



Modèle de vue relative et spatio-temporelle de trajectoires géographiques d'objets mobiles : application au contexte maritime

Valérie Noyon

► To cite this version:

Valérie Noyon. Modèle de vue relative et spatio-temporelle de trajectoires géographiques d'objets mobiles : application au contexte maritime. Autre [cs.OH]. Arts et Métiers ParisTech, 2007. Français. NNT : 2007ENAM0023 . tel-00180981

HAL Id: tel-00180981

<https://pastel.hal.science/tel-00180981>

Submitted on 22 Oct 2007

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.



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Informatique"

présentée et soutenue publiquement

par

Valérie NOYON

le 3 octobre 2007

MODÈLE DE VUE RELATIVE ET SPATIO-TEMPORELLE DE TRAJECTOIRES GÉOGRAPHIQUES D'OBJETS MOBILES : APPLICATION AU CONTEXTE MARITIME

Directeur de thèse : Christophe CLARAMUNT

Encadrant de thèse : Thomas DEVOGELE

Jury :

M. Hervé MARTIN , Professeur, LSR, Université Joseph Fourier, Grenoble	Président
M. Robert LAURINI , Professeur, LIRIS, INSA de Lyon	Rapporteur
M. Gérard LIGOZAT , Professeur émérite, LIMSI, Université Paris 11	Rapporteur
M. Alain BOUJU , Maître de conférences, L3I, Université de La Rochelle	Examineur
M. Christophe CLARAMUNT , Professeur, IRENav, Ecole navale	Examineur
M. Thomas DEVOGELE , Maître de conférences, IRENav, Ecole navale	Examineur

Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés
ENSAM, CER de Paris

L'ENSAM est un Grand Etablissement dépendant du Ministère de l'Education Nationale, composé de huit centres :
AIX-EN-PROVENCE ANGERS BORDEAUX CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE CLUNY LILLE METZ PARIS

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord, à vivement remercier, mon directeur de thèse, Christophe Claramunt, Professeur à l'IRENav (Ecole navale) de l'attention et du soutien qu'il a porté à mon travail. Je lui suis reconnaissante d'avoir co-encadré ma thèse et de m'avoir accordé du temps malgré ses obligations.

Je remercie également Thomas Devogele, Maître de conférences à l'IRENav (Ecole navale), d'avoir co-encadré ma thèse, de m'avoir suggéré des pistes et permis de m'approprier mon sujet.

J'exprime mes remerciements à Messieurs Robert Laurini, Professeur au LIRIS (INSA de Lyon) et Gérard Ligozat, Professeur émérite de l'Université Paris 11 (LIMSI, Université Paris 6 et 11) qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Je souhaite également remercier Messieurs Hervé Martin, Professeur au LSR (Université de Grenoble) et Alain Bouju, Maître de conférences au L3I (Université de La Rochelle) d'avoir bien voulu participer à mon jury.

Je remercie aussi la Marine nationale et les commandants de l'Ecole navale d'avoir financé mes quatre années de thèse par un contrat d'assistante de recherche et d'enseignement.

Lors de la validation du modèle, j'ai trouvé les dix-huit personnes composant mon panel parmi les instructeurs de navigation, les ingénieurs et techniciens ainsi que les enseignants chercheurs de l'IRENav. Mes remerciements vont à toutes ces personnes qui ont eu la gentillesse et la patience de répondre aux deux tests et de donner leurs impressions.

Je remercie Jean-Yves Billard et Christophe Claramunt, directeurs successifs et l'ensemble des enseignants chercheurs de l'Institut de Recherche de l'Ecole navale pour leurs conseils et leur attention tant dans le domaine de l'enseignement que le domaine de la recherche et ainsi d'avoir participé chacun à leur manière à l'accomplissement de mon travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier les membres du groupe SIG : David Brosset,

Shaopei Chen, Yann Chevriaux, Thomas Le Bras, Thierry Le Pors, Jean-Marie Le Yaouanc, Ariane Mascret, Mathieu Petit, Joseph Poupin, Cyril Ray, Eric Saux, Myriem Sriti et Rémy Thibaud.

