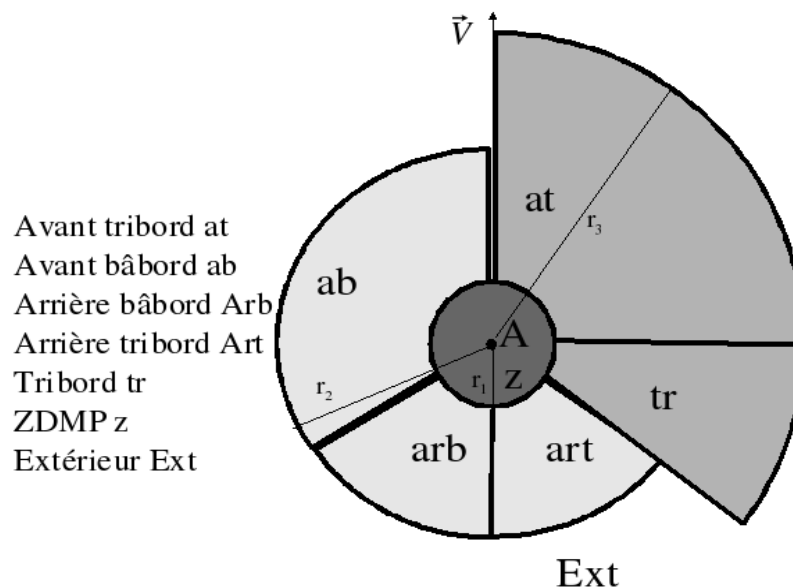


Figure 4.6 — Partitionnement particulier du domaine maritime.

La figure 4.6 est une référence normalisée qui aide à la détermination des manœuvres à réaliser pour éviter une collision potentielle entre deux navires. Afin de savoir si un risque de collision existe, la distance minimale à laquelle les deux navires vont se croiser est calculée. Cette distance est appelée DCPA ¹ (Distance of Closest Point of Approach). Si la DCPA est proche de zéro, le risque de collision est important. Une manœuvre devient nécessaire. Chaque région du partitionnement impose une manœuvre particulière à l'exception de la

¹Plus de précision sur le calcul de cette distance sont fournis en annexe A.

ZDMP qui est une région où les autres navires ne doivent pas en principe pénétrer. D'après le code maritime [IMO, 1997, Vagnon et Wadoux, 2002] et les règles utilisées par la marine nationale, un navire lorsqu'il effectue une manœuvre doit le faire franchement pour que les navires aux alentours en soient conscients. La diminution de la vitesse du navire n'est pas en effet aisément perceptible. Au sein du prototype TRANS, un agent *navire*, lorsqu'il doit en éviter un autre, joue le rôle *manœuvre évitement*. Ce rôle détermine la meilleure manœuvre à réaliser et calcule la nouvelle route du navire. Ce rôle possède une très haute priorité. La manœuvre se termine lorsque le navire évité est en dehors d'une zone représentée par un cercle de rayon r_3 équivalent à la distance maximale de la ZDMM, illustré sur la figure 4.6. Une fois la manœuvre terminée, l'agent perd ce rôle et reprend le comportement qu'il avait avant de réaliser la manœuvre d'évitement.

Dans la suite de cette section, un exemple de manœuvre est présenté pour chaque région de la figure 4.6 à l'exception de la région z qui est une région où les navires ne doivent pas pénétrer. Les figures 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 qui décrivent ces manœuvres sont basées sur le même principe et sont construites à partir de captures d'écran qui proviennent du prototype TRANS. Dans ces figures et à gauche, sont présentées la situation avant la manœuvre et les trajectoires potentielles des navires s'il n'existait pas de risque de collision. À droite, apparaît l'état dans lequel les navires sont après l'évitement de collision. Le navire de référence retourne, après la réalisation de la manœuvre appropriée, sur sa route initiale. La trajectoire en pointillée est celle que le navire de référence aurait suivie s'il n'avait pas manœuvré. Les croix numérotées correspondent à des points de passage du navire de référence. Dans ces figures, l'angle AZ est l'azimut entre les deux navires. L'azimut entre les deux navires est l'angle que fait le segment de droite entre leurs centres par rapport au nord en prenant comme origine le centre du navire de référence dans le sens trigonométrique inverse. Les manœuvres d'évitement sont déterminées selon les cas suivants :

- Cas de la région arrière tribord ;
- Cas de la région arrière bâbord ;
- Cas de la région avant bâbord ;
- Cas de la région avant tribord ;
- Cas de la région tribord.

Cas de la région arrière tribord

La région arrière tribord fait partie de la ZDMU. Le navire qui est en collision potentielle avec le navire de référence n'est donc pas privilégié, il doit manœuvrer. S'il ne le fait pas, le navire de référence doit réagir. Le navire de référence modifie alors son cap de la manière suivante :

Le nouveau cap est l'opposé de l'azimut AZ entre les deux navires moins trente degrés, ce qui donne un $cap = AZ + 180^\circ - 30^\circ$.

La figure 4.7 donne un exemple de ce cas. Dans la partie gauche de la figure, le navire de référence détecte un navire dans la région arrière tribord. L'azimut entre les deux navires (AZ) est ici de 132° , le nouveau cap du navire de référence est alors le cap 281° .

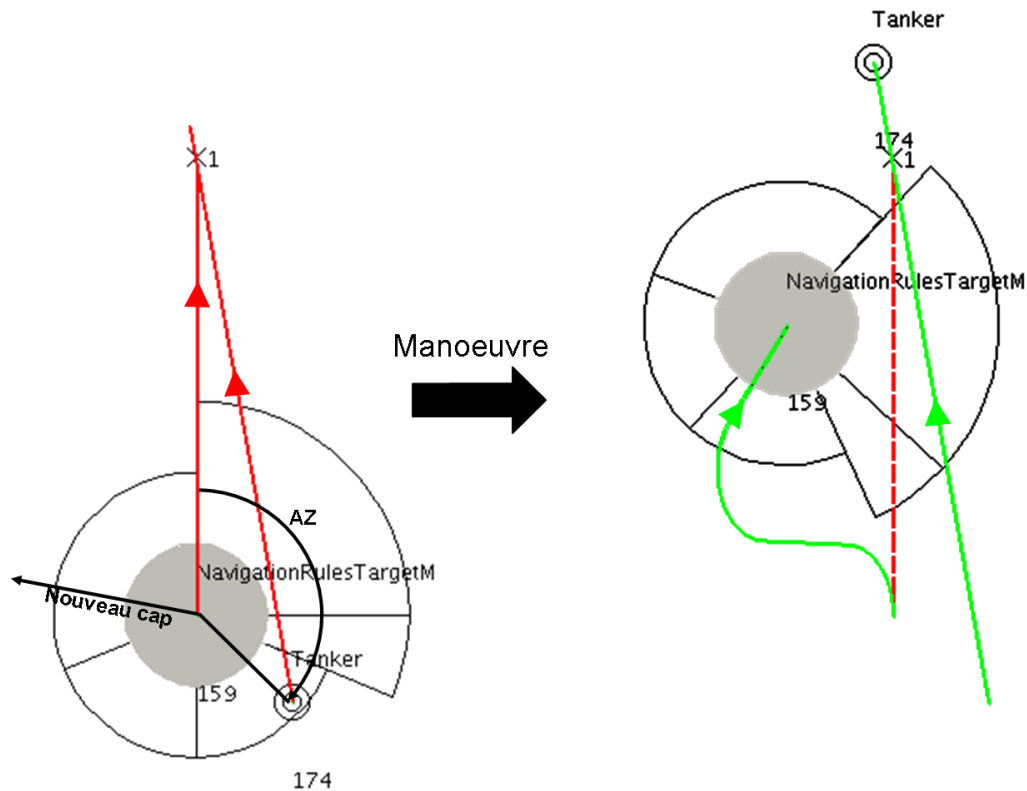


Figure 4.7 — Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région arrière tribord.

Cas de la région arrière bâbord

La région arrière bâbord fait partie de la ZDMU. Le navire qui est en collision potentielle avec le navire de référence n'est donc pas privilégié, il doit manœuvrer. S'il ne le fait pas, le navire de référence doit réagir. Le navire de référence modifie alors son cap de la manière suivante :

Le nouveau cap est l'opposé de l'azimut AZ entre les deux navires plus trente degrés, ce qui donne un $cap = AZ + 180^\circ + 30^\circ$.

La figure 4.8 donne un exemple de ce cas. Dans la partie gauche de la figure, le navire de référence détecte un navire dans la région arrière bâbord. L'azimut entre les deux navires (AZ) est ici de 233° , le nouveau cap du navire de référence est alors le cap 83° .

Cas de la région avant bâbord

La région avant bâbord fait partie de la ZDMU. Le navire qui est en collision potentielle avec le navire de référence n'est donc pas privilégié, il doit manœuvrer. S'il ne le fait pas,

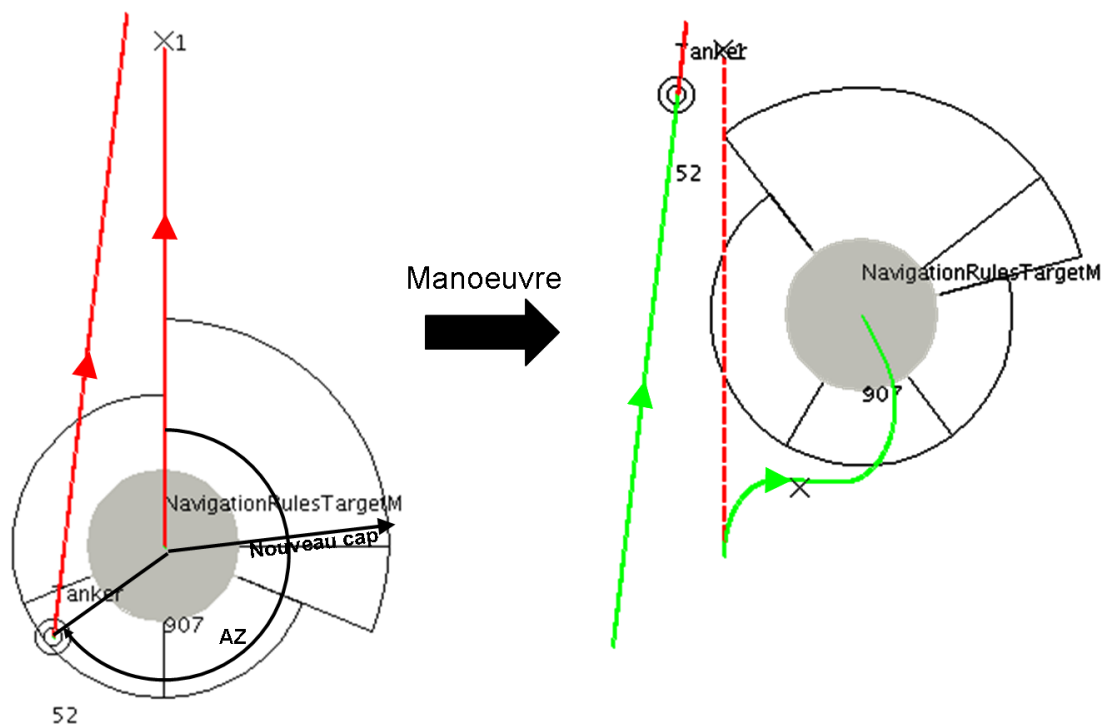


Figure 4.8 — Exemple de manoeuvre lorsqu'un navire est situé dans la région arrière bâbord.

le navire de référence doit réagir. Le navire de référence modifie alors son cap de la manière suivante :

Le nouveau cap est l'opposé de l'azimut AZ entre les deux navires moins trente degrés, ce qui donne un $cap = AZ + 180^\circ - 30^\circ$.

La figure 4.9 donne un exemple de ce cas. Dans la partie gauche de la figure, le navire de référence détecte un navire dans la région avant bâbord. L'azimut entre les deux navires (AZ) est ici de 297° , le nouveau cap du navire de référence est alors le cap 87° .

Cas de la région avant tribord

La région avant tribord fait partie de la ZDMM. Le navire qui est en collision potentielle avec le navire de référence est donc privilégié, le navire de référence doit manoeuvrer. Il modifie alors son cap de la manière suivante :

Le nouveau cap est l'azimut AZ entre les deux navires plus trente degrés, ce qui donne un $cap = AZ + 30^\circ$.

La figure 4.10 donne un exemple de ce cas. Dans la partie gauche de la figure, le navire de référence détecte un navire dans la région avant tribord. L'azimut entre les deux navires (AZ) est ici de 43° , le nouveau cap du navire de référence est alors le cap 73° .

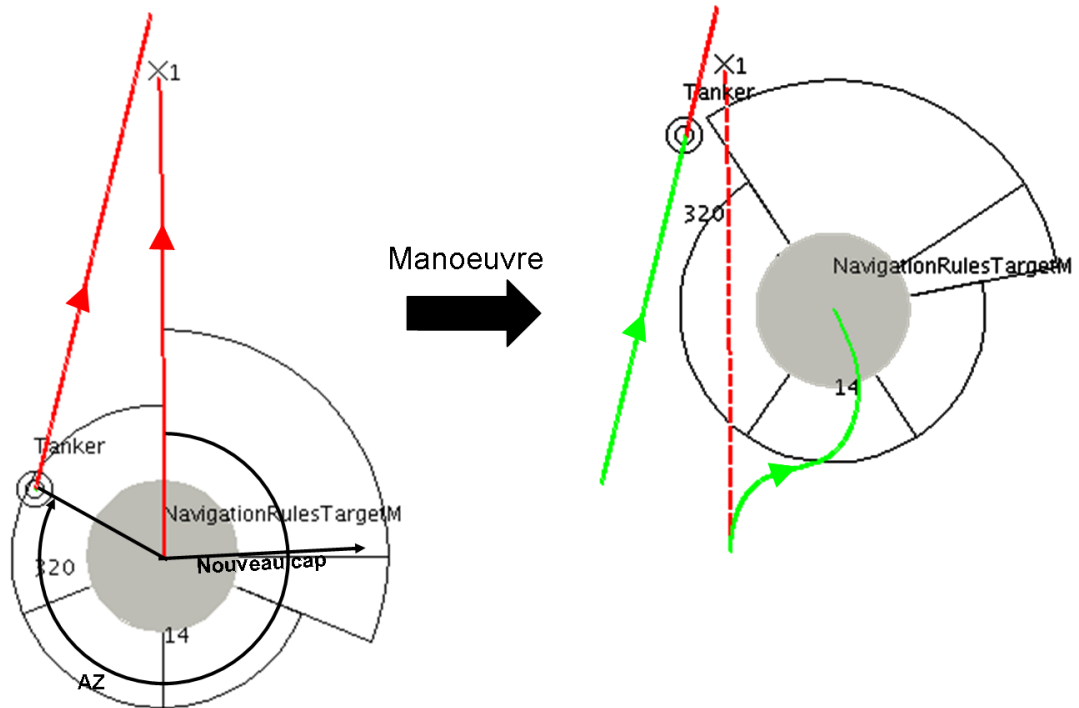


Figure 4.9 — Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région avant bâbord.

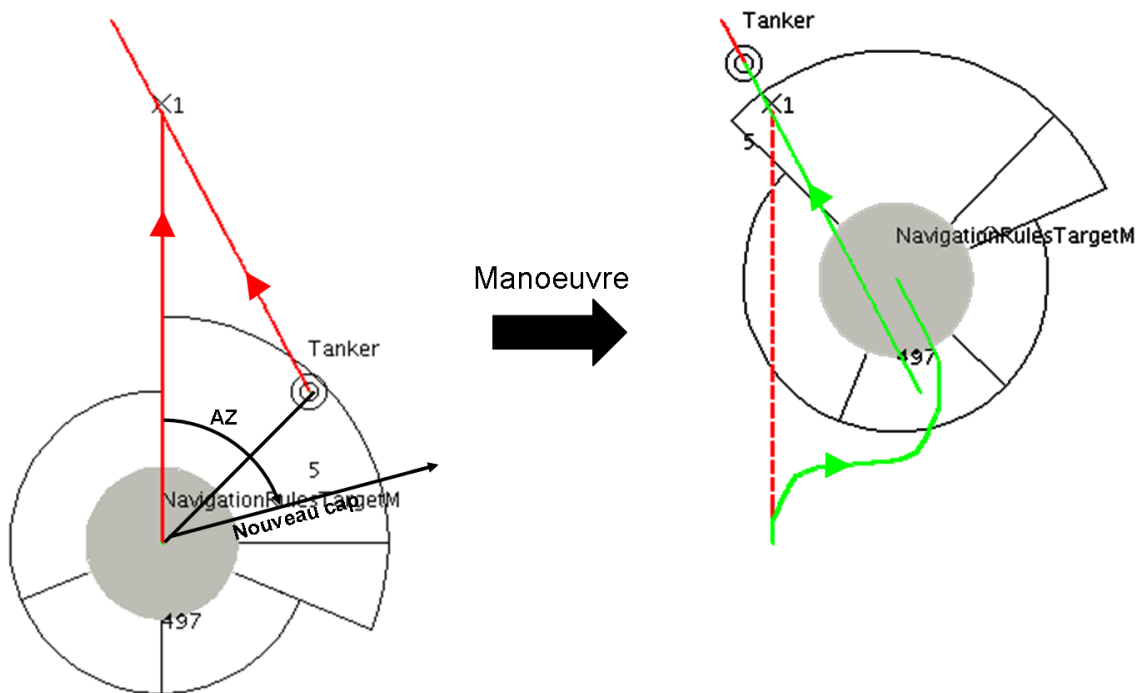


Figure 4.10 — Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région avant tribord.

Cas de la région tribord

La région tribord fait partie de la ZDMM. Le navire qui est en collision potentielle avec le navire de référence est donc privilégié, le navire de référence doit manœuvrer. Il modifie alors son cap de la manière suivante :

Le nouveau cap est l'opposé de l'azimut AZ entre les deux navires, moins trente degrés, ce qui donne un $cap = AZ + 180^\circ - 30^\circ$.

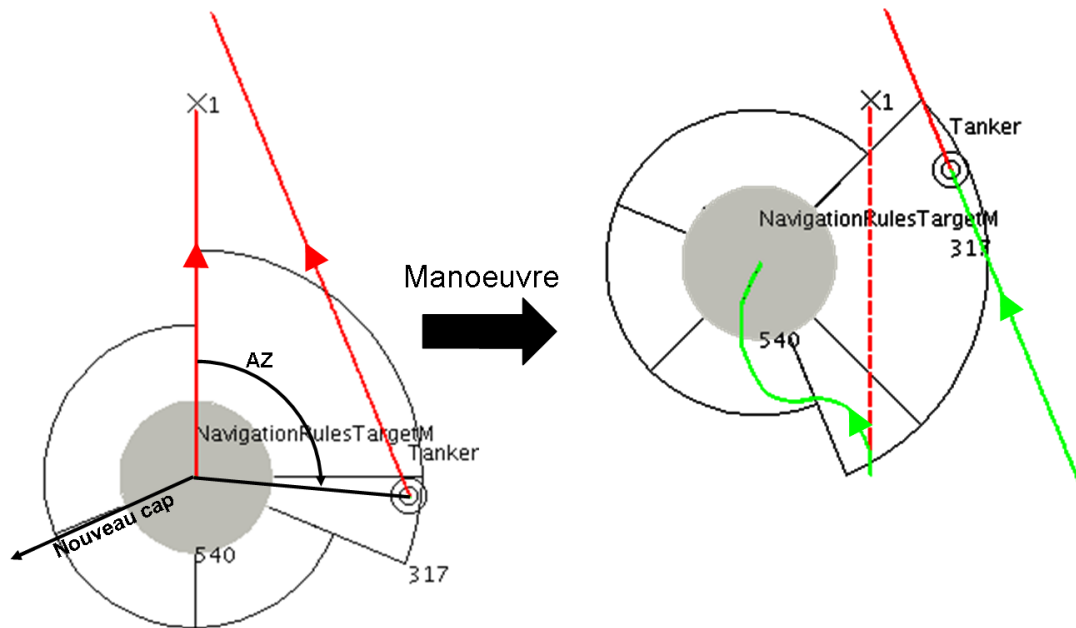


Figure 4.11 — Exemple de manœuvre lorsqu'un navire est situé dans la région tribord.

La figure 4.11 donne un exemple de ce cas. Dans la partie gauche de la figure, le navire de référence détecte un navire dans la région tribord. L'azimut entre les deux navires (AZ) est ici de 95° , le nouveau cap du navire de référence est alors le cap 245° .

4.1.4 Prise en compte de l'influence des barrières et des groupes spatiaux

Le partitionnement utilisé pour déterminer les manœuvres d'évitement peut être modifié par les barrières présentes dans l'environnement et par les groupes spatiaux formés par les autres navires. Ces facteurs sont implémentés de la manière suivante.

Prise en compte de l'influence des barrières

Dans le contexte applicatif du prototype TRANS, les barrières sont pour l'essentiel composées des entités spatiales modélisant la côte. Un partitionnement est en contact avec une barrière lorsqu'une de ses régions intersecte la région formant la barrière. L'intersection entre ces deux régions est alors soustraite de la région concernée. Si au cours de cette modification apparaissent des régions sans frontières avec la région qui contient le point des coordonnées

du navire (ZDMP), elles sont supprimées. La région au-delà de cette barrière est en effet pas accessible, ou seulement partiellement accessible au navire de référence. Toutes les régions au-delà de la barrière ne sont pas prises en compte dans le cas où celle-ci coupe une région de part en part. La figure 4.12 montre les différentes modifications créées par une barrière (l'île d'Ouessant). La barrière a séparé la région tribord avant en deux régions. La région située dans la partie supérieure ne possède plus de frontière commune avec la ZDMP, elle est alors supprimée. Les régions tribord et avant bâbord intersectent la barrière mais, celles-ci ne sont pas dissociées en plusieurs régions. Lorsqu'un navire se situe près de l'extrémité d'une barrière, il lui est possible d'éviter les navires qui sont en route de collision avec lui mais se trouvant tout de même derrière celle-ci.

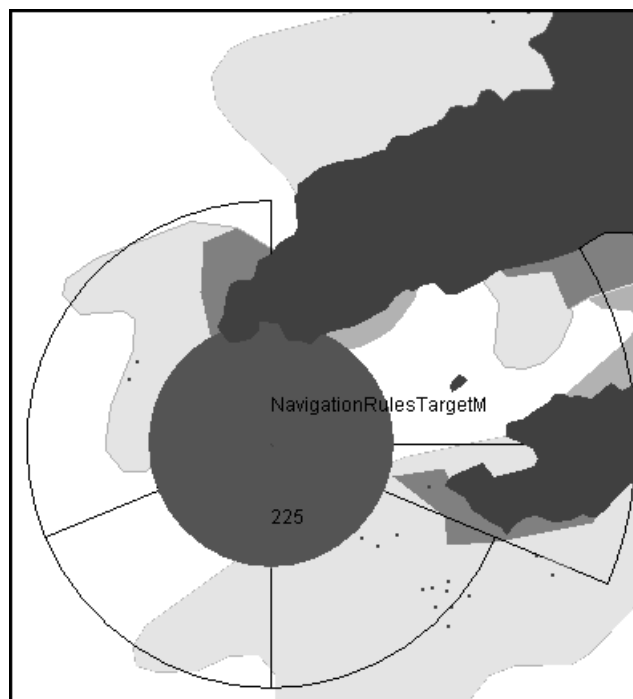


Figure 4.12 — Influence d'une barrière sur les relations d'orientation et de proximité.

Influence des groupes spatiaux

Les groupes spatiaux engendrent aussi des modifications du partitionnement. Les entités spatiales héritent des relations d'orientation et de proximité de l'entité spatiale qui possède le positionnement le plus défavorable du groupe spatial. Les groupes spatiaux sont définis selon le formalisme exposé au chapitre 2. Lorsque deux entités spatiales sont proches l'une de l'autre, elles forment un groupe. Cette association se traduit au sein de TRANS par la création d'un groupe de type *spatial group*. Les agents de ce groupe prennent alors un rôle de type *spatial entity*. Ce type de rôle a pour objectif de spécifier leur appartenance au groupe spatial. Dans l'exemple de la figure 4.13, un groupe spatial est créé par les agents qui jouent le rôle *trawler*. Un navire de référence joue le rôle *navigation rules*. Le navire le plus proche du navire de référence se trouve dans sa région *tribord avant*. Cette présence

dans cette zone est défavorable pour le navire de référence, l'obligeant à manœuvrer. Les règles définies au chapitre 2 s'appliquent alors et les navires faisant partie du groupe héritent de la relation d'orientation et de proximité de l'entité spatiale la plus défavorable. Pour représenter visuellement cet héritage, la région représentée par l'ellipse, qui circonscrit le groupe de navires, est ajoutée à la région qui doit être modifiée. Dans cet exemple, les deux entités du groupe spatial sont donc considérées comme se trouvant dans la région *tribord avant*. Cette perception différente du positionnement des entités est illustrée graphiquement par une modification de la région *tribord avant*.

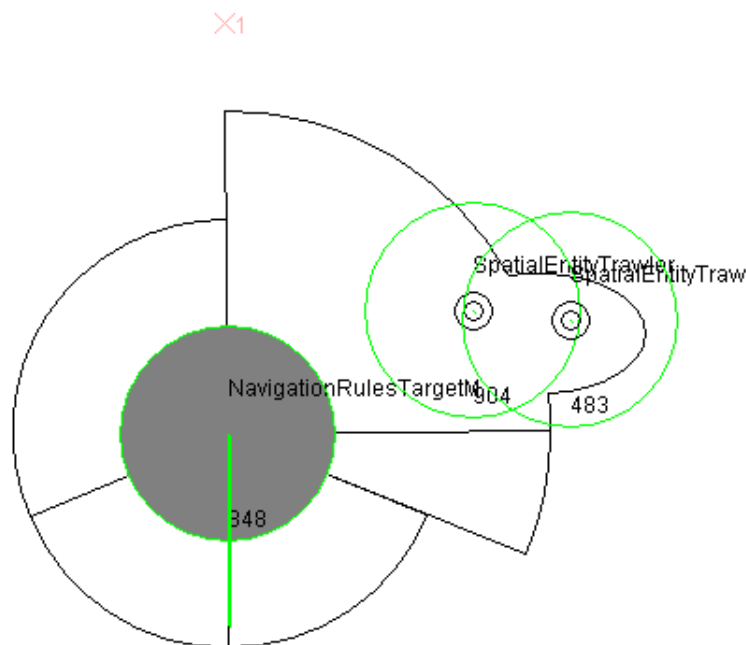


Figure 4.13 — Influence d'un groupe sur les relations d'orientation et de proximité.

4.2 Interface de TRANS

Le prototype TRANS possède une interface homme/machine permettant de définir et de visualiser des simulations de navigations maritimes. Il est aussi capable d'utiliser des données géographiques provenant de cartes électroniques. Cette section décrit l'intégration des données géographiques puis les composants de l'interface de TRANS.

4.2.1 Gestion des données géographiques

Le format des données géographiques utilisées dans TRANS est le format S57 et qui associé à un ECDIS est voué à remplacer légalement la carte papier [IHB, 1996a, IHB, 1996b]. Pour plus de facilités d'utilisation ce format est traduit en XML, ce qui permet d'utiliser tous les outils à notre disposition en JAVA. Ce travail est l'extension et l'amélioration

de précédents travaux [Brooke, 2005]. Cette extension a été réalisée par Damien Brocarel, étudiant de l'Institut des Applications Avancées de L'Internet (IAAI) à Marseille, lors de son stage de fin d'étude [Brocarel, 2003] sous la supervision de Sébastien Fournier et Thomas Devogele. Une fois les données géographiques extraites, il est nécessaire de les intégrer au système multi-agents en tant qu'agents. Les autres agents peuvent les percevoir et interagir avec elles. Leur représentation par des agents offre plusieurs possibilités intéressantes. Il est possible de donner aux différentes entités spatiales un comportement spécifique si besoin. Par exemple, le comportement d'une entité spatiale définissant une zone géographique maritime est influencée par les phénomènes naturels tels que la marée et les courants. Sa hauteur d'eau fluctue notamment selon ces phénomènes. Ces fluctuations ont alors un effet direct sur les navires et leurs trajectoires. Cette fonctionnalité est prévue conceptuellement mais n'a pas fait l'objet actuellement d'une implémentation. Un deuxième intérêt est de répartir plus uniformément les calculs entre les agents. Les agents de type *navire* devant déjà gérer les détections de collisions et leurs évitements, nous avons confiée la détection des échouements éventuels aux agents modélisant les côtes et les zones de profondeurs. Ces agents se chargent alors de détecter les navires qui s'approchent trop près d'eux. Ils utilisent un raisonnement spatial simple basé sur les relations de proximité. Les navires détectés sont alors prévenus et agissent en conséquence. La répartition des entités spatiales entre les agents est alors réalisée selon un découpage fonctionnel par entité. Un type d'agent correspond à un type d'entité spatiale. Il est toutefois peu réalisable pour des raisons de performance d'associer un agent à une unique entité spatiale. La solution adoptée est l'utilisation d'un unique agent par type d'entité spatiale. Pour représenter l'espace géographique maritime, TRANS utilise deux types d'entité spatiale : les terres et les zones de profondeurs. Deux agents jouant respectivement le rôle *coast* et *depth area* sont donc nécessaires à leur prise en compte. La mise en place des données géographiques et des éléments de la simulation se font à travers l'utilisation d'une interface graphique.

4.2.2 Description de l'interface

La zone géographique où se déroule la simulation est choisie parmi les cartes maritimes au format S57 fournies par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Ces cartes recouvrent la majeure partie des côtes françaises. L'utilisateur sélectionne la carte en fonction de son identifiant. Une fois que l'utilisateur a déterminé la zone géographique souhaitée, la fenêtre principale de l'application s'ouvre. Plusieurs actions deviennent alors accessibles à l'utilisateur via différents menus. Nous nous attachons à décrire les plus importants dans cette section :

- Le menu d'ajout des agents ;
- Contrôle de l'exécution de la simulation ;
- L'écran principal ;
- L'affichage futur des trajectoires.

Menu ajout d'agents

Ce menu présente à l'utilisateur les agents et les rôles prédéfinis pouvant être utilisés dans la simulation. Comme le montre la figure 4.14, des onglets permettent de sélectionner les types d'agent. Une fois le type d'agent désigné, les types de rôle conciliables et permanents s'affichent sur la partie gauche du menu. En fonction des rôles permanents apparaissent sur la partie droite les rôles temporaires compatibles (figure 4.15a). Pour chacun des rôles temporaires choisis, l'application détermine les rôles incompatibles et les supprime de la liste des rôles jouables par l'agent (figure 4.15b). Dans l'exemple présenté par la figure 4.15b, lorsque le type de rôle *fishing* est sélectionné, le type de rôle *AlongSide* (à quai) n'est plus jouable par l'agent. Ces deux rôles sont effectivement incompatibles. L'agent est alors créé avec les rôles sélectionnés aux coordonnées indiquées par un curseur sur la carte.



Figure 4.14 — Capture d'écran de la fenêtre d'ajout des agents.

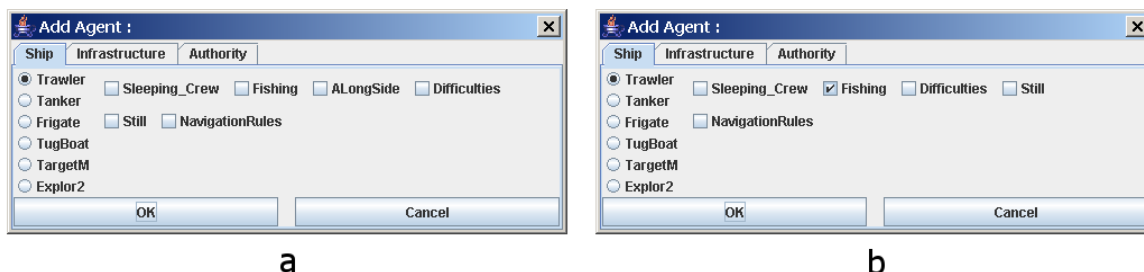


Figure 4.15 — Capture d'écran de la fenêtre d'ajout des agents lors de la sélection des rôles temporaires.

Contrôle de l'exécution de la simulation

Un avantage essentiel de la simulation lors de l'étude d'un phénomène de longue durée est de pouvoir accélérer le déroulement de la simulation. Ces techniques permettent d'anticiper les situations à risque comme les cas de risque de collision. Il faut en effet plusieurs minutes pour qu'un incident mène éventuellement à un risque de collision. C'est pourquoi l'utilisateur a la possibilité d'accélérer la simulation afin d'étudier le phénomène avec plus de souplesse. Les performances de la machine limitent les possibilités d'accélération de la simulation à un certain seuil également lié au nombre d'agents présents et la complexité des situations. L'impact de l'accélération temporelle sur les performances de la simulation est étudié dans

la section 4.4.

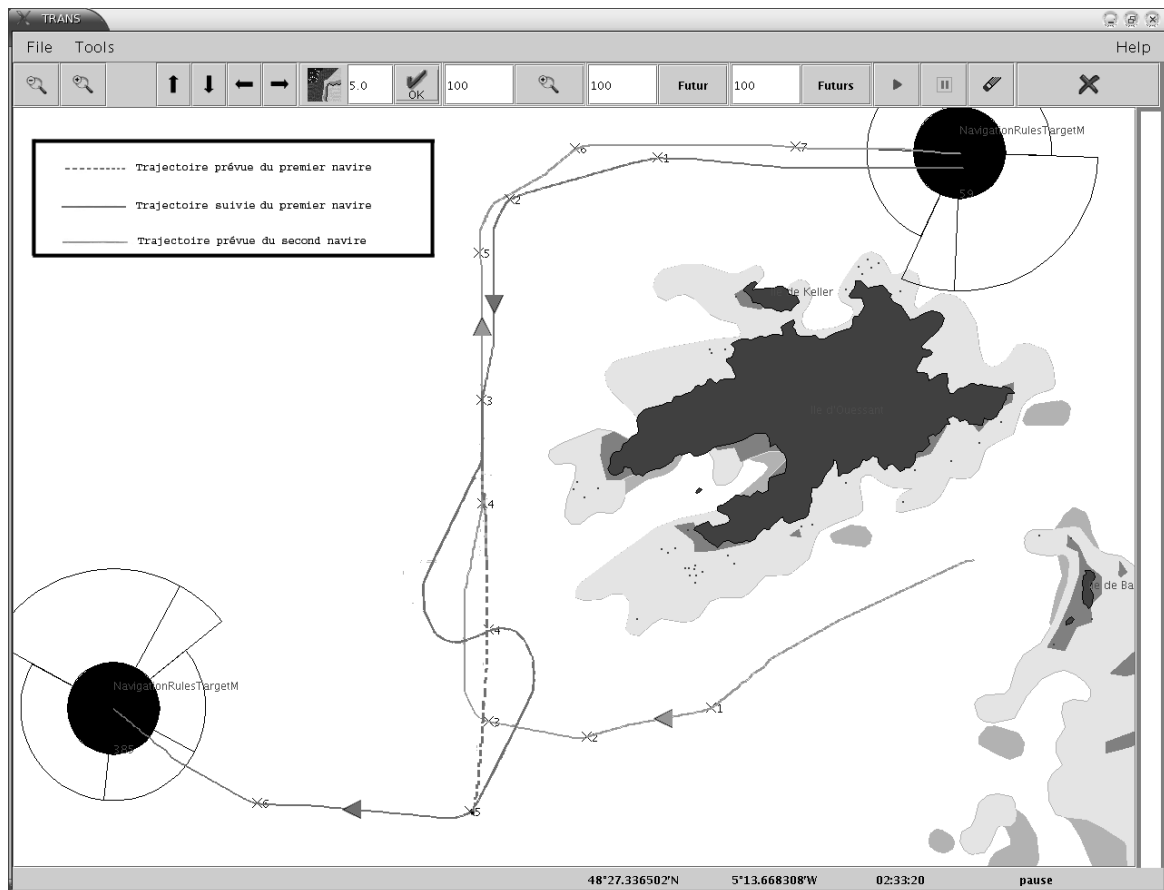


Figure 4.16 — Capture d'écran de la fenêtre principale de TRANS.

Ecran principal

La figure 4.16 présente l'écran principal de TRANS. Cet écran affiche, dans la partie centrale de la fenêtre les données géographiques et les trajectoires des navires lors de la simulation. Pour chaque navire sont affichés la trajectoire qu'il a déjà réalisée, les noms des rôles qu'il joue et son identifiant. Si ce navire joue le rôle *navigation rules*, le partitionnement définissant le raisonnement spatial utilisé est affiché. La partie supérieure de cet écran possède des boutons et des menus qui permettent de :

- Zoomer, déplacer la carte dans les quatre directions et modifier les couleurs de la carte en fonction d'une profondeur sélectionnée ;
- Calculer la trajectoire future d'un navire sélectionné ou celles de tous les navires ;
- Démarrer la simulation, la mettre en pause, supprimer tous les agents exceptés ceux qui modélisent les données géographiques et quitter l'application.

Dans la partie inférieure de la fenêtre, d'autres informations sont visibles parmi lesquelles la position en latitude et en longitude d'un curseur, le temps écoulé depuis le début de la

simulation et le statut actif ou en pause de la simulation. Il est aussi possible d'obtenir des informations textuelles sur certaines entités spatiales provenant de la carte marine.

Dans la figure 4.16, la carte chargée est celle des alentours de l'île d'Ouessant avec un certain facteur de zoom. Deux agents *navire* sont présents et jouent les rôles *TargetM* et *Navigation rules*. Chaque agent possède un identifiant unique qui permet à l'utilisateur de le suivre durant toute la simulation. Quand le rôle *targetM* est joué, les routes suivies par les agents sont déterminées par des points de passage numérotés. Le trajet déjà effectué par chacun des navires est affiché afin de suivre leur progression. Sur la figure 4.16, la route du premier navire a été déviée afin de respecter les règles de navigation. La route initialement prévue est en pointillé. Cette déviation est intervenue lorsque les deux navires se sont croisés pour éviter la collision. Le premier navire étant non privilégié, il a dévié de sa route. Il a ensuite repris la route initialement prévue. Ce changement de trajectoire est obtenu par la prise du rôle *manœuvre évitement*. Ce rôle a une priorité supérieure aux rôles que l'agent jouait déjà, et il a inhibé le rôle *TargetM*. Cette inhibition oblige le navire à manœuvrer au lieu de suivre la route prévue.