Je souhaite également remercier les actuels et anciens AER et doctorants qui ont participé à mes moments d'intense réflexion, ainsi qu'à mes moments de détente et qui ont renforcé ma culture générale. Je pense tout particulièrement à Myriem, Rachel, Mathieu, Jean-Marie, David, Franck et Salem.

Enfin, je souhaite remercier tous mes proches pour leur soutien.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Contexte	1
Besoins	2
Objectifs et plan de thèse	4
 1 Représentation de données	 7
1.1 Introduction	7
1.2 Représentation de données spatiales	8
1.2.1 Principes de représentation des données spatiales	8
1.2.1.1 Approche cognitive et géographie naïve	9
1.2.1.2 Raisonnement spatial	10
1.2.2 Modélisation des objets et de leurs relations	11
1.2.2.1 Topologie usuelle	12
1.2.2.2 Modèle des 9 intersections	13
1.2.2.3 Modèle Region Connection Calculus	14
1.2.3 Langages de manipulation de données spatiales	15
1.2.4 Modélisation physique	17
1.3 Représentation de trajectoires	19
1.3.1 Modélisation d'objets mobiles	20
1.3.1.1 Modélisation à base d'objets	20
1.3.1.2 Modélisation à base de contraintes	21
1.3.2 Langages de manipulation	23
1.3.2.1 Langage sur les modélisations à base d'objets	23
1.3.2.2 Langages à contraintes	24
1.3.3 Index spatio-temporels	25

1.3.3.1	Indexation du passé	26
1.3.3.2	Indexation du présent et du futur	27
1.3.4	Visualisations de trajectoires d'objets mobiles	27
1.3.4.1	Visualisation de trajectoires selon Imfeld	28
1.3.4.2	QTC (Qualitative Trajectory Calculus)	30
1.4	Discussion	32
2	Modèle conceptuel	35
2.1	Introduction	35
2.2	Objectifs de la représentation	35
2.3	Représentation spatiale des objets	36
2.4	Position relative	41
2.4.1	Principes, définitions et propriétés	41
2.4.2	Exemples	47
2.5	Vitesse relativisée	48
2.5.1	Principe, définition et propriétés	48
2.5.2	Exemples	51
2.6	Conclusion	51
3	Raisonnement spatio-temporel	55
3.1	Introduction	55
3.2	Etats, événements et processus	55
3.3	Caractérisation des états	57
3.4	Transitions d'états	58
3.4.1	Théorie de la dominance	59
3.4.2	Espaces dominants : position relative et vitesse relativisée	60
3.4.3	Combinaison des espaces dominants	61
3.4.4	Transitions continues	61
3.4.5	Caractérisation des processus de trajectoire	63
3.5	Tables de composition	68
3.5.1	Représentation et raisonnement diagrammatique	69
3.5.2	Construction des tables de composition	70
3.5.3	Discussion	73
3.6	Conclusion	76
4	Validation du modèle	79
4.1	Introduction	79
4.2	Contexte d'étude	80

4.2.1	Surveillance maritime	80
4.2.2	Outils d'aide à la navigation maritime	80
4.2.3	Transmission des données maritimes	81
4.2.4	Nouveaux outils d'observation et de navigation maritime	82
4.3	Intégration de données de trajectoires maritimes	82
4.4	Interpolation des données	85
4.5	Principes et objectifs de l'interface de visualisation	86
4.6	Manipulation de l'interface	88
4.7	Validation expérimentale	96
4.8	Discussion	105
Conclusion		109
	Contribution	110
	Extensions de notre approche	111
	Du point de vue du modèle	111
	Du point de vue des visualisations	111
	Du point de vue du prototype	112
	Bilan et généralisation	114
A Transitions continues		115
B Exemple de description des changements dans une situation		117
C Construction d'une table de composition		123
D Tables de compositions		139
E Types des messages AIS		159
F Comparaisons des configurations dans la représentation absolue		163
G Comparaisons des configurations dans la représentation relative		175
H Formulaire de réponse au test		187
Bibliographie		196