Affichage des trajectoires futures

Afin d'anticiper au mieux les trajectoires des navires, l'utilisateur peut afficher sur la carte les trajectoires futures des navires en utilisant les rôles que ceux-ci possèdent à cet instant. Deux possibilités s'offrent à lui. Soit l'application détermine les trajectoires futures de tous les navires présents dans la zone géographique, soit elle calcule la trajectoire future d'un navire sélectionné. Dans les deux cas, l'utilisateur fournit, au niveau de l'interface, une limite temporelle à ce calcul (exprimée en seconde). Le ou les agents sélectionnés sont alors clonés. Les clones sont exécutés sans contrainte temporelle au maximum des possibilités de la machine. La figure 4.17 montre l'utilisation de cette fonctionnalité pour un seul navire. La trajectoire pour les trois prochaines heures est calculée (affichage en pointillé).

Ces outils sont à la disposition de l'utilisateur et lui permettent de construire et de suivre des scénarios. Ces scénarios sont modifiables à tout moment en y ajoutant de nouveaux agents.

4.3 Validations

Cette section présente différents scénarios qui illustrent les capacités du modèle agent et du raisonnement spatial au sein de la plate-forme TRANS. Trois scénarios sont présentés :

- Un scénario du sauvetage d'un navire en difficulté ;
- Un scénario de navires perturbateurs ;
- Un scénario tiré d'un rapport d'incident.

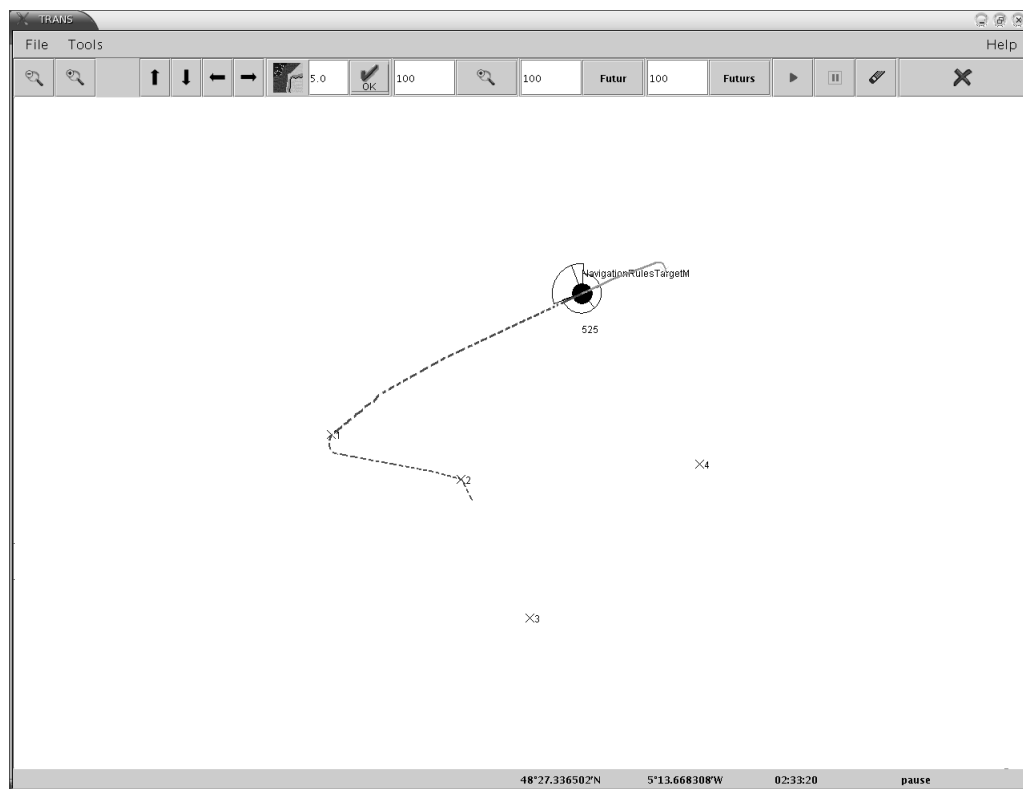


Figure 4.17 — Calcul de la trajectoire future d'un agent.

4.3.1 Sauvetage

Ce scénario met en scène huit agents de type *navire* et un agent de type *infrastructure*. Le synopsis de ce scénario est simple. Il s'agit d'un navire qui s'échoue près de la côte et envoie un S.O.S. aux autres entités de la zone. Celles-ci choisissent alors d'intervenir ou non en fonction de leur comportement au moment d'émission et de ce qu'ils perçoivent. Ce scénario permet notamment de montrer l'utilité du changement de rôle et de l'exclusivité.

Au démarrage du scénario, les agents de type *navire* possèdent les configurations de rôles suivantes (figure 4.18) :

- Un agent joue le rôle *tanker* et le rôle *sleeping crew*. Ainsi cet agent ne réagit à aucun message qui lui est envoyé. Il ne peut donc pas éviter l'échouement ;
- Trois agents jouent le rôle *frigate*. Parmi ces agents, un joue en plus le rôle de *leader* et les autres jouent le rôle *follower* dans le groupe *task force* ;
- Deux agents jouent le rôle *trawler* et *fishing* ;
- Un agent joue le rôle *targetM* ;
- Un agent joue le rôle *tugboat*.

L'agent de type *infrastructure* joue, lui le rôle *vessel traffic station* et surveille la zone géographique.

Un agent *navire* quand il s'échoue, crée le groupe *rescue team* et prend dans ce groupe le

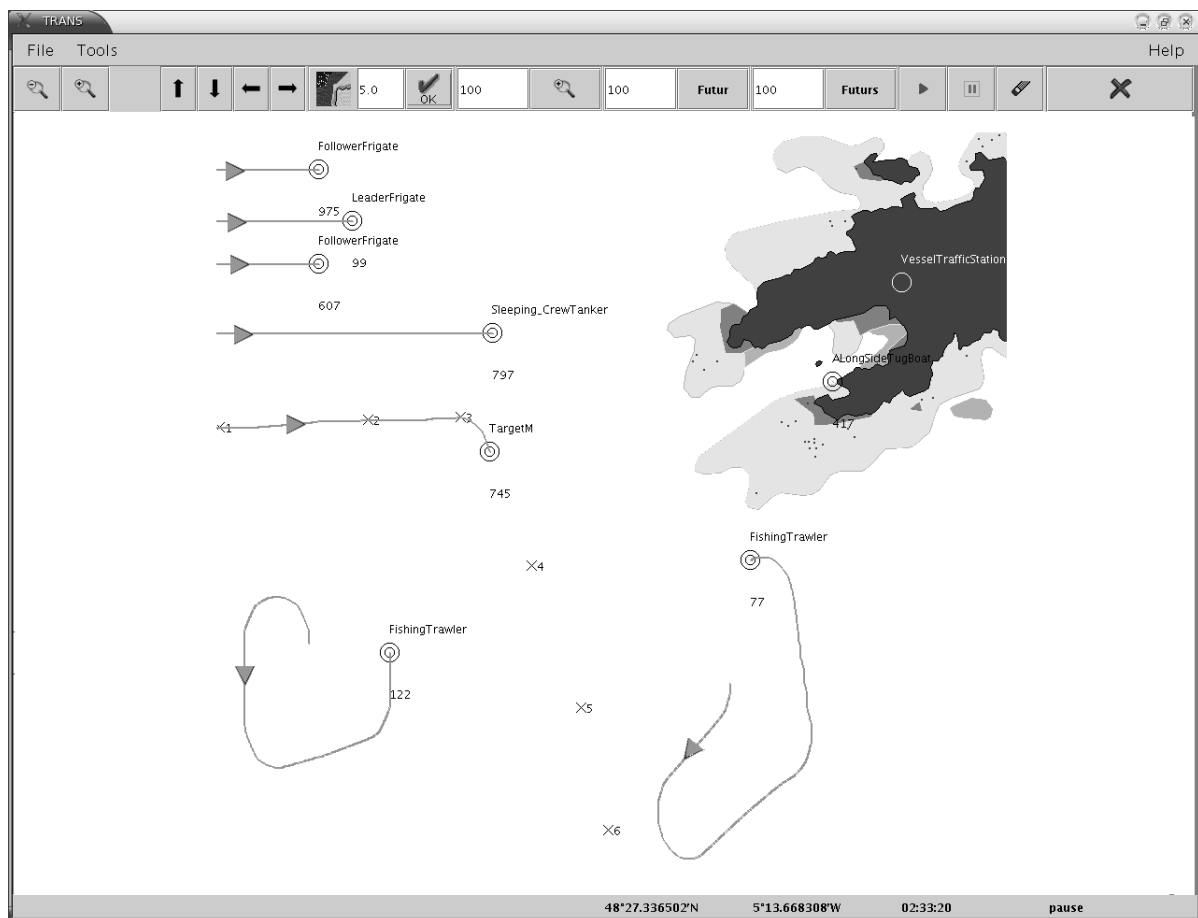


Figure 4.18 — Début du scénario de sauvetage.

rôle *difficulties*. Il envoie alors un S.O.S. à tous les autres agents de la zone. Ceux-ci choisissent d'y répondre ou non en fonction de leurs comportements. Les agents de type *navire* qui répondent à ce S.O.S prennent le rôle exclusif *rescuer* dans le groupe *rescue team*, arrêtant du même coup tous les rôles temporaires, comme le rôle *fishing*. Ils modifient alors leurs trajectoires, comme le montre la figure 4.19, pour rejoindre le point d'émission du message. L'agent jouant le rôle *leader* dans le groupe *task force* donne l'ordre aux deux autres agents du même groupe d'aller aider le navire en difficulté. L'agent jouant le rôle *vessel traffic station* prend le rôle *rescuer leader* dans le groupe *rescue team* et coordonne l'aide. Il envoie aussitôt l'agent qui joue le rôle *tugboat* sur les lieux de l'incident. Cette simulation prend fin après l'arrivée des navires sur les lieux de l'incident.

4.3.2 Agents “perturbateurs”

Dans ce scénario, le navire de référence, qui joue le rôle *navigation rules* suit une route qui croise celle de plusieurs chalutiers qui ne respectent pas les règles de navigation. En utilisant le raisonnement spatial, il déduit les manœuvres à réaliser pour éviter les collisions potentielles. Lorsqu'il rencontre un navire sur sa route et qu'ils risquent la collision, l'agent prend le rôle

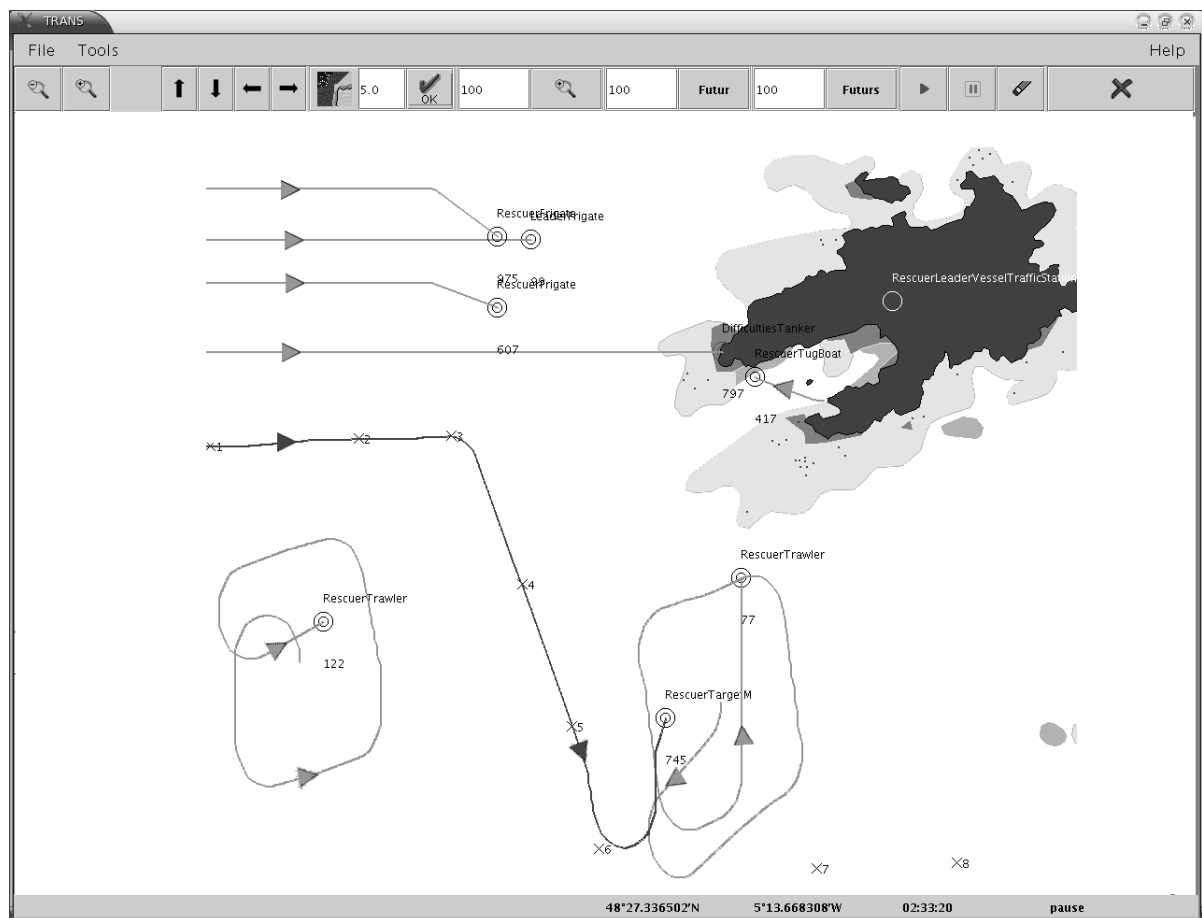


Figure 4.19 — Les navires de la zone se portent au secours d'un navire en difficulté.

manœuvre évitement puis lorsque la manœuvre est finie l'agent perd ce rôle. Cette perte fait retourner le navire de référence sur sa route initiale en se dirigeant sur le prochain point de passage (figure 4.20). Lorsqu'il croise le premier chalutier (à gauche), il effectue une première manœuvre d'évitement. Lorsque le navire de référence retourne sur sa route initiale, ne sachant pas quelle trajectoire le chalutier va prendre, une seconde manœuvre s'avère nécessaire. Dans les deux cas, le chalutier est arrivé par la région bâbord. La rencontre avec le deuxième chalutier n'entraîne pas de manœuvre d'anti-collision. A aucun moment la DCPA n'a été suffisamment faible pour indiquer un risque de collision. Par contre, ce fût le cas avec le troisième chalutier. Celui-ci est entré dans la région tribord du navire de référence, l'obligeant à réaliser une manœuvre. Le chalutier change aussi de route au même instant pour continuer sa route, ce qui aurait été suffisant pour éviter la collision. Enfin, le dernier chalutier étant à l'arrêt et ne présentant pas de risque de collision, aucune manœuvre n'est nécessaire.

4.3.3 Scénario tiré d'un rapport d'incident

Ce scénario est tiré d'un cas réel présenté en annexe B et illustré par la figure 4.21. Le scénario simulé comporte une frégate qui est le navire de référence, et six chalutiers. La frégate

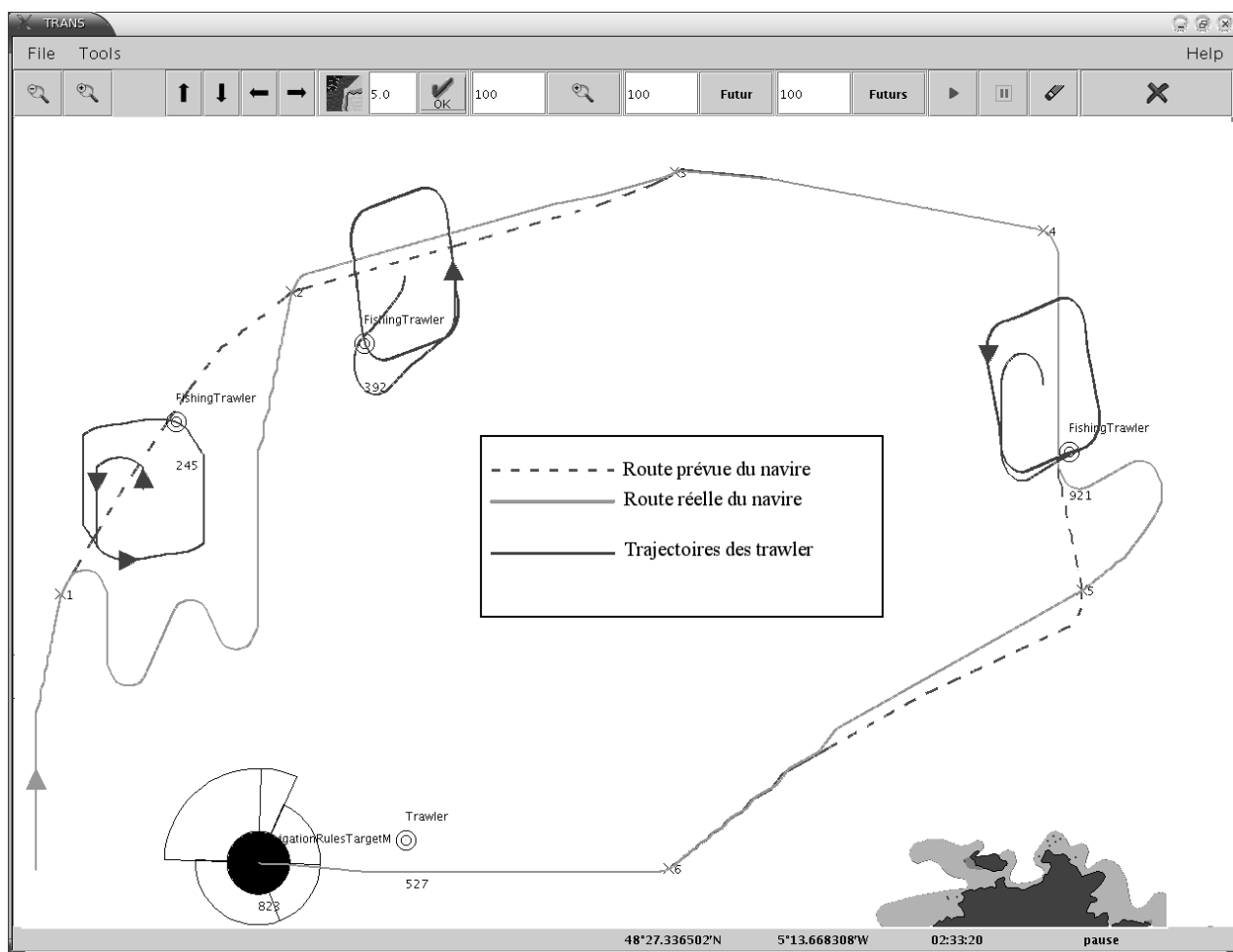


Figure 4.20 — Suivi d'une route par un navire gêné par des chalutiers.

transite, à une vitesse de vingt nœuds, de Dunkerque à Lorient et les chalutiers se dirigent, à une vitesse de huit nœuds, vers leur lieu de pêche. Une moitié des chalutiers suivent le cap deux cent quarante et l'autre moitié suit le cap cent quatre vingt dix. La frégate suit le cap cent vingt puis rectifie, dix minutes plus tard, son cap au cent quinze pour revenir sur la route dictée par le commandant. Elle change ensuite de cap en venant au cent quarante afin de passer entre deux groupes de navires. Pour simuler les changements de cap de la frégate, le type de rôle *targettimedM* a été créé. Il permet de suivre une suite de caps, chacun étant contraint temporellement par un intervalle.