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Relations topologiques entre deux régions sans trous dans $\mathbb{R}^2$ [Egenhofer, 1994a]	14
1.2	Relations topologiques entre une région sans trou et une ligne dans $\mathbb{R}^2$ [Egenhofer, 1994a]	15
1.3	Opérateurs sur les types non-temporels selon Güting [Güting et al., 2000]	21
1.4	Opérateurs sur les types temporels selon Güting [Güting et al., 2000]	22
1.5	Relations entre les objets selon Su [Su et al., 2001]	23
1.6	Lien entre les valeurs et les processus du six-uplet [Van De Weghe, 2004]	31
2.1	Relations topologiques entre les objets	41
3.1	Description des configurations élémentaires de la position relative	57
3.2	Description des configurations élémentaires de la vitesse relativisée	57
3.3	Etats spatio-temporels	58
3.4	Transitions continues lorsque A est un polygone	64
3.5	Changements de la position relative	64
3.6	Changements de la vitesse relativisée	65
3.7	Changements quantitatifs de la position relative entre deux instants (état inchangé)	65
3.8	Changements quantitatifs de la vitesse relativisée entre deux instants (état inchangé)	66
3.9	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$	71
3.10	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$	72
3.11	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$	72
3.12	Composition point $\times$ polyligne $\times$ polygone	73
3.13	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ (A point, B point et C polygone)	74

3.14	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ (A point, B point et C polyligne)	74
3.15	Composition point $\times$ point $\times$ polygone	75
3.16	Composition point $\times$ point $\times$ polyligne	75
3.17	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ (A point, B point et C point)	76
3.18	Composition point $\times$ point $\times$ point	76
3.19	Composition polygone $\times$ polyligne $\times$ point	77
4.1	Fréquence d'émission des informations de trajectoire [Union Internationale des Télécommunications, 1998]	85
4.2	Représentation graphique, évolution et processus, lorsque l'objet référent est plus rapide que l'objet cible	89
4.3	Représentation graphique, évolution et processus, lorsque l'objet référent est moins rapide que l'objet cible	90
4.4	Répartition des réponses par groupe d'utilisateurs pour le test avec la représentation absolue	100
4.5	Répartition des réponses par groupe d'utilisateurs pour le test avec la représentation relative	101
4.6	Classement des situations de la plus dangereuse à la moins dangereuse	102
4.7	Représentation absolue : Différences et indécisions	102
4.8	Représentation relative : Différences et indécisions	103
4.9	Représentation relative : Différences et indécisions par comparaison	104
4.10	Représentation relative : Choix des cas les plus dangereux	105
4.11	Représentation absolue : Différences et indécisions par comparaison	107
A.1	Transitions continues lorsque A est une polyligne	115
A.2	Transitions continues lorsque A est un point	116
C.1	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$	123
C.2	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^0p^+)C$	124
C.3	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^+p^+)C$	124
C.4	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^+p^0)C$	125
C.5	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^0p^0)C$	125
C.6	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$	126
C.7	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$	126
C.8	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^+)B$ et $B(v^0p^+)C$	127
C.9	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^+)B$ et $B(v^+p^+)C$	127
C.10	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^+)B$ et $B(v^+p^0)C$	128
C.11	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^+)B$ et $B(v^0p^0)C$	128

C.12	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$	129
C.13	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$	129
C.14	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^0p^+)C$	130
C.15	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^+p^+)C$	130
C.16	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^+p^0)C$	131
C.17	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^0p^0)C$	131
C.18	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$	132
C.19	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^-p^+)C$	132
C.20	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$	132
C.21	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^+p^+)C$	133
C.22	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^+p^0)C$	133
C.23	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^0p^0)C$	133
C.24	Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$	134
C.25	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^-p^+)C$	134
C.26	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$	134
C.27	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^+p^+)C$	135
C.28	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^+p^0)C$	135
C.29	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^0p^0)C$	136
C.30	Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$	136
C.31	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^-p^+)C$	136
C.32	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$	137
C.33	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^+p^+)C$	137
C.34	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^+p^0)C$	137
C.35	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^0p^0)C$	138
C.36	Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$	138
D.1	Composition point $\times$ point $\times$ point	139
D.2	Composition point $\times$ point $\times$ polyligne	140
D.3	Composition point $\times$ point $\times$ polygone	140
D.4	Composition point $\times$ polyligne $\times$ point	141
D.5	Composition point $\times$ polyligne $\times$ polyligne	141
D.6	Composition point $\times$ polyligne $\times$ polygone	142
D.7	Composition point $\times$ polygone $\times$ point	142
D.8	Composition point $\times$ polygone $\times$ polyligne	143
D.9	Composition point $\times$ polygone $\times$ polygone	144
D.10	Composition polyligne $\times$ point $\times$ point	144
D.11	Composition polyligne $\times$ point $\times$ polyligne	145
D.12	Composition polyligne $\times$ point $\times$ polygone	145

D.13 Composition polyligne $\times$ polyligne $\times$ point	146
D.14 Composition polyligne $\times$ polyligne $\times$ polyligne	146
D.15 Composition polyligne $\times$ polyligne $\times$ polygone	147
D.16 Composition polyligne $\times$ polygone $\times$ point	147
D.17 Composition polyligne $\times$ polygone $\times$ polyligne	148
D.18 Composition polyligne $\times$ polygone $\times$ polygone	148
D.19 Composition polygone $\times$ point $\times$ point	149
D.20 Composition polygone $\times$ point $\times$ polyligne	150
D.21 Composition polygone $\times$ point $\times$ polygone	151
D.22 Composition polygone $\times$ polyligne $\times$ point	152
D.23 Composition polygone $\times$ polyligne $\times$ polyligne	153
D.24 Composition polygone $\times$ polyligne $\times$ polygone	154
D.25 Composition polygone $\times$ polygone $\times$ point	155
D.26 Composition polygone $\times$ polygone $\times$ polyligne	156
D.27 Composition polygone $\times$ polygone $\times$ polygone	157
E.1 Fréquence d'émission des informations	159
E.2 Informations du message de type 1	161
E.3 Informations du message de type 5	162

LISTE DES FIGURES

1	Collaboration potentielle des SIG et des systèmes de géolocalisation dans le domaine maritime	3
2	Système d'aide à la décision pour l'aide à la navigation maritime	4
3	Organisation et progression du mémoire	5
1.1	Progression du chapitre	8
1.2	Intérieur, fermeture et frontière d'une région et d'une ligne dans $\mathbb{R}^2$	12
1.3	Relations topologiques entre deux régions X et Y	13
1.4	Relations topologiques entre deux régions spatiales	16
1.5	Exemples de requêtes	17
1.6	Quadtree	18
1.7	Construction d'index avec recouvrement des cadres [Guttman, 1984]	19
1.8	Construction d'index sans recouvrement des cadres	19
1.9	Différentes requêtes du langage FLT [Sistla et al., 1997]	24
1.10	Requêtes passées, futures et continues [Mokhtar et al., 2002]	25
1.11	Indexation de données spatio-temporelles passées [Xu et al., 1990]	26
1.12	Indexation de données spatio-temporelles présentes et futures [Šaltenis et al., 2000]	28
1.13	Visualisation d'un déplacement selon Imfeld [Imfeld, 2000]	29
1.14	Visualisation des distances dans un déplacement selon Imfeld [Imfeld, 2000]	29
1.15	Présentation d'une situation à un instant t	30
1.16	Déplacement de deux objets mobiles selon [Van De Weghe, 2004]	31
1.17	Représentation graphique des changements de distance possibles entre deux objets mobiles [Van De Weghe et Maeyer, 2005]	32
2.1	B est <i>disjoint</i> de A et A est un polygone	38
2.2	B est <i>disjoint</i> de A et A est une polygône	38