La frégate croise un premier groupe de chalutiers. Un des chalutiers du groupe est en route de collision avec elle mais respecte les règles de navigation (i.e. joue un rôle *navigation rules*). Ce chalutier se trouvant sur le bâbord de la frégate, celui-ci doit manœuvrer du fait de sa position non privilégiée. Le deuxième chalutier de ce groupe n'est à aucun moment en route de collision avec la frégate et la croise par l'arrière. La frégate poursuit sa route et envisage de passer entre deux groupes de chalutiers composés respectivement à bâbord d'un navire et, à tribord de trois navires. La frégate est en route de collision avec le chalutier qui se trouve sur bâbord. Ce dernier ne respecte pas les règles de navigation. La frégate est

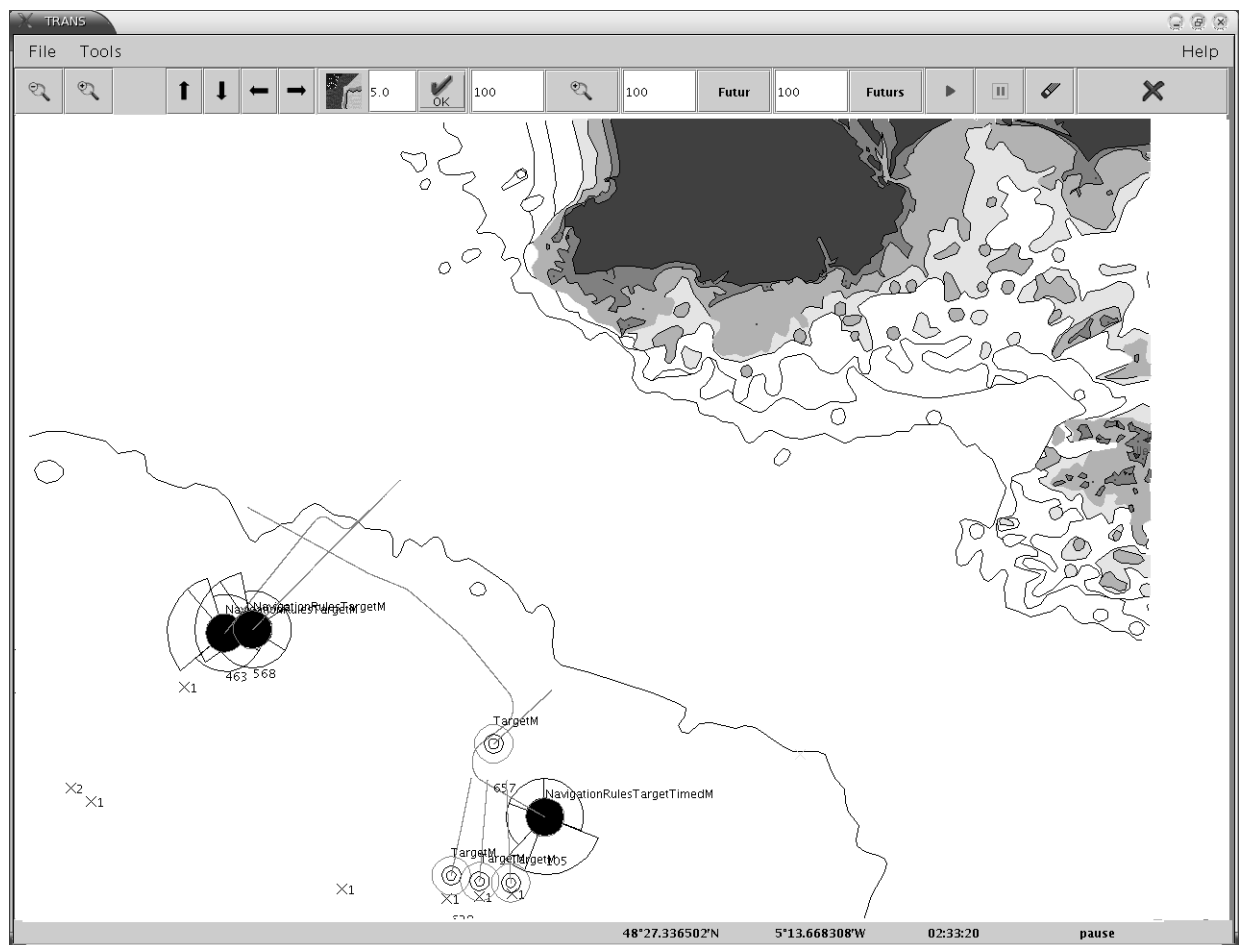


Figure 4.21 — Reproduction d'un incident réel.

donc dans l'obligation de manœuvrer et change de cap. D'après la simulation, si les données s'avèrent exactes et précises, l'évitement de la collision est possible.

La description de l'incident est cependant imprécise et ne permet pas de le reproduire fidèlement. Les relevés de position sont effectués toutes les dix minutes par des mesures de distances radar ou par les calculs des positions relatives de trois amers. Lors de l'incident réel, l'officier de quart a jugé, à vue, que le chalutier passait à l'arrière de la frégate. Ce ne fut malheureusement pas le cas, une collision eu lieu entre le chalutier et l'arrière bâbord de la frégate entraînant le naufrage du chalutier. Selon un professeur de navigation de l'Ecole navale, la frégate avait deux solutions pour prévenir la collision :

- Ralentir l'allure pour que le chalutier passe devant la frégate ;
- Virer à tribord pour passer au plus près du deuxième groupe de navire sans respecter la DMP définie par l'ordre du commandant.

Dans le prototype TRANS, la seule possibilité actuellement implémentée est le changement de cap. La manœuvre réalisée par la frégate est alors celle qui est déterminée par les règles de navigation lorsqu'un navire se trouve dans la région bâbord avant. Il est évident que compte tenu de l'imprécision de la description de l'incident il est impossible de répliquer à

l'exact la manœuvre nécessaire à l'évitement de la collision. Ce scénario montre l'utilité d'un tel système pour aider au mieux le chef de quart à prendre sa décision dans des situations similaires. La simulation a aussi révélé que les données du bulletin n'étaient pas suffisamment précises pour reproduire fidèlement l'incident. Toutefois, les nouveaux outils (ECDIS, AIS) à bord des navires devraient permettre aujourd'hui de relever plus précisément et de manière automatique (toutes les minutes) les informations concernant un incident par le biais de boîtes noires comme pour l'aviation. Ces données précises donneraient ainsi la possibilité de simuler de manière satisfaisante le déroulement d'un incident.

4.3.4 Discussion

Nous venons de voir dans les trois sous-sections qui précèdent les capacités de TRANS en terme de changement de comportement, d'évitements de collision et de réalisation de scénarios. Afin de rendre la modélisation des trajectoires plus précises lors des évitements de collision et pour correspondre au mieux aux comportements réels des navires, plusieurs extensions peuvent être réalisées. Ces extensions sont les suivantes :

- Possibilité de réaliser une nouvelle manœuvre d'évitement lorsqu'une telle manœuvre est déjà en cours ;
- Calcul de la DCPA en utilisant un cap et vitesse fonction du temps, ce qui permettrait de prendre en compte les manœuvres qui sont en cours lors de ce calcul. Ces manœuvres peuvent en effet éloigner les navires de la route de collision, rendant inutile une manœuvre supplémentaire ;
- Utilisation de manœuvres supplémentaires aux manœuvres théoriques qui expriment rigoureusement les recommandations des règles de navigation. Le but de cet ajout est de donner aux navires des mouvements qui correspondent à des comportements qui dépendent aussi du type de navire et de son équipage.
- Intégrer les phénomènes naturels comme le vent, les courants, la marée qui ont un impact sur les trajectoires des navires.
- Prendre en compte lors du calcul de la manœuvre d'évitement la présence de régions inaccessibles.

4.4 Évaluation des performances

Comme tout système de simulation, il est important de confronter TRANS à une montée en charge selon plusieurs paramètres. Ces mesures de performances sont réalisées d'une part en faisant fluctuer le nombre de navires jusqu'à trois cents² et en modifiant le facteur d'accélération de la simulation. Il est aussi nécessaire de prendre en compte les types de

²Selon le discours lors de la conférence CETMEF2003, du commandant du CROSS Gris-Nez surveillant le Nord-Pas-de-Calais, le nombre de navires à surveiller simultanément peut atteindre les cent cinquante.

rôle que jouent les agents, et ce en fonction de leur complexité. Les tests sont donc effectués pour des agents jouant le rôle *navigation rules*, c'est à dire le plus complexe, et sans ce rôle. Les mesures ont été effectuées sur un ordinateur sous linux et possédant 512 Mo de mémoire et un processeur Pentium 4 à 1,8 GHz. La mémoire est suffisante pour charger chacune des cartes en notre possession. La carte utilisée lors des tests consomme 68 Mo de mémoire.

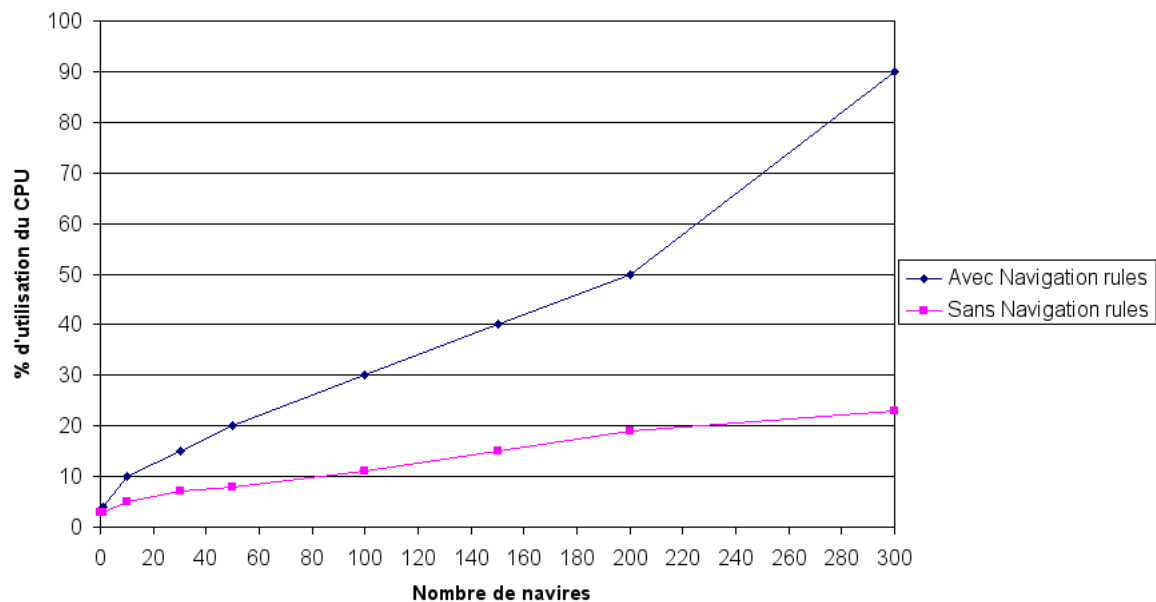


Figure 4.22 — Performance de TRANS en fonction du nombre de navires.

La figure 4.22 montre les résultats de la charge CPU en pourcentage obtenus en fonction du nombre de navires. Lors de ces tests, aucun coefficient accélérateur n'est utilisé. Il est alors possible d'avoir simultanément plus de deux cents navires tout en restant dans des normes appréciables d'utilisation du CPU, même lorsque les agents jouent le type de rôle *navigation rules*. L'écart du taux d'utilisation du CPU entre les agents sans le type de rôle *navigation rules* et ceux avec est cependant relativement important, ces derniers ont en effet besoin d'environ 2,5 fois plus de ressources jusqu'à deux cents navires et près de quatre fois plus lorsque le nombre de navire atteint trois cents. Ces chiffres montrent bien l'importance du facteur du type de rôle, joué par les agents, sur les performances.

La figure 4.23 expose les performances de TRANS en terme de charge CPU, exprimées en pourcentage, et en fonction du facteur d'accélération de la simulation. Les tests sont effectués avec cinquante agents. Dans le cas où les agents ne jouent pas le type de rôle *navigation rules*, la charge du CPU augmente de manière linéaire jusqu'au facteur d'accélération cinquante puis augmente plus rapidement pour atteindre quarante pour cent pour une accélération de cent fois la vitesse initiale. La courbe de la charge CPU lorsque les agents jouent le type de rôle *navigation rules* augmente beaucoup plus rapidement que celle des agents ne jouant pas ce rôle pour atteindre cent pour cent pour une accélération de cent. Les avancées rapides des matériels informatiques nous font croire à la possibilité d'améliorer sensiblement nos performances.

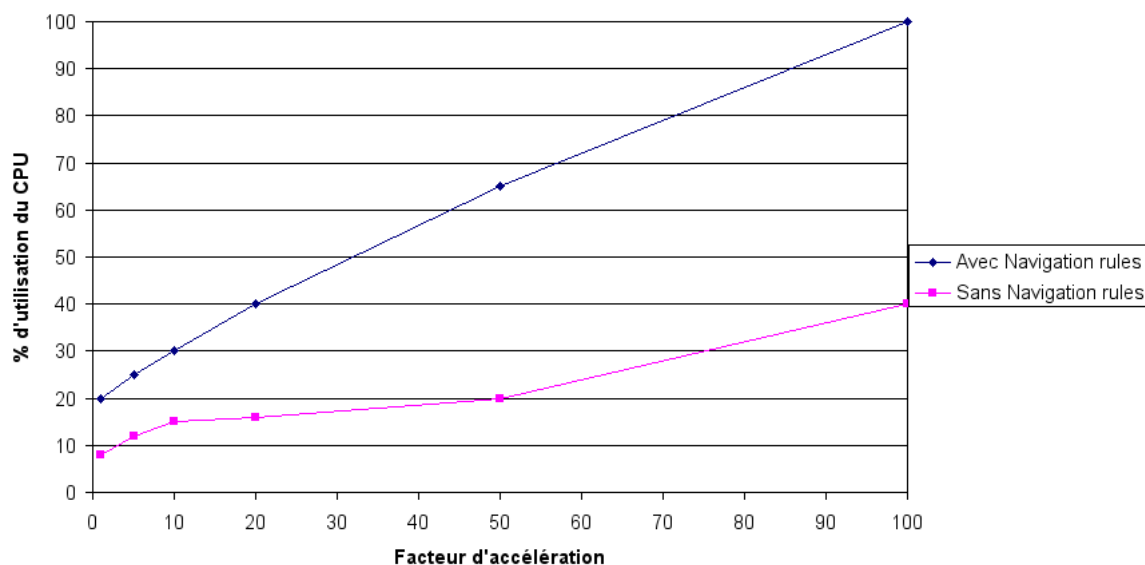


Figure 4.23 — Performance de TRANS en fonction du facteur d'accélération.

4.5 Interopérabilité avec les outils existants

Les scénarios étudiés et l'étude de performance ont montré que TRANS peut être utilisé comme un système d'aide à la navigation. D'autres outils d'aide à la navigation existent et permettent d'obtenir des informations sur le milieu entourant le navire. Ces outils sont principalement dédiés à la surveillance maritime. Ils possèdent donc essentiellement des fonctionnalités permettant d'obtenir des informations sur l'environnement immédiat du navire en temps réel. Ces informations portent sur le positionnement des autres navires, de la ligne de côte et des indicateurs nautiques (bouées, phares et amers). Ces systèmes comprennent le radar ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) [IMO, 1999], l'AIS (Automatic Identification System) [ITU, 2001, UAIS, 2005] et l'ECDIS (Electronic Charts Display and Information System) [IMO, 2000]. La figure 4.24 présente les différents outils qui peuvent être interopérables avec TRANS.

Le radar ARPA est l'un des systèmes actuellement le plus couramment utilisé à bord des navires. Ce système permet le suivi automatique de cibles sélectionnées (pistes). De même, les calculs d'informations primordiales en navigation maritime tels que le CPA (Closest Point of Approach) et le TCPA (Time to Closest Point of approach) sont réalisables (annexe A). Le CPA et le TCPA sont respectivement la distance minimale à laquelle deux navires vont se croiser et le temps pour parvenir à ce croisement.

L'AIS est un système de communication qui donne la possibilité aux navires de transmettre et d'échanger des données de navigation aux autres navires et aux autorités qui en sont équipés dans un rayon de vingt milles nautiques (soit plus de 30 Km). Les données sont délivrées automatiquement. Elles concernent des données dynamiques comme la position, la vitesse et le cap mais aussi des données statiques telles que le numéro d'identification et éventuellement la cargaison si celle-ci est dangereuse. Ces systèmes sont actuellement en cours

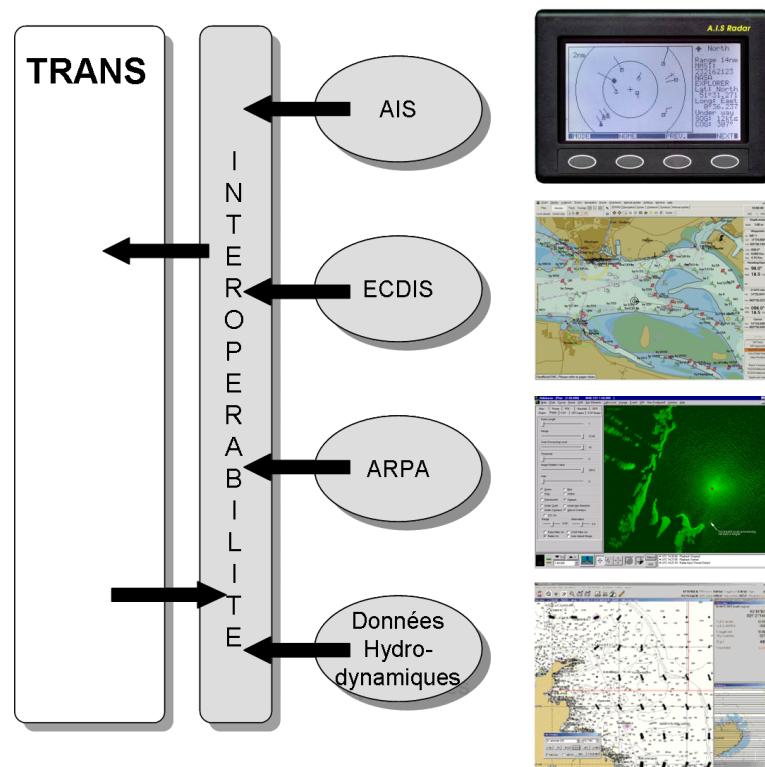


Figure 4.24 — Différentes applications interoperables avec TRANS.

de déploiement. Ils sont obligatoires uniquement sur les navires de fort tonnage, de passagers, les pétroliers et certains navires transportant des matières dangereuses.

L'ECDIS est un système de cartographie électronique vectorielle. Les normes internationales qui le définissent font de lui le successeur légal de la carte marine au format papier. Il positionne en temps réel le navire sur la carte marine à l'aide d'une connexion à un GPS (Global Positioning System). Il possède des fonctionnalités de conception de routes que le navire suivra durant son périple et de journal des événements qui enregistre entre autres, les déplacements du navire. Il compense la petite taille d'un écran par rapport à une carte papier au format A0 par des alarmes. Elles servent à prévenir l'équipage lorsqu'un incident survient comme par exemple la déviation du navire de sa route initiale définie préalablement. La plupart des ECDIS ont aussi la possibilité, d'intégrer des données provenant de l'ARPA et de l'AIS.

Ces systèmes automatisés de navigation sont une partie des outils utilisés par l'officier de quart, contribuant ainsi à la sécurité maritime. Ils apportent des informations en temps réel sur le voisinage du navire. Ces informations sont essentielles et demandent à être intégrées dans TRANS. Cette intégration passe par la réalisation d'une liaison entre TRANS et ces outils par un mécanisme d'interopérabilité. TRANS a aussi besoin d'outils lui fournissant des données sur les vents, les courants et la marée. TRANS apporte en contrepartie à ces outils ses capacités de simulation. Elles lui permettent de prédire les déplacements futurs des navires et d'aider ainsi à la décision lors de risque de collision par exemple. Le prototype

TRANS et ces différents outils sont donc complémentaires et améliorent la sécurité maritime.

4.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté la démarche conceptuelle de TRANS. Cette démarche s'exprime à travers plusieurs aspects :

- L'intégration du raisonnement spatial au sein du système multi-agents ;
- La définition d'une interface permettant de gérer la simulation ;
- La validation des concepts grâce à plusieurs scénarios.

Plusieurs approches d'intégration entre le modèle agent et le modèle de raisonnement ont été présentées. Celle que nous avons retenue, l'approche indépendante, combine évolutivité et flexibilité. Les navires nécessitent un raisonnement spatial afin de sélectionner la manœuvre appropriée pour éviter une collision. Le raisonnement utilisé est basé sur les relations d'orientation et de proximité représenté par un partitionnement de l'espace. Ce partitionnement a été défini au chapitre 2. Il est construit à partir de partitionnements génériques et sa principale particularité est son adaptation au contexte. Des barrières formées par les terres émergées et des groupes spatiaux dont les composants sont les navires modifient ce partitionnement.

Dans le but d'observer et de manipuler les entités spatiales évoluant dans l'environnement maritime, une interface a été mise en place au sein de TRANS. Cette interface donne accès à des fonctionnalités utiles pour la simulation comme la capacité d'ajouter des agents, d'accélérer la simulation et de calculer les trajectoires futures des navires. Les entités spatiales issues des données géographiques sont intégrées à TRANS comme des agents modélisés. Cette modélisation répartit les calculs d'anti-échouement et donne la possibilité de simuler les modifications qui surviennent au cours du temps. Les agents sont introduits dans la simulation de manière dynamique via une interface. L'accélération de la simulation permet à l'utilisateur d'avoir plus rapidement les résultats qu'il souhaite obtenir de la simulation. Il est aussi possible de calculer les trajectoires futures des agents de type *navire* en se basant sur les rôles qu'ils jouent. L'utilisateur prévoit ainsi les déplacements des navires et ces informations sont alors utiles dans un but d'anticipation.

Trois scénarios ont présenté les capacités du modèle utilisé dans TRANS. Chacun d'eux montre les possibilités offertes par TRANS en terme de modèle multi-agents et de raisonnement spatial qualitatif. Le premier scénario expose l'utilisation des contraintes d'acquisition des rôles par les agents et les changements de comportement. Le deuxième scénario présente l'ajout des navires perturbateurs qui ne respectent pas les règles de navigation. L'utilisation du raisonnement spatial donne à un navire la capacité d'éviter ces navires. Le dernier scénario est la modélisation d'un cas réel issu d'un bulletin nautique de la marine nationale. Ce scénario montre la flexibilité de TRANS et l'intérêt d'un tel outil en matière d'étude d'incidents. Il illustre aussi clairement le besoin de données précises et en nombre suffisant afin d'analyser le déroulement d'un incident. En terme de performance, TRANS est capable de simuler un

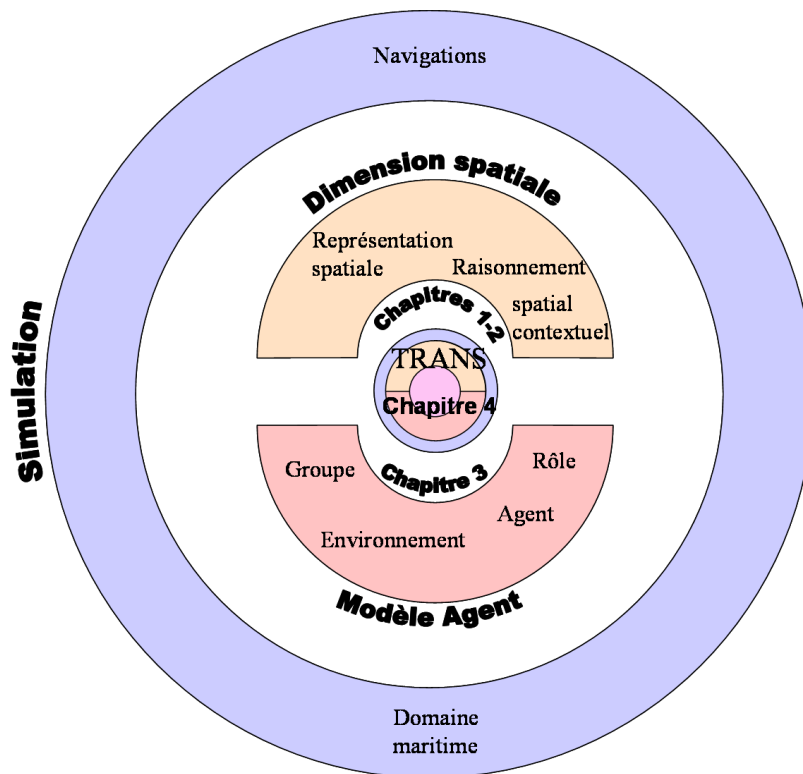


Figure 4.25 — Rappel des concepts développés lors des quatre chapitres.

grand nombre de navires de manière simultanée. Le nombre de navires est compatible avec les observations réelles dans les régions maritimes les plus denses. TRANS peut donc servir de base à la construction de systèmes d'aide à la navigation capable de gérer un nombre important de navires. La figure 4.25 illustre les différentes étapes de la démarche que nous avons réalisée pour l'intégration de la dimension spatiale au sein d'un système multi-agents formant un prototype qui exploite les concepts définis.

Conclusion générale

Contribution

La compréhension des phénomènes passés, présents et futurs est l'une des préoccupations majeures de la science. L'une des méthodes privilégiées d'observation des dynamiques du monde réel, qui participe à cette volonté de compréhension de la nature et de ses dynamiques, consiste à associer des techniques de modélisation à des outils de simulation. La simulation est devenue, avec la conjonction du développement des sciences et des outils informatiques, l'un des outils essentiels dans de nombreux domaines tels que la sociologie, les sciences de l'environnement, la biologie et la géographie. L'une des particularités des phénomènes géographiques est la liaison étroite existante entre l'espace géographique et les entités qui le composent. Pour les scientifiques et les concepteurs d'outils de modélisation et de simulation, il est primordial de représenter finement cet environnement géographique et les interactions de ce milieu. C'est notamment le cas des systèmes multi-agents, outils de simulation orientés vers la reproduction et la compréhension de systèmes complexes. L'espace géographique est en effet complexe, et sa modélisation doit tout d'abord amener les concepteurs à choisir une représentation adaptée aux objectifs de la simulation. La prise en compte du facteur humain dans les simulations, où l'homme est un acteur, entraîne nécessairement la modélisation des formes de raisonnement spatial qui dérivent de la perception et génèrent les actions à entreprendre au sein de l'environnement. Ces actions sont réalisées par des acteurs le plus souvent modélisés par des entités spatiales auxquelles sont associées des actions physiques sur ou dans l'environnement, comme le déplacement des entités spatiales, et les changements de comportement de ces dernières. Le domaine de la simulation de navigations maritimes a été utilisé comme fil conducteur de notre recherche pour caractériser la démarche de conception d'une simulation de phénomènes géographiques. Ce domaine, de par sa complexité et sa dynamique, permet de valider les concepts qui ont été développés dans cette thèse. Les entités spatiales qui le composent sont hétérogènes et diversifiées, possèdent un comportement changeant et la dynamique de l'environnement les influence. Plusieurs éléments sont apparus comme nécessaires à la conception d'une simulation de navigations maritimes. Ces éléments sont les suivants :

- Une représentation vectorielle de l'espace qui permette de représenter finement les trajectoires et de modéliser explicitement les entités spatiales de la simulation ;

- Un mode de raisonnement spatial qualitatif et contextuel qui donne la possibilité aux entités spatiales de raisonner à partir des relations d'orientation et de proximité ;
- Un modèle multi-agents basé sur les paradigmes de rôle et de groupe dans le but de fournir un comportement modifiable aux entités spatiales au cours de la simulation, et de permettre de modéliser leurs regroupements qu'il soient spatiaux ou fonctionnel.

Le premier chapitre de ce manuscrit montre que la simulation de trajectoires d'entités spatiales, comme celles des navires, demande une grande finesse de représentation et une expression explicite des entités spatiales et de leurs relations. Ce besoin écarte de fait le choix d'une représentation spatiale définie par un partitionnement de l'espace en une grille régulière. Contrairement à cette dernière, la représentation vectorielle de l'espace est mieux adaptée à la modélisation de trajectoires, et permet de plus une meilleure conservation des formes des entités spatiales et des relations topologiques entre ces entités. Dans la mesure où, dans le cadre des simulations à caractère géographique, l'environnement spatial et les entités spatiales simulées sont fortement liés, il nous a paru nécessaire de définir les notions d'agent spatial et de système multi-agents spatial. Ce chapitre, en se basant sur un état de l'art, établit les insuffisances des représentations spatiales utilisées actuellement dans les simulations multi-agents. Dans ces simulations, la représentation spatiale utilisée est le plus souvent définie par une grille régulière qui est certes aisée à mettre en œuvre mais n'exprime pas au mieux la complexité de l'espace géographique. L'espace est aussi généralement perçu dans les systèmes multi-agents comme un environnement passif dans lequel se situent les agents. Ce milieu évolue cependant constamment et participe à l'émergence de contraintes qui s'exercent sur les actions et les interactions des agents. Les entités spatiales qui composent le milieu demandent, au même titre que les entités spatiales dynamiques comme les navires, d'être un acteur de la simulation et d'être modélisées par des agents.

Les entités spatiales évoluent dans un environnement complexe et dynamique dans lequel elles réalisent des actions. Pour réaliser ces actions, les entités spatiales nécessitent de raisonner dans l'espace. Le raisonnement spatial qualitatif est la solution que nous avons choisie pour modéliser les capacités de raisonnement dans l'espace des agents. Ce raisonnement offre notamment, de part sa proximité avec le processus décisionnel humain, des facilités pour la compréhension par les humains de la manière dont les décisions vont être prises. Dans le cadre de la simulation de navigations maritimes, la base du raisonnement spatial repose principalement sur les relations d'orientation et de proximité. Les raisonnements spatiaux classiques basés sur ces relations conviennent lorsqu'ils sont utilisés hors d'un contexte particulier. L'un des apports de cette thèse consiste en l'utilisation des raisonnements spatiaux qualitatifs dans un contexte spécifique, ce qui prolonge les résultats actuels du raisonnement spatial qualitatif par une mise en contexte qui génère des contraintes particulières et raffine les relations spatiales. Nous avons montré au chapitre 2 que le contexte influence l'expression du raisonnement spatial qualitatif et en particulier les relations d'orientation et de proximité. Cette influence contextuelle est déterminée par les éléments qui composent le milieu. Nous avons identifié et modélisé les éléments dont l'influence nous semble être la plus importante

sur les relations d'orientation et de proximité. Ces éléments sont les suivants :

- Les niveaux de perception, qui expriment dans le domaine maritime les différences d'appréhension des différents types de navires notamment ;
- Les actions d'une entité spatiale comme le fait de rattraper un autre navire ;
- Les règles et règlements du domaine telles que les règles de navigation ;
- Les usages qui forment les particularités du domaine ;
- La dynamique des entités spatiales et principalement leur vitesse ;
- Les barrières, concept introduit et utilisé pour modéliser des zones inaccessibles aux entités spatiales ;
- Les groupes spatiaux construits en utilisant la notion de zone d'influence qui détermine la proximité minimale à laquelle se trouvent les entités spatiales pour former un groupe.

L'ensemble de ces éléments contextuels, et la prise en compte des modifications qu'ils engendrent, constituent un premier pas vers l'utilisation et l'adaptation du raisonnement spatial qualitatif à un contexte particulier. Cet ensemble, qu'il est aussi possible d'enrichir, donne un cadre pour la conception de raisonnements spatiaux qualitatifs contextuels. Un concepteur peut déterminer, à partir des éléments de cet ensemble, ceux qu'il souhaite conserver et éventuellement en ajouter de nouveaux en fonction de ses objectifs de modélisation.

Dans le domaine maritime, les entités spatiales sont hétérogènes et possèdent des comportements changeants. Certaines configurations de ces entités spatiales révèlent une structure organisationnelle comme le rassemblement de navires de pêche en flottille. D'un point de vue de la modélisation, il est nécessaire d'exprimer ces caractéristiques – différence de comportement et leur changement, formation de groupe – du domaine maritime dans le modèle multi-agents pour réaliser des simulations de navigations maritimes. Les modèles multi-agents les plus à même de modéliser les comportements des agents et leurs changements, ainsi que la formation de groupes, sont ceux qui introduisent les concepts d'agents, de groupe et de rôle. Dans le chapitre 3, un état de l'art montre que ces modèles demandent cependant certaines adaptations pour simuler des navigations maritimes. L'une des contributions de cette thèse réside dans la conception d'un modèle multi-agents basé sur ces concepts d'agent, de groupe et de rôle auxquels nous avons ajouté et formalisé les propriétés suivantes :

- Le concept d'environnement pour pleinement tenir compte de l'aspect géographique et de la dynamique de son évolution.
- La notion de groupe spatial comme complément à la notion de groupe pour modéliser la constitution de regroupement en fonction des proximités entre entités spatiales.
- La gestion des conflits entre rôles en utilisant une contrainte globale aux rôles : les priorités.
- La gestion de l'acquisition des rôles en ajoutant des propriétés et des contraintes aux rôles comme l'exclusivité, l'incompatibilité, l'inconciliabilité et la permanence.

Ces propriétés offrent une gestion des rôles dynamique et automatique et permettent d'intégrer pleinement l'espace géographique au sein du modèle multi-agents. Ce modèle donne une alternative de modélisation pour la simulation de phénomènes géographiques. Les capacités et l'intérêt d'un tel modèle, basé sur les paradigmes de rôle et de groupe, sont révélés dans le chapitre 3 par la modélisation des principales entités spatiales et de leurs comportements dans le domaine de la simulation de navigations maritimes.

La conception du prototype TRANS expérimente et valide les concepts développés au sein du système multi-agents. Il réalise aussi l'intégration dans le système multi-agents du raisonnement spatial qualitatif contextuel. Afin de réaliser cette intégration, nous avons créé et défini plusieurs approches qui donnent aux agents la capacité d'utiliser le raisonnement spatial :

- L'approche monolithique où le raisonnement spatial est défini statiquement par un partitionnement de l'espace lors de la conception de l'agent. Le raisonnement spatial est alors identique quels que soient les rôles que l'agent joue.
- L'approche composant où chaque rôle apporte un partitionnement qui définit le raisonnement spatial associé. Les différents partitionnements fournis par les rôles se combinent pour former le partitionnement de l'agent.
- L'approche indépendante où, comme l'approche précédente, chaque rôle apporte un raisonnement spatial local. Contrairement à l'approche composant, les partitionnements ne s'additionnent pas et s'exécutent indépendamment les uns des autres.
- L'approche composant et indépendante associe les deux approches précédentes, l'agent détermine laquelle des deux approches utiliser en fonction de son comportement.

L'approche que nous avons retenue pour réaliser l'intégration du raisonnement spatial dans le système multi-agents est l'approche indépendante. Cette approche donne une flexibilité suffisante au raisonnement spatial, et permet de définir des processus de décision indépendant pour chaque rôle.

Le système multi-agents et le raisonnement spatial forme la base de TRANS. Le prototype TRANS utilise des cartes marines vectorielles fournies par le SHOM. Les entités spatiales dérivées des données de ces cartes sont distribuées au sein d'agents représentant l'espace environnemental selon un découpage fonctionnel en terres et en zones de profondeur. Ce découpage permet d'avoir des régions de l'espace avec des comportements différents face aux autres entités spatiales et de répartir de manière plus homogène les calculs entre les agents (anti-échouement, anti-collision). Une étude des performances du prototype et son utilisation suivant divers scénarios montre la capacité et l'utilité de TRANS dans des situations réalistes. La limite en nombre d'agents de TRANS, lors d'utilisation de rôles complexes tels que celui gérant les règles de navigation, se situe aux alentours de quelques centaines, ce qui est satisfaisant pour la simulation de navigations maritimes.

Extensions conceptuelles

Les concepts que nous avons développés sont adaptés à la simulation de phénomènes géographiques et plus particulièrement à la simulation de navigations maritimes. Ils garantissent que les entités spatiales soient capables de raisonner spatialement, de changer de comportement et de déterminer les actions appropriées aux situations rencontrées. Le cadre de modélisation et de simulation doit pouvoir être enrichi à plusieurs niveaux, notamment à partir d'extensions possibles du modèle de raisonnement spatial qualitatif, du modèle multi-agents, et de l'approche permettant le couplage des deux.

Extensions du modèle de raisonnement spatial

La définition des contraintes de déformation des relations d'orientation et de proximité est potentiellement extensible par des notions complémentaires à celles purement spatiales comme les propriétés sémantiques. De telles propriétés pourraient être introduites lors de la formation de groupe, en complément du critère de proximité utilisé actuellement. De telles propriétés pourraient concerner la prise en compte du pavillon ou du type de navire. Un ensemble de navires possédant deux pavillons différents, proche les uns des autres, pourraient former deux groupes distincts.

Certaines situations demandent d'étendre les capacités du raisonnement spatial identifié par le modèle actuel. Lorsque par exemple un agent de type *ship* détecte une collision potentielle, il n'anticipe pas dans le calcul de son prochain cap les trajectoires des entités spatiales qu'il peut rencontrer lorsqu'il réalise sa manœuvre d'évitement. Une extension possible du raisonnement spatial identifié consisterait à prendre en compte les navires qui se trouvent au delà des régions déterminant les propriétés du raisonnement spatial. Deux extensions et approches sont possibles et restent à étudier afin d'identifier si l'une présente un avantage déterminant ou pas :

- Les relations de proximité sont étendues au delà des limites spatiales du raisonnement spatial actuel, c'est à dire au-delà de la relation *lointain* ;
- Un second raisonnement spatial est utilisé en complément du raisonnement spatial utilisé pour gérer les évitements de collision. Cette deuxième solution nécessiterait de concevoir des relations d'orientation différentes de celles actuellement identifiées.

Extensions du modèle multi-agents

Le modèle multi-agents identifié par notre recherche gère l'acquisition des rôles et la gestion des conflits entre les rôles en se basant sur une méthode utilisant des contraintes globales. Cette méthode est suffisante pour exprimer pleinement les modalités de changements de rôles et résolution de conflits dans le domaine maritime. Les modèles multi-agents existant et utilisant les rôles exploitent pour la gestion de l'acquisition et des conflits des contraintes plus locales basées sur les capacités et les ressources des rôles et des agents. Il serait donc

judicieux d'étendre notre modèle en étudiant et éventuellement exploitant ces deux stratégies afin d'avoir un plus large panel de solutions à proposer aux concepteurs, et ainsi s'adapter au mieux à leurs objectifs.

Du point de vue de l'exécution du modèle, la méthode sélectionnée pour gérer les conflits impose une exécution séquentielle des rôles. Cette gestion limite cependant les possibilités d'utilisation des rôles. Prenons dans le domaine maritime l'exemple d'une bouée lumineuse. Lorsque cette bouée est modélisée par notre modèle, celle-ci devient un agent de type *infra-structure* qui joue deux rôles : *lighthouse* et *buoy* avec deux priorités différentes. Ces deux rôles sont joués simultanément, mais ils sont exécutés séquentiellement, suivant leur priorité. Il n'existe donc pas d'adéquation entre le phénomène réel et le phénomène simulé. Le seul moyen d'arriver à ce résultat est de modéliser chaque rôle, en plus de chaque agent, par des processus indépendants. Une autre gestion des conflits, utilisant par exemple le principe des "mutex", serait alors nécessaire.

L'approche permettant l'intégration du modèle de raisonnement spatial et du modèle multi-agents peut être étendue. Notre modèle AGR est basé sur un mode opératoire qui retient l'approche indépendante. Cette approche est adaptée à la simulation de navigations dans le domaine maritime. Dans le cadre de l'utilisation dans d'autres domaines du modèle multi-agents associé à un raisonnement spatial, il reste à déterminer si l'approche retenue est adaptée à ce domaine. Ces solutions sont soit, l'extension de l'approche actuelle soit, l'utilisation de l'approche composante et indépendante.

Extensions logicielles

Afin de compléter les fonctionnalités du prototype TRANS et de le rendre plus opérationnel, il serait utile d'ajouter les types d'agent et les types de rôle. Parmi les types d'agent et de rôles qui seraient utiles, ceux qui représentent les phénomènes naturels comme la marée, le vent et le courant semblent être les plus essentiels. Ces agents pourraient servir d'interface avec des logiciels dédiés à la simulation de tels phénomènes, et permettre de recevoir ces données en temps réel, ce qui permettrait une ouverture fonctionnelle du prototype TRANS.

Surveiller le trafic maritime ne se limite pas à une préoccupation locale. Il est en effet utile de pouvoir suivre un navire tout le long des côtes et de faciliter la coopération entre les régions de contrôle et de gestion. Cette préoccupation est actuellement à l'ordre du jour des autorités maritimes françaises et la mise en œuvre d'un système d'échange d'information sur les navires entre les différents CROSS est en passe d'être mis en place [edifrance, 2000]. Il serait donc pertinent d'étendre la plate-forme TRANS pour pouvoir échanger, non plus seulement des informations sur les navires, mais des agents entre différentes régions maritimes. Ces échanges permettraient de simuler des navigations maritimes à travers plusieurs régions, de transférer les agents lorsqu'ils changent de région, et de garder ainsi une continuité dans leurs comportements. Un tel système de fait distribué aurait aussi la possibilité

de simuler un plus grand nombre de navires simultanément. Le passage de TRANS au distribué mènerait à l'étude des plates-formes multi-agents distribuées déjà opérationnelles et de la gestion distribuée de données géographiques [Bouju *et al.*, 2003]. Dans ce cadre, des stratégies de distribution et de collaboration restent à concevoir. C'est dans ce cadre que la thèse en cours de Valérie Noyon au sein du groupe de recherche en SIG de l'IRENav, en continuité de cette thèse constitue de ce point de vue un prolongement naturel de nos travaux [Noyon et Devogele, 2004]. Les agents étant des processus, il sera notamment nécessaire de définir une stratégie adéquate pour leur passage d'une machine à une autre sans perdre leur état antérieur avant leur migration, afin de garder une exécution cohérente. Dans le cas des CROSS, notons que les régions de surveillance ne sont pas toujours contiguës. Cette discontinuité impose de définir des mécanismes permettant de pallier ce problème lors du passage d'un navire agent d'une région à une autre.

Perspectives applicatives

TRANS est avant tout un prototype qui a permis de valider et enrichir les concepts développés dans cette thèse. Il est toutefois possible de l'étendre afin d'augmenter ses capacités applicatives. Ces orientations applicatives utilisent TRANS comme une base sur laquelle vont se développer leurs spécificités. Elles sont abordées dans la suite de cette section.

Entraînement des marins

Les futurs marins ont besoin de s'entraîner pour appréhender de manière optimale l'environnement maritime et ses dangers. Ils doivent en particulier savoir anticiper les situations à risques et les éviter en appliquant les règles de navigation. Cette expérimentation dans un environnement particulier demande de simuler les entités évoluant autour du navire. Ce navire est contrôlé par les élèves afin de les placer dans des situations à caractère réel. Une telle application nécessite un environnement de simulation très flexible où il est possible de modifier aisément tous les paramètres de la simulation et les comportements des navires. La simulation étant ciblée sur des points précis que les élèves doivent appréhender, relativement peu d'entités, de l'ordre d'une vingtaine, ont besoin d'être simulées simultanément. La gestion de plusieurs navires en simultanés peut aussi être réalisée par la mise en réseaux de plusieurs élèves, et permettraient de les confronter à des exercices communs d'exécution de scénarios en formation. Des aides de type agent conversationnel pourraient être ajoutées. De tels agents communiqueraient avec l'élève en langage naturel pour que celui-ci puisse faire des exercices en toute autonomie lors de formation continue à bord des navires par exemple. Les extensions nécessaires pour réaliser un tel outil seraient donc les suivantes :

- La définition d'une interface donnant la possibilité à un intervenant de diriger un navire ;
- Un éditeur de scénarios afin d'aisément construire des situations pour que les élèves puissent s'exercer ;

- L'amélioration de l'interface pour ajouter des fonctionnalités supplémentaires telles que la sauvegarde de l'exercice en cours et la possibilité de diriger un navire ;
- L'ajout d'un agent conversationnel pour la formation en autonomie ;
- La mise en réseau pour faire interagir plusieurs élèves.

Aide à la décision à bord des navires

Les membres d'équipage sont de moins en moins nombreux sur les navires et en passerelle. Il est donc essentiel de les aider dans la tâche complexe de direction d'un navire. L'objectif d'une telle application serait de prévoir les trajectoires des navires dans le voisinage et de proposer des solutions qui respectent les règles de navigation. Les officiers de quart disposeraient ainsi d'un outil pour gérer des situations complexes. Cet outil leur permettrait de tester les décisions qu'ils souhaitent prendre et ainsi éliminer les décisions inappropriées. L'aide à la décision à bord des navires nécessite de pouvoir percevoir l'entourage du navire. Cet entourage se compose des entités que le navire perçoit avec les instruments qui se trouvent à son bord comme le radar ou l'AIS. L'acquisition des données en temps réel à partir de ces instruments est donc primordiale ainsi que des mécanismes automatiques pour attribuer aux navires récemment détectés un comportement type. Ce dernier permet ensuite de modéliser la trajectoire future du navire que l'officier de quart souhaite suivre. Dans les eaux denses en navires, le nombre de navires à prendre en compte peut aisément atteindre la soixantaine. Les extensions pourraient alors être les suivantes :

- L'interopérabilité avec les instruments de bord des navires comme le radar ARPA et le GPS (Global Positioning System) ;
- L'ajout de manœuvres d'évitement supplémentaires pour fournir au chef de quart plusieurs solutions lors d'une collision potentielle ;
- La détection des navires potentiellement dangereux pour en informer l'équipage et ainsi anticiper pour les croiser à une distance suffisante (ex : trajectoires suspectes, cargaison dangereuses).

Aide à la surveillance du trafic maritime

Avec l'augmentation constante du trafic maritime, les opérations de surveillance deviennent de plus en plus complexe. Plusieurs centaines de navires sont parfois suivies par les stations de surveillance qui doivent se concentrer sur les cas les plus dangereux pour la sécurité en mer. Il est donc primordial de détecter et de suivre ces cas avant qu'un incident ne se produise. Faire le tri entre les navires demandent donc de prévoir, en fonction de leur comportement, les trajectoires potentielles de ces navires. L'application doit alors pouvoir gérer quelques centaines de navires en simultané à partir de données réelles provenant de radars et d'AIS, et simuler leurs comportements futurs sur de larges régions composées de plusieurs cartes marines. Le but de cette application est d'identifier les éléments dangereux ou susceptibles de l'être, et de les suivre afin de simplifier le travail des opérateurs (ex : cargaison dangereuse, comportement aberrant). Deux niveaux d'affichage sont donc nécessaires. Un premier niveau

où se fait l'identification des navires à risque et un deuxième niveau qui permet de suivre chacun de ces navires et leur voisinage local. Ce niveau se limite à la simulation d'une vingtaine d'entités. Les extensions suivantes seraient nécessaires :

- L'interopérabilité avec les systèmes actuels de surveillance comme le radar ARPA et l'AIS ;
- L'intégration et la gestion de plusieurs cartes afin de couvrir toute la zone de surveillance ;
- La possibilité d'ajout d'informations complémentaires sur les navires (numéro de téléphone, identifiant, cargaison, port de départ, port d'arrivée) ;
- L'aide à la détection et au suivi des navires potentiellement dangereux par un double niveau d'affichage ;
- La mise en réseau de TRANS afin de réaliser la migration des agents entre les sites de surveillance.

Etude d'incidents

Lors d'un incident (ex : échouement, collision), comprendre sa cause et l'implication des protagonistes sont des éléments essentiels pour générer une base de connaissance qui permette d'améliorer les comportements futurs et leur régulation. L'étude des conditions qui ont menées à cet incident et simuler le scénario qui en découle, permettent d'obtenir des informations utiles. Pour comprendre les causes de l'incident, presque toutes les données proviennent des protagonistes de l'incident simulé. Ces données sont aussi bien quantitatives, comme le relevé des positions des navires par un GPS, que qualitatives comme la description des actes de l'équipage. Cette dualité demande de définir et d'utiliser un langage de description de scénarios adapté. Le scénario est alors stocké dans une base de connaissances répertoriant ces incidents. Pouvoir rechercher et comparer les scénarios à la recherche de similarités donnerait une base de travail pour contribuer à améliorer la sécurité maritime. Le nombre de protagonistes est généralement relativement faible, mais demande des outils efficaces pour la gestion de scénarios. Pour réaliser un tel outil, les extensions du prototype TRANS à envisager pourraient être les suivantes :

- Un éditeur de scénarios pouvant aussi bien utiliser des données qualitatives que quantitatives ;
- Une base de connaissances sauvegardant les scénarios ;
- La possibilité de faire des requêtes sur les scénarios de la base de connaissances et de les comparer (requête de similitude).

Conduite de drones marins

Dans un contexte d'utilisation dans le domaine expérimental, les drones, même s'ils ont une route précalculée doivent s'adapter à leur environnement et comme les navires éviter d'entrer en collision et de s'échouer. La prévision des trajectoires des navires dans leur voisinage

est nécessaire. Ces manœuvres d'évitement doivent respecter les règles de navigation pour notamment ne pas surprendre et se faire surprendre par les navires aux alentours et ainsi éviter des incidents. Une telle application doit être embarquée et doit être limitée en utilisation de ressources par rapport à celles précédemment décrites. Les drones sont généralement déployés dans des zones où se trouvent relativement peu d'autres navires, ce qui permet de limiter les calculs d'anti-collision et de prévision de trajectoires. Cette application de TRANS demande une amélioration des performances et la suppression de l'interface. Les extensions suivantes peuvent être envisagées :

- Modification de la route prévue en fonction du changement d'objectifs du drone ;
- Interfaçage avec les senseurs de ce dernier (AIS, radar, sonar).

Généralisation et bilan

La démarche proposée par notre recherche a été validée dans un contexte de navigations maritimes. Si les approches et les concepts sont définis dans cette optique, il est possible de les étendre pour les utiliser dans d'autres domaines d'application tels que la simulation de mouvements des piétons et la navigation aérienne. La simulation de piéton possède des similarités avec la simulation de navigations maritimes. Les piétons ont trois degrés de liberté pour leur déplacement. Contrairement aux navires, ces déplacements sont contraints dans la majorité des cas par les corridors que forment les trottoirs ou les murs dans les bâtiments, les piétons pouvant toutefois se déplacer librement dans certains lieux comme les parcs. Ces différences demandent de concevoir un type de raisonnement spatial qui prenne en compte toutes les spécificités de ce domaine. Par contre, le modèle multi-agents semble plus adapté à la modélisation des entités spatiales représentant les piétons. Ces derniers possèdent en effet une grande diversité de comportements flexibles. Du point de vue de la simulation aérienne, les principales différences avec la navigation maritime se situent dans le passage à une troisième dimension et le suivi de couloirs aériens. Les relations d'orientation doivent tenir compte de cette extension et intégrer des relations supplémentaires modélisant la verticale. Le modèle multi-agents associé à la démarche de création du raisonnement spatial fournit une base pour créer des systèmes multi-agents d'information géographiques orientés vers la simulation d'entités spatiales mobiles. Un tel système aurait les capacités d'un système d'information géographique pour la gestion des données géographiques et de celles d'un système multi-agents pour la gestion de la simulation. Un travail reste cependant nécessaire pour que ces outils soient directement accessibles à partir d'un véritable système d'information géographique et n'utilisent pas des données géographiques dont l'accès est réalisé par des fonctions "ad hoc".

L'intégration de la dimension spatiale dans les systèmes multi-agents pour la simulation de phénomènes à composante géographique est complexe et mérite une véritable réflexion pluridisciplinaire sur le plan conceptuel. Il ne semble pas exister de solution unique à cette problématique, mais la démarche présentée par notre recherche explore la conception d'une solution adaptée au contexte de la simulation de navigations maritimes. Le contexte de la

démarche s'appuie cependant sur des concepts génériques qui participent à la réalisation du modèle multi-agents. Ce système multi-agents constitue un pas supplémentaire vers l'émergence, dans le cadre de la simulation de phénomènes géographiques, d'un outil intégré générique et flexible. Cet outil allierait les capacités en terme de simulation d'un système multi-agents et celles d'un système d'information géographique en ce qui concerne la gestion et l'analyse de données géographiques.

L'aspect fortement contextuel des simulations souligne le besoin de définir un cadre méthodologique guidant le concepteur lors de la modélisation. La recherche de cette thèse s'inscrit comme une première ébauche vers un guide spécifiant, selon les particularités de la simulation, les éléments à prendre en compte pour l'intégration de la dimension spatiale. La prise en compte de la dimension spatiale n'est cependant qu'une part du processus complexe de création d'une simulation à caractère géographique. Le concepteur ne doit donc pas négliger les autres éléments du phénomène qu'il souhaite simuler, l'association de ces éléments et la prise en compte de la dimension spatiale formant un tout indissociable.

A

Calcul de la DCPA et du TCPA

Angles et mesures en navigation maritime

Calcul de la DCPA et du TCPA

La DCPA (Distance of Closest Point of Approach) est la distance minimale à laquelle deux navires vont se croiser. Le TCPA est l'instant pour lequel les deux navires se trouvent à cette distance.

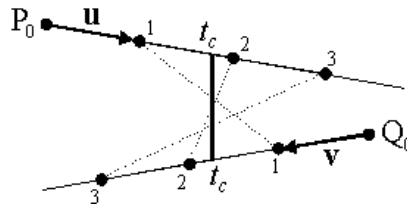


Figure A.1 — Schéma illustrant le calcul de la DCPA.

Soient deux navires dont les positions au temps t sont $P(t)$ et $Q(t)$ (figure A.1). Leurs positions à $t = 0$ sont $P_0(X_{A0}, X_{B0})$ et $Q_0(X_{B0}, Y_{B0})$. Leurs vecteurs vitesses sont respectivement \vec{u} et \vec{v} . Le mouvement des navires est considéré comme rectiligne et leurs équations du mouvement sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 + \vec{u}t \\ Q(t) &= Q_0 + \vec{v}t \end{aligned}$$

Les calculs de la DCPA et du TCPA s'effectuent à cap et vitesse constant. Il est alors possible de calculer la distance $d(t)$, en fonction de t , des deux navires par l'équation suivante :

$$d(t) = \|P(t) - Q(t)\| = \|(P_0 - Q_0) + (\vec{u} - \vec{v})t\|$$

$d(t)$ est minimum lorsque $d(t)^2$ est minimum, et se calcule comme suit :

$$d(t)^2 = (\vec{u} - \vec{v}) \cdot (\vec{u} - \vec{v}) t^2 + 2(P_0 - Q_0) \cdot (\vec{u} - \vec{v}) t + (P_0 - Q_0) \cdot (P_0 - Q_0)$$

Le minimum est atteint lorsque :

$$\frac{d}{dt} d(t)^2 = 2t [(\vec{u} - \vec{v}) \cdot (\vec{u} - \vec{v})] + 2(P_0 - Q_0) \cdot (\vec{u} - \vec{v}) = 0$$

Le TCPA noté t_c est obtenu par :

$$t_c = \frac{-(P_0 - Q_0) \cdot (\vec{u} - \vec{v})}{\|\vec{u} - \vec{v}\|^2}$$

Lorsque $\|\vec{u} - \vec{v}\| \neq 0$, une fois le TCPA calculé, la DCPA est obtenue de la manière suivante :

$$d_{CPA}(P(t), Q(t)) = \|P(t_c) - Q(t_c)\|$$

Dans le cas où $\|\vec{u} - \vec{v}\| = 0$, les deux navires voyagent dans la même direction à la même vitesse et la distance est constante. Il est alors possible de calculer la distance pour un TCPA nul. Un TCPA négatif signifie que la DCPA a été atteinte dans le passé et les deux navires s'éloignent l'un de l'autre.

ANNEXE

B

Bulletin sécurité nautique

Circonstances

Généralités

Au mois de mai, une frégate en transit à 20 nds de Dunkerque vers les approches de Lorient, est abordé à 0528B au Sud de PENMARC'H sur son bâbord arrière par un chalutier. A la suite du choc, une voie d'eau s'est déclarée sur le chalutier qui a coulé une heure plus tard après que ses trois hommes d'équipage aient été repêchés par un autre chalutier.

Organisation du bâtiment – Météo

Le bâtiment navigue par demi bordée. Tout le personnel est à son poste. Le commandant s'est couché après avoir inscrit au journal de navigation ses ordres pour la nuit. Ces ordres stipulent sans ambiguïté la possibilité de réduire de vitesse pour la sécurité de la navigation.

La mer est belle et la visibilité supérieure à 8 nautiques. Il fait nuit (début de l'aube à 0547B).

Déroulement de l'accident

0415 Prise de fonction du chef de quart. Le bâtiment est en route au 120 (route tracée par le commandant) à 20 nds. Après quelques manœuvres d'ami collision, le bâtiment se retrouve à droite de la route (1,5 Nq).

0450 A l'approche de la pointe de Penmarc'h, le trafic devient dense, plus de 40 pistes apparaissent sur l'écran radar, et l'officier de quart privilégie trois groupes de bâtiments route au suroît qui paraissent les plus dangereux, deux sur bâbord et un sur tribord. Les bâtiments se situent entre 5 et 10 N.

0459 Sur indication du RACAL de la passerelle confirmée par le CO qui signale un CPA nul sur le groupe NR1 (sur bâbord avant), l'officier de quart manœuvre sur la droite et vient au 140, le CPA devient alors de 1000 yds sur l'arrière, ce qui correspond à la

DMP fixée par le commandant pour les petits bâtiments.

Vers 0513 Ce groupe étant paré, l'officier de quart envisage de passer entre le groupe NR2 et le groupe NR3. Il vient cependant route au 115 pour se rapprocher de la route du commandant. A cette route, le groupe NR 2 est paré, mais le groupe 3 (sur bâbord) est annoncé en CPA nul par le CO, ce que confirme le RACAL de la passerelle.

Vers 0516 L'officier de quart, qui se tient alors sur l'aileron bâbord, revient sur la droite au 140 environ pour avoir le groupe NR2 sur tribord avant et le groupe NR 3 sur bâbord avant.

Vers 0518 Le CO annonce à nouveau un CPA nul sur le groupe NR3.

Vers 0520 L'officier de quart sur l'aileron bâbord assure l'anti collision à vue sur le groupe NR 3 qui s'avère être deux chalutiers. Le CO n'annonce plus les CAP nuls. Pour le chef du quart, le plus proche semble défiler gauche assez rapidement, tandis que le plus éloigné sur l'avant (le "RV") semble également défiler sur l'arrière, mais moins vite. Il reste à 20 nds pour conserver une marge de vitesse significative sur les bâtiments de pêche.

Vers 0526 Le premier chalutier passe entre 500 et 1000 yds sur l'arrière du bâtiment. Le "RV" qui semble être en route au 240 à 8 nds ne change ni route, ni vitesse. La présence du groupe NR 2 sur tribord avant, rend difficile toute manœuvre sur la droite. La frégate a une route voisine du 160.

Vers 0528 La frégate est heurtée sur bâbord à environ 30 mètres du tableau arrière et à 2 mètres environ au dessus de la flottaison par l'étrave du chalutier "RV". Une dernière manœuvre de sauvegarde est tentée par l'officier de quart qui ordonne à gauche 15 puis aussitôt zéro. Le "RV" coule une heure plus tard.

Conséquences

Aucune conséquence au personnel. L'équipage du "RV" est recueilli par un chalutier.

Au matériel, la frégate a un léger enfoncement de la coque sur bâbord à environ trente mètres du tableau arrière. Le chalutier est perdu.

Causes

Cause principale

La cause principale est la non application par le chalutier de la règle 15 du règlement pour prévenir les abordages en mer : "Lorsque deux navires à propulsion mécanique font des routes qui se croisent de telle sorte qu'il existe un risque d'abordage, le navire qui voit l'autre navire sur tribord doit s'écarter de la route de celui ci et, si les circonstances le permettent, éviter de croiser sa route sur l'avant".

On notera qu'à bord du chalutier en transit vers les lieux de pêche et qui arbore ses feux

de navire à propulsion mécanique faisant route, il n'y a personne à la passerelle, le capitaine jette un coup d'œil dehors toutes les demi heures environ (déclaration du capitaine au tribunal maritime de commerce).

Cause secondaire

La cause secondaire est la réaction inadaptée de la frégate dans une situation potentiellement délicate (encombrement, nuit, vitesse élevée).

En effet, face à un navire qui ignore les règles internationales pour prévenir les abordages en mer, le chef du quart se fait surprendre par une mauvaise appréciation des cinématiques. Il commet plusieurs erreurs

- Une erreur d'appréciation sur un CPA nul ;
- Le non respect des instructions pour la mer du commandant pour ce qui concerne la DMP (1000 yds), un excès de confiance en soi qui le conduit à conserver une vitesse élevée dans un environnement qui justifiait une réduction de vitesse, même si un transit à 20 nds dans une situation de ce type n'ait, avec un bon chef du quart, rien d'anormal puisqu'il permet au contraire de profiter de capacités de manœuvre bien supérieures ;
- Enfin, il mésestime trop le fait que les pêcheurs, souvent occupés à préparer leurs appareils, n'assurent pas toujours la veille attentive qui conviendrait.

On notera qu'il est peu aidé par le CO qui semble d'autant moins concerné par la situation que la passerelle ne sollicite aucune aide.

Commentaire

Pour être un "abordé prioritaire", la frégate n'en n'est pas moins un "abordé", ce qui n'est guère satisfaisant surtout si l'on considère les moyens humains et matériels dont disposent ces bâtiments.

Le problème posé, éternel, est celui de la compétence du chef du quart. Il est vraisemblable qu'avec un bon chef du quart et faisant donc preuve de la prudence que commande l'expérience ordinaire du marin, il ne se serait rien passé. Mais rien dans le cursus de l'officier de quart au moment des faits ne permettait de mettre en doute sa compétence, si ce n'est, éventuellement, un excès de confiance de soi et une expérience modérée (EV 1).

Enfin, on peut se demander si, pour un transit de nuit à 20 nds près des côtes, le commandant n'aurait pas pu désigner un officier de suppléance. Les événements du scénario sont décrits par les figures B.1, B.2, B.3.

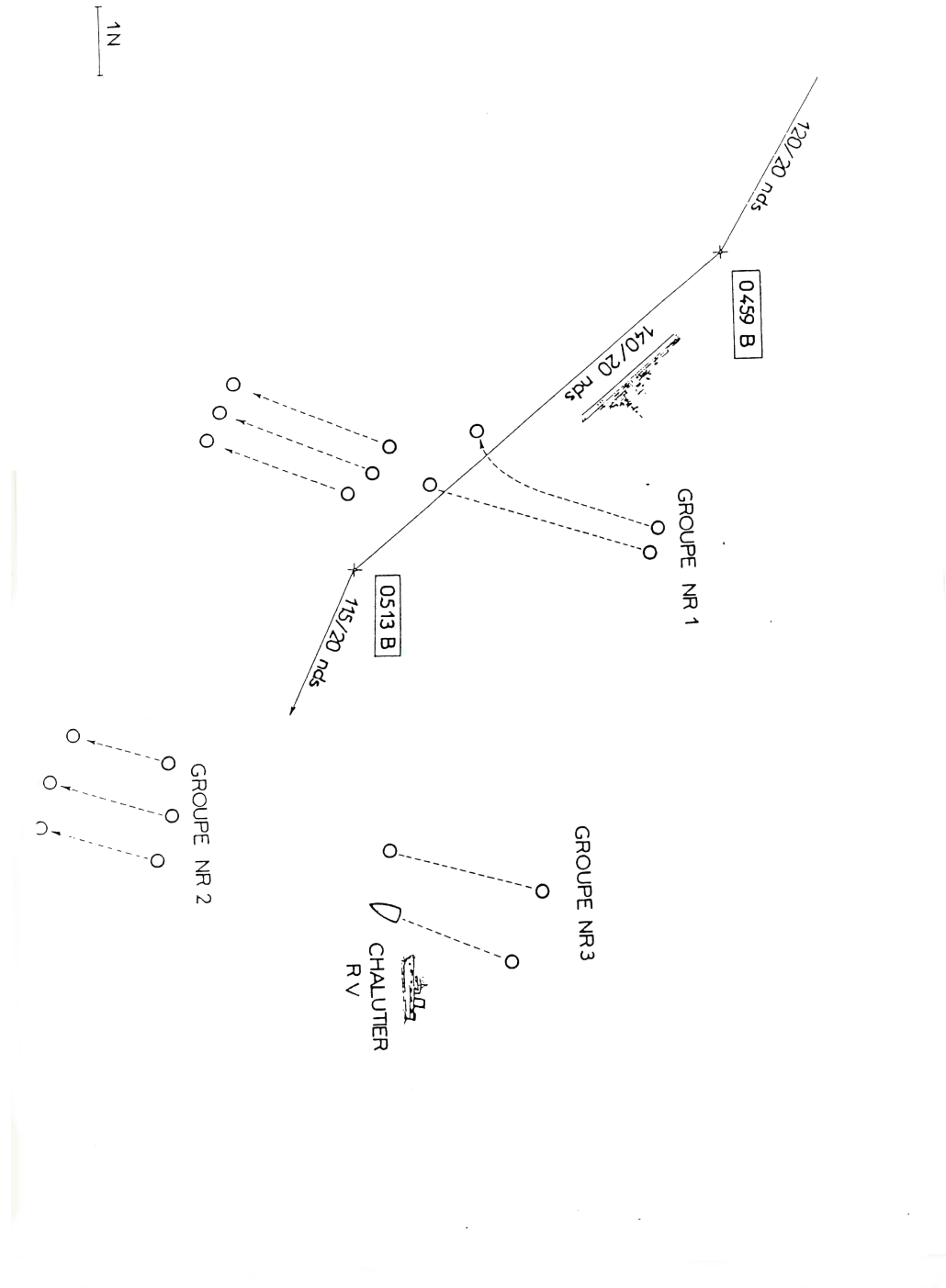


Figure B.2 — Situation entre 0459 et 0513

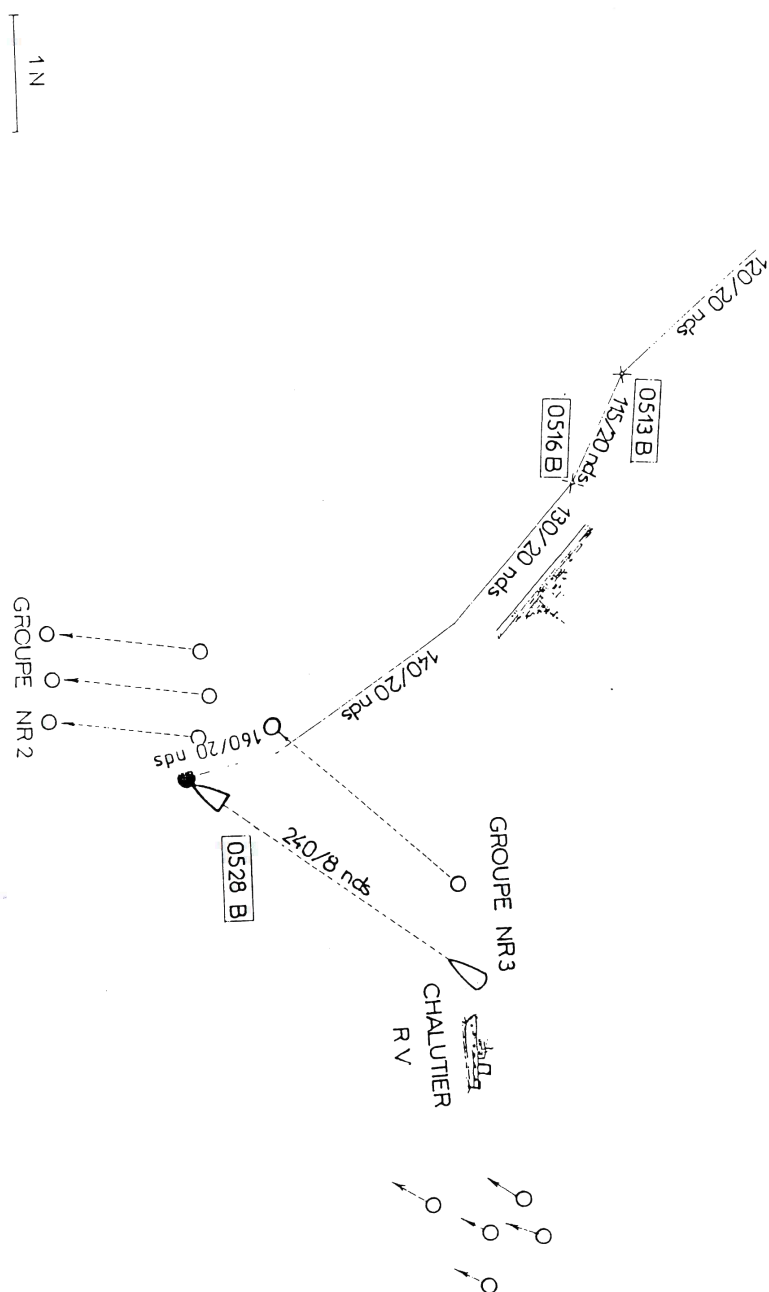


Figure B.3 — Situation entre 0513 et 0528

Bibliographie

- [Abrami, 2004] Abrami, G. (2004). *Niveaux d'organisation dans la modélisation multi-agent pour la gestion de ressources renouvelables. Application à la mise en oeuvre de règles collectives de gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme*. Rapport de thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rurale, des Eaux et Forêts.
- [Çakmak et Kühnapfel, 2000] Çakmak, H. et Kühnapfel, U. (2000). Animation and simulation techniques for vr-training systems in endoscopic surgery. In *Proceeding of Eurographics Workshop on Animation and Simulation '2000 (EGCAS '2000)*, pp 173–185.
- [Allen, 1983] Allen, J. (1983). Maintening knowledge about temporal intervals. *Journal of Association for Computing Machinery*.
- [Amiguet, 2003] Amiguet, M. (2003). *MOCA : Un modèle componentiel dynamique pour les systèmes multi-agents organisationnels*. Rapport de thèse de doctorat, Université de Neuchatel.
- [Attoui, 1997] Attoui (1997). *Les systèmes Multi-Agents et le Temps Réel*. Eyrolles.
- [Auzanneau et Avril, 2000] Auzanneau, B. et Avril, Y. (2000). *Dictionnaire Latin de Poche*. Lgf.
- [Batty *et al.*, 2003] Batty, M., Desyllas, J., et E., D. (2003). The discrete dynamics of small-scale spatial events : agent-based models of mobility in carnivals and street parades. *Geographical Information Science*, 17(7) :673–697.
- [Batty et Jiang, 1999] Batty, M. et Jiang, B. (1999). *Multi-Agent Simulation : New Approaches to Exploring Space-Time Dynamics Within GIS*. Rapport technique, CASA.
- [Batty *et al.*, 1999] Batty, M., Xie, Y., et Sun, Z. (1999). Modeling urban dynamics through gis-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(3) :205–233.
- [Benenson, 1999] Benenson, I. (1999). Modeling population dynamics in the city : from a regional to a multi-agent approach. *Discret Dynamics in Nature and Society*, 3 :149–170.
- [Bouju *et al.*, 2003] Bouju, A., Stockus, A., Bertrand, F., et Boursier, P. (2003). Un modèle d'architecture client-serveur pour les systèmes d'information géographique mobiles. *Revue internationale de Géomatique (numéro spécial "SIG transport")*, 13(2) :225–251.

- [Bousquet et Gautier, 1998] Bousquet, F. et Gautier, D. (1998). Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches spatiales et acteurs. *CyberGéo*, 89.
- [Bousquet et Le Page, 2004] Bousquet, F. et Le Page, C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176(3-4) :313–332.
- [Brocarel, 2003] Brocarel, D. (2003). Intégration d'objets géographiques à la plate-forme de simulation de navigation trans. Rapport de Master, IAAI.
- [Brooke, 2005] Brooke, S. (2005). Xml representation of nautical chart data. <http://www.weft.co.uk/library/xmlchart/documentation/>.
- [Bura *et al.*, 1996] Bura, S., Guérin-Pace, F., Mathian, H., Pumain, D., et Sanders, L. (1996). Multi-agents systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, pp 161–178.
- [Chaib-draa *et al.*, 2001] Chaib-draa, B., Moulin, B., et Jarras, I. (2001). *Principes et Architecture des Systèmes Multi-Agents*, chapter Agent et Systèmes Multiagents. Hermes, Lavoisier.
- [Claramunt et Jiang, 2002] Claramunt, C. et Jiang, B. (2002). A qualitative model for the simulation of traffic behaviours in a multi-lane environment. *Journal of Geographical Sciences*, 11 :29–42.
- [Claramunt et Lardon, 2000] Claramunt, C. et Lardon, S., éditeurs (2000). *SIG et Simulations*. Revue Internationale de Geomatique. Hermes Science.
- [Claramunt et Thériault, 2004] Claramunt, C. et Thériault, M. (2004). Fuzzy semantics for direction relations between composite regions. *Information Science*, 160(1) :73–90.
- [Clementini *et al.*, 1997] Clementini, E., Felice, P. D., et Hernández, D. (1997). Qualitative representation of positional information. *Artificial Intelligence*, 95(2) :317–356.
- [Cohn et Hazarika, 2001] Cohn, A. G. et Hazarika, S. M. (2001). Qualitative spatial representation and reasoning : An overview. *Fundamenta Informaticae*, 46(1-2) :1–29.
- [Collinot *et al.*, 1996] Collinot, A., Drogoul, A., et Benhamou, P. (1996). Agent oriented design of a robotic soccer team. In *Proceedings of ICMAS'96*, pp 41–57. AAAI Press.
- [Coquillard et Hill, 1997] Coquillard, P. et Hill, D. (1997). *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes : des Modèles Déterministes aux Simulations à Evénements Discrets*. Masson.
- [de Castro et Timmis, 2002] de Castro, L. et Timmis, J. (2002). *Artificial Immune Systems : A New Computational Intelligence Approach*. Springer.
- [De Vries, 1903] De Vries, H. (1903). *The Mutation Theory*.
- [Dennett, 1991] Dennett, D. C. (1991). *Consciousness Explained*. Little, Brown and Company.
- [Desvignes *et al.*, 2002] Desvignes, G., Lucas de Couville, G., Peytchev, E., Devogele, T., Fournier, S., et Claramunt, C. (2002). The share-loc project : a wap-based maritime location system. In *2nd IEEE International Workshop on Web and Wireless GIS*, pp 88–94. IEEE press.

- [Drogoul, 2005] Drogoul, A. (2005). Systèmes multi-agents et géographie. 7èmes Rencontre Théocant.
- [Drogoul *et al.*, 1995] Drogoul, A., Corbara, B., et D., F. (1995). Manta : New experimental results on the emergence of (artificial) ant societies. In Gilbert, N. et Conte, R., éditeurs, *Artificial Societies : the computer simulation of social life*, pp 190–212. UCL Press.
- [Dury, 2000] Dury, A. (2000). *Modélisation des interactions dans les systèmes multi-agents*. Rapport de thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I.
- [edifrance, 2000] edifrance (2000). Transport maritime de marchandises dangereuses ou polluantes : dispositif de suivi de trafic (trafic 2000). www.edifrance.org/ebd03/textes/presentations/me3_denel_porthavre.pdf.
- [Egenhofer et Mark, 1995] Egenhofer, M. J. et Mark, D. M. (1995). Naive geography. In Frank, A. U. et Kuhn, W., éditeurs, *Spatial Information Theory : A theoretical basis for GIS*, pp 1–16. Springer Verlag.
- [El Geresy, 2003] El Geresy, B. A. (2003). *Qualitative representation and reasoning in spatio-temporal systems*. Rapport de thèse de doctorat, Université de Glamorgan.
- [Etches *et al.*, 1999] Etches, A., Claramunt, C., Bargiela, A., et Kosonen, I. (1999). An interoperable tgis model for traffic systems. In Gittings, B., éditeur, *Innovations in GIS 6, Integrating Information Infrastructures with GI Technology*, pp 217–228. Taylor & Francis.
- [Ferber, 1995] Ferber, J. (1995). *Les Systemes Multi-Agents*. InterEditions.
- [Fernyhough, 1997] Fernyhough, J. (1997). *Generation of Qualitative Spatio-temporal Representations from Visual Input*. Rapport de thèse de doctorat, Université de Leeds.
- [Fernyhough *et al.*, 2000] Fernyhough, J., Cohn, A. G., et Hogg, D. C. (2000). Constructing qualitative event models automatically from video input. *Image and Vision Computing*, 18 :81–103.
- [Fournier *et al.*, 2003] Fournier, S., Devogele, T., et Claramunt, C. (2003). A role-based multi-agent model for concurrent navigation systems. In Gould, M. e. a., éditeur, *6th AGILE Conference on Geographic Information Science*, pp 623–632. Presse Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [Frank, 1996] Frank, A. U. (1996). Qualitative spatial reasoning : Cardinal directions as an example. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3) :269–290.
- [Franklin et Graesser, 1996] Franklin, S. et Graesser, A. (1996). Is it an agent, or just a program ? : A taxonomy for autonomous agents. In *Proceedings of the Workshop on Intelligent Agents III, Agent Theories, Architectures, and Languages*, volume 1193 of *Lecture Notes In Computer Science*, pp 21–35. Springer-Verlag.
- [Freksa, 1992] Freksa, C. (1992). Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In Frank, U., Camprai, I., et Formentini, U., éditeurs, *Proceedings of the International Conference GIS - From Space to Territory : Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning on Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, pp 162–178. Springer-Verlag.

- [Galton, 2000] Galton, A. (2000). *Qualitative Spatial Change*. Oxford University Press.
- [Gasser *et al.*, 1987] Gasser, L., Braganza, C., et Herman, N. (1987). Implemented distributed artificial intelligence systems using mace. In *IEEE Conference on Artificial Intelligence Applications*, pp 315–320.
- [Gibson, 1979] Gibson, J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton-Mifflin.
- [Goyal et Egenhofer, 2000] Goyal, R. K. et Egenhofer, M. J. (2000). Consistent queries over cardinal directions across different levels. In Tjoa, A. M., R., W., et A., A.-Z., éditeurs, *11th International Workshop on Database Expert Systems Applications*, pp 876–880.
- [Goyal et Egenhofer, 2004] Goyal, R. K. et Egenhofer, M. J. (2004). Cardinal directions between extended spatial objects. *IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering (submitted)*, -.
- [Gutknecht, 2001] Gutknecht, O. (2001). *Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agents. Examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques*. Rapport de thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du languedoc-Montpellier II.
- [Gutknecht *et al.*, 2000] Gutknecht, O., Michel, F., et Ferber, J. (2000). *The Madkit Agent Platform Architecture*. Rapport technique, LIRMM.
- [Hannoun *et al.*, 2000] Hannoun, M., Boissier, O., Sichman, J., et Sayettat, C. (2000). Moise : An organizational model for multi-agent systems. In Monard, M. et Sichman, J., éditeurs, *Advances in Artificial Intelligence*, volume 1952 of *LNAI*, pp 156–165. International Joint Conference IBERAMIA-SBIA, Springer.
- [Harrouet *et al.*, 2002] Harrouet, F., Tisseau, J., Reignier, P., et Chevaillier, P. (2002). oris : un environnement de simulation interactive multi-agents. *Revue des sciences et technologie de l'information, série Techniques et science informatiques (RSTI-TSI)*.
- [Hübner *et al.*, 2002] Hübner, J., Sichman, J., et O., B. (2002). Moise+ : Towards a structural, functional, and deontic model for mas organization. In Castelfranchi, C. et Johnson, W., éditeurs, *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS'2002)*, pp 501–502. ACM Press.
- [Hewitt, 1977] Hewitt, C. (1977). Viewing control structures as partterns of message passing. *Artificial Intelligence*, 8(3) :323–374.
- [Hilaire, 2000] Hilaire, V. (2000). *Vers une approche de spécification, de prototypage et de vérification de systèmes multi-agents*. Rapport de thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- [IHB, 1996a] IHB (1996a). *IHO Specifications for Chart Content and Display Aspects of ECDIS, Edition 5.0*. Rapport technique Special Publication No 52 (S52), International Hydrographic Bureau.

- [IHB, 1996b] IHB (1996b). *IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data, Edition 3.0*. Rapport technique Special Publication No 57 (S57), International Hydrographic Bureau.
- [IMO, 1997] IMO (1997). *International Safety Management Code (ISM Code) and guidelines on implementation*. Rapport technique IMO-118E, International Maritime Organisation.
- [IMO, 1999] IMO (1999). *Radar Navigation, Radar Plotting and Use of ARPA*. Rapport technique TA107E, International Maritime Organization.
- [IMO, 2000] IMO (2000). *Operational Use of ECDIS*. Rapport technique T127E, International Maritime Organization.
- [Isli *et al.*, 2001] Isli, A., Haarslev, V., et Möller, R. (2001). *Combining cardinal direction relations and relative orientation relations in Qualitative Spatial Reasoning*. Rapport technique, Université de Hamburg.
- [ITU, 2001] ITU (2001). *Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band*. Rapport technique, International Telecommunication Union.
- [Klügl *et al.*, 2005] Klügl, F., Fehler, M., et Herrler, R. (2005). About the role of the environment in multi-agent simulations. In Danny, W., Parunak, V., et Fabien, M., éditeurs, *Environments for Multi-Agent Systems*, volume 3374 of *LNAI*, pp 127–149. Springer.
- [Koffka, 1935] Koffka, K. (1935). *Principles of Gestalt Psychology*. Harcourt Brace.
- [Lacombe *et al.*, 2005] Lacombe, G., Bousquet, F., Kuper, M., Boonmun, C., Phupak, S., Naivinit, W., Vejpas, C., et Trébuil, G. (2005). How farmers can manage variability in the rice ecosystem of northeast thailand? the contribution of agent-based modelling. In V. Kachitvichyanukul, U. P. et Utayopas, P., éditeurs, *SIMMOD 2005, Simulation and Modelling : Integrating Sciences and Technology for Effective Resource Management*, pp 345–352.
- [Langton *et al.*, 1990] Langton, C., Taylor, C., Farmer, J., et Rasmussen, S., éditeurs (1990). *Artificial Life II*. Addison-Wesley.
- [Le Page *et al.*, 2000] Le Page, C., Bousquet, F., Bakam, I., Bah, A., et Baron, C. (2000). Cormas : A multiagent simulation toolkit to model natural and social dynamics at multiple scales. In *Proceeding of the Ecology of Scales*.
- [Lebacque, 1997] Lebacque, J. (1997). A finite acceleration scheme for first order macroscopic traffic flow models. In Papageorgiou, M. et Pouliezios, A., éditeurs, *Transportation Systems*, volume II, pp 815–820. International Federation of Automatic Control.
- [Leibniz, 1765] Leibniz, G. (1981 (1765)). *New Essays on Human Understanding*. Cambridge University Press.
- [Lenat et Brown, 1984] Lenat, D. et Brown, J. (1984). Why am and eurisko appear to work ? *Artificial intelligence*, 23 :269–294.

- [Levinson, 1998] Levinson, S. (1998). Studying spatial conceptualization across cultures : Anthropology and cognitive science. *The Journal of the Society for Psychological Anthropology*, 26(1) :7–24.
- [Lighthill et Whitham, 1955] Lighthill, M. et Whitham, G. (1955). On kinematic waves : II. a theory of traffic on long crowded roads. In *Proceedings of the Royal Society*, pp 317–345.
- [Ligozat, 1998] Ligozat, G. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, 9 :23–44.
- [Lolle et al., 2005] Lolle, S., Victor, J., Young, J., et Pruitt, R. (2005). Genome-wide non-mendelian inheritance of extra-genomic information in arabidopsis. *Nature*, 434 :505–509.
- [MEDES, 2002] MEDES (2002). Long term bed rest study. <http://www.medes.fr/Clinic/Experiments/LTBR/PublicSection/HomePage.html>.
- [Metropolis et al., 1953] Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., et Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21 :1087–1092.
- [Meyer et al., 1993] Meyer, J., Roitblat, H., et Wilson, S., éditeurs (1993). *Simulation of Adaptive Behavior : From Animals to Animats II*. MIT Press.
- [Moratz et Fischer, 2000] Moratz, R. et Fischer, K. (2000). Cognitively adequate modelling of spatial reference in human-robot interaction. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI-2000)*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [Moratz et al., 2003] Moratz, R., Nebel, B., et Freksa, C. (2003). Qualitative spatial reasoning about relative position : The tradeoff between strong formal properties and successful reasoning about route graphs. In Freksa, C., Habel, C., et Wender, K. F., éditeurs, *Spatial Cognition III*, pp 385–400. Springer Verlag, Berlin.
- [Moratz et al., 2002] Moratz, R., Tenbrink, T., Bateman, J., et Fischer, K. (2002). Spatial knowledge representation for human-robot interaction. In Freksa, C., Brauer, W., Habel, C., et Wender, K. F., éditeurs, *Spatial Cognition III*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Moulin et al., 2003] Moulin, B., Chaker, C., Perron, J., Pelletier, P., Hogan, J., et Gbei, E. (2003). Mags project : Multi-agent geosimulation and crowd simulation. In *Proceeding of COSIT 2003*, pp 151–168.
- [Moulin et al., 2004] Moulin, B., Gancet, G., et Chaker, W. (2004). Padi-simul : an agent-based geosimulation software supporting the design of geographic spaces. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(4) :387–420.
- [Nagel et al., 1998] Nagel, K., Pieck, M., P.M., S., et M., R. (1998). *Comparison between three different traffic micro-simulations and reality in Dallas*. Rapport technique, Los Alamos National Laboratory.
- [NetLogo, 2005] NetLogo (2005). Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.
- [Noyon et Devogele, 2004] Noyon, V. et Devogele, T. (2004). Système distribué de gestion d’objets mobiles. In *Actes des journées des 7ième journée Cassini*, pp 7–12. MSH Alpes.

- [Odell *et al.*, 2002] Odell, J., H.V.D., P., Fleisher, M., et Brueckner, S. (2002). Modeling agents and their environment. In *Proceeding of the third International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*.
- [Odell *et al.*, 2003] Odell, J., Parunak, H., et Fleischer, M. (2003). The role of roles. *Journal of Object Technology*, 2(1) :39–51.
- [O’Sullivan et Torrens, 2000] O’Sullivan, D. et Torrens, P. (2000). Cellular models of urban systems. In Bandini, S. et Worsch, T., éditeurs, *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata*, pp 108–117. Springer-Verlag.
- [Papadias et Egenhofer, 1997] Papadias, D. et Egenhofer, M. J. (1997). Algorithms for hierarchical spatial reasoning. *Geoinformatica*, 1(3) :251–273.
- [Parenthoën *et al.*, 2004] Parenthoën, M., Jourdan, T., et Tisseau, J. (2004). Ipas : Interactive phenomenological animation of the sea. In *Proceeding of the Fourteenth International Society of Offshore and Polar Engineering*, volume 1, pp 125–133.
- [Pavé, 1994] Pavé, A. (1994). *Modélisation en Biologie et en Ecologie*. Aleas.
- [Querrec *et al.*, 2003] Querrec, G., Rodin, V., Abgrall, J., Kerdelo, S., et Tisseau, J. (2003). Use of multiagents system for simulation in systems biology. In *Proceeding of IASTED International Conference on Biomedical Engineering*, pp 48–53.
- [Querrec, 2002] Querrec, R. (2002). *Les systèmes multi-agents pour les environnements virtuels de formation. Application à la sécurité civile*. Rapport de thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- [Ray, 2003] Ray, C. (2003). *ATLAS, une plate-forme pour la modélisation et la simulation de systèmes désagrégés*. Rapport de thèse de doctorat, Université Rennes 1.
- [Reignier *et al.*, 1998] Reignier, P., Harrouet, F., Morvan, S., Tisseau, J., et Duval, T. (1998). Arévi : a virtual reality multiagent platform. In *Proceedings of VW’98*, pp 229–240. Springer-Verlag.
- [Renz, 2002] Renz, J. (2002). *Qualitative Spatial Reasoning with Topological Information*. Springer.
- [Röfer, 1999] Röfer, T. (1999). Route navigation using motion analysis. In Freksa, C. et Mark, D., éditeurs, *COSIT 1999*, pp 21–36, Berlin.
- [Sawyer, 2002] Sawyer, R. (2002). Emergence in sociology : Contemporary philosophy of mind and some implications for sociological theory. *American Journal of Sociology*, 107 :551–585.
- [Schelhorn *et al.*, 1999] Schelhorn, T., O’Sullivan, D., Haklay, M., et Thurstain-Goodwin, M. (1999). *STREETS : an agent-based pedestrian model*. Rapport technique, CASA.
- [Semboloni *et al.*, 2004] Semboloni, F., Assfalg, J., Armeni, S., Gianassi, R., et Marsoni, F. (2004). Citydev, an interactive multi-agents urban model on the web. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(1-2) :45–64.
- [Servat, 2001] Servat, D. (2001). *Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion*. Rapport de thèse de doctorat, Université Paris VI.

- [Smith, 2000] Smith, G. (2000). *The Object-Z Specification Language*. Kluwer Academic Publishers.
- [StarLogo, 2005] StarLogo (2005). Starlogo. <http://education.mit.edu/starlogo/>.
- [Thomas, 1999] Thomas, G. (1999). *Environnements virtuels urbains : modélisation des informations nécessaires à la simulation de piétons*. Rapport de thèse de doctorat, Université Rennes 1.
- [Thomas et Donikian, 2000] Thomas, G. et Donikian, S. (2000). Modelling virtual cities dedicated to behavioural animation. In *Computer Graphics Forum*, volume 19, pp 71–80. Blackwell Publishing.
- [UAIS, 2005] UAIS (2005). Information about universal automatic identification system. <http://www.uais.org>.
- [Vagnon et Wadoux, 2002] Vagnon, H. et Wadoux, P. (2002). *Code Vagnon de la Mer*. Les Editions du Plaisancier.
- [Vanbergue et Drogoul, 2002] Vanbergue, D. et Drogoul, A. (2002). Approche multi-agent pour la simulation urbaine. In *Actes des 6èmes Journées CASSINI*.
- [von Neumann, 1951] von Neumann, J. (1951). The general and logical theory of automata. In Jeffress, L., éditeur, *Cerebral Mechanisms in Behavior*, pp 1–41. John Wiley and Sons.
- [von Neumann, 1966] von Neumann, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press.
- [WikipédiA, 2005] WikipédiA (2005). Wikipédia, l'encyclopédie libre. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>.
- [Wooldridge *et al.*, 2000] Wooldridge, M., Jennings, N., et Kinny, D. (2000). The gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3(3) :285–312.
- [Zeigler, 1976] Zeigler, B. (1976). *Theory of modeling and simulation*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
- [Zeigler et Sarjoughian, 2000] Zeigler, B. et Sarjoughian, H. (2000). Creating distributed simulation using DEVS M and S environments. In Joines, J., Barton, R., Kang, K., et Fishwick, P., éditeurs, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, pp 158–160.
- [Zimmermann et Freksa, 1996] Zimmermann, K. et Freksa, C. (1996). Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge. *Applied Intelligence*, 6 :49–58.
- [Zunga *et al.*, 1998] Zunga, Q., Vagnini, A., Le Page, C., Toure, I., Lieurain, E., et Bousquet, F. (1998). Coupler systèmes d'information géographique et systèmes multi-agents pour modéliser les dynamiques de transformation des paysages. le cas de dynamiques foncières de la moyenne vallée du zambèze (zimbabwe). In Ferrand, N., éditeur, *Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires*, pp 93–206. Cemagref Editions.

Revues internationales

BLANCHET A., CHAPPELLE A., DESVIGNES G., FOURNIER S., LUCAS DE COUVILLE G., 2002. - Un nouveau système flexible et mobile d'aide à la navigation maritime - Revue International de Géomatique. SIG côtier, 2002 : 373-389

FOURNIER, S., DEVOGELE, T. ET CLARAMUNT C., 2005. - Un modèle de raisonnement spatial contextuel pour la navigation maritime - Revue International de Géomatique. A paraître.

Conférences internationales avec comité de lecture

DESVIGNES, G., LUCAS DE COUVILLE, G., PEYTCHEV, E., DEVOGELE, T., FOURNIER, S. ET CLARAMUNT C., 2002. - The Share-Loc project : A WAP-based maritime location system - Proceedings of the 3rd International Conference on Web Information Systems Engineering, B. Huang et al. (eds.), IEEE press, pp. 88-94

FOURNIER, S., DEVOGELE, T. ET CLARAMUNT C., 2003. - A role-based multi-agent model for concurrent navigation systems - Proceedings of the 6th AGILE Conference on Geographic Information Science, Gould, M. et al. (eds.), Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, pp. 623-632

FOURNIER, S., DEVOGELE, T. ET CLARAMUNT C., 2003. - TRANS : A Tractable Role-based Agent Prototype for Concurrent Navigation System - The first European workshop on Multi-Agent Systems, 6 pages

Conférences internationales sans comité de lecture

FOURNIER, S., 2005. - A multiagent system for maritime navigation simulation - Proceedings of the IEEE OCEANS'05 Europe Conference, Actes sur Cd-rom, ISBN , 3 pages.

CLARAMUNT, C., FOURNIER, S., Li, X. et Peytchev, E., 2005. - Real-time geographical information for ITS - Proceedings of the 5th IEEE International Conference in Intelligent Information Systems, pp. 237-242

Conférence nationale sans comité de lecture

FOURNIER, S., 2003 - Détection de collision et d'échouage dans la plate-forme TRANS - Workshop GTAS'03 10ème journée Animation et simulation

Rapport de recherche

FOURNIER, S., 2002. - Les Systèmes Multi-agents : Potentiel et apports pour la simulation en transport. - Rapport interne IRENav, TR02-03, juin 2002 : 28 pp.

VU pour autorisation de publication

Lanvéoc-Poulmic, le

Le Directeur de Thèse

Résumé

Si les Systèmes Multi-Agents (SMA) sont devenus des techniques de modélisation largement utilisées dans le domaine de la simulation de systèmes complexes, l'application de ces outils à des contextes géographiques reste cependant encore embryonnaire. L'intégration de la dimension spatiale au sein des SMA apporte en effet de nouvelles difficultés de modélisation que cette thèse aborde dans le cadre de la navigation maritime. Cette recherche propose un modèle multi-agents adapté à la représentation de comportements d'agents dans un environnement géographique. La démarche développée intègre une approche de raisonnement qualitatif et les comportements multiples des agents à travers le concept de rôle. Du point de vue du raisonnement spatial, modéliser les agents dans un environnement géographique impose de représenter les relations qui traduisent les interactions dans cet espace. À partir de cette observation, notre recherche développe un modèle d'interaction des agents basé sur des raisonnements spatiaux qualitatifs où les propriétés de l'environnement et du contexte géographique sont prises en compte. Le deuxième apport de la recherche est orienté vers la définition d'un modèle agent flexible qui permet la représentation de comportements multiples et changeants à travers la notion de rôle. La recherche est validée par la réalisation du prototype TRANS (Tractable Role Agent prototype for concurrent Navigation Systems) dont l'objectif est de modéliser et de simuler les trajectoires simultanées de navires.

Abstract

Although multiagent systems (MAS) are widely used for the simulation of complex systems, there is still a need for an application of MAS to dynamic applications in the geographical domain. The objective of this PhD thesis is the exploration of the modelling and computing issues related to the integration of the spatial dimension in MAS, taking the maritime environment as an experimental validation domain. We introduce an approach that extends the multiagent model towards a deeper integration of the role paradigm, and qualitative spatial reasoning as a support for the representation of the dynamic properties of ships acting in their maritime environment. Our research shows that qualitative spatial reasoning is adapted to a contextual representation of the spatial situations that are part of maritime navigation decisions. The multiagent model extended by the role paradigm also provides a flexible solution adapted to the multiple ship behaviours. The research is validated by a prototype, so-called TRANS (Tractable Role Agent prototype for concurrent Navigation Systems), that implements the contextual spatial reasoning components and multiagent concepts for the simulation of ship trajectories in a maritime environment.