2.3	B est <i>disjoint</i> de A et A est un point	38
2.4	B <i>touche</i> A et A est un polygone	39
2.5	B <i>touche</i> A et A est une polyligne	39
2.6	B <i>touche</i> A et A est un point	39
2.7	B <i>intersecte</i> A et A est un polygone	40
2.8	B <i>intersecte</i> A et A est une polyligne ou un point	40
2.9	Exemples de positions relatives entre un polygone référent A et un polygone cible B	43
2.10	Exemples de positions relatives identiques du point de vue de A et du point de vue de B	46
2.11	Exemples de positions relatives différentes suivant le point de vue	47
2.12	Visualisation des changements de la position relative d'une polyligne et d'un point	48
2.13	Visualisation des changements de la position relative d'un polygone et d'un point	49
2.14	Visualisation des changements de la position relative d'un polygone et d'une polyligne	49
2.15	Visualisation des changements de la position relative de deux polygones	50
2.16	Visualisation des changements de la vitesse relativisée d'un point mobile et un polygone statique	52
2.17	Visualisation des changements de la vitesse relativisée de deux polygones	52
3.1	Taxonomie d'une situation	56
3.2	Illustration de l'état spatio-temporel $A(v^+p^+)B$ et sa représentation diagrammatique	59
3.3	Espaces dominants de la position relative et de la vitesse relativisée	62
3.4	Transitions continues	63
3.5	Visualisation des changements avec la représentation diagrammatique lorsque l'objet référent est un point	66
3.6	Visualisation des changements avec la représentation diagrammatique lorsque l'objet référent est un polygone	67
3.7	Visualisation de l'évolution de la position relative et de la vitesse relativisée de la situation 3.5	68
3.8	Représentation diagrammatique et linguistique d'une situation spatiale	69
3.9	Exemple de raisonnement diagrammatique	70
4.1	Schéma d'ensemble pour la visualisation de trajectoires maritimes	80
4.2	Visualisations ECDIS et radar de données maritimes	81
4.3	Nouveaux outils d'aide à la navigation maritime	83
4.4	Schéma conceptuel simplifié des données de navigation maritime	84
4.5	Exemple de messages reçus par un AIS récepteur	84

4.6	Interface graphique des visualisations absolues et relatives	87
4.7	Trajectoires où la vitesse relativisée diminue et les positions relatives sont variables	91
4.8	Trajectoires où la vitesse relativisée est stable et les positions relatives sont variables	92
4.9	Trajectoires où la vitesse relativisée augmente et les positions relatives sont variables	93
4.10	Interface thématique	94
4.11	Interface temporelle	95
4.12	Visualisation absolue des trajectoires	95
4.13	Visualisation relative de trajectoires	96
4.14	Représentation absolue et relative de la configuration 1	98
4.15	Représentation absolue et relative de la configuration 2	98
4.16	Représentation absolue et relative de la configuration 3	99
4.17	Représentation absolue et relative de la configuration 4	99
4.18	Représentation absolue et relative de la configuration 5	100
4.19	Représentation absolue et relative de la configuration 6	100
4.20	Représentation absolue et relative de la configuration 7	101
4.21	Comparaison de la configuration 3 et de la configuration 5 visualisées avec la représentation absolue	105
4.22	Comparaison de la configuration 3 et de la configuration 5 visualisées avec la représentation relative	106
4.23	Visualisation de trajectoires à partir d'un cercle	112
B.1	Situation : le point référent se déplace et croise un polygone immobile	117
B.2	Situation : deux polygones (A objet référent) mobiles se croisent	120
F.1	Explications	163
G.1	Explications	175
H.1	Explications	187

INTRODUCTION

Contexte

Les moyens de transports terrestres, aériens et maritimes sont des éléments indissociables de nos modes de vie, et des facteurs essentiels de développement et de rapprochement des sociétés qui composent les territoires. Avec les progrès constants des techniques et des moyens de transport, les déplacements se font plus rapides et se démocratisent, rendant ainsi les distances plus accessibles. La contrepartie de ce développement est la forte pression qu'il exerce sur l'environnement, et la nécessité accrue de mettre en place des outils de planification des politiques de transport et des outils d'observation adaptés.

Cette augmentation du trafic à tous les niveaux (mondial, régional et local) entraîne un encombrement croissant des routes terrestres, aériennes et maritimes. Du point de vue de la gestion et de la sécurité des moyens de transport, une surveillance des zones à risque est en particulier nécessaire. Dans ce cadre, l'émergence d'outils de géolocalisation comme le GPS (Global Positioning System) ou Galileo (pendant européen du GPS qui devrait être opérationnel en 2008) et les systèmes de suivi d'infrastructures et de systèmes de trafic permettent de disposer de flux de données en temps-réel si ces dernières sont organisées et traitées convenablement [Laurini et al., 2001]. Ces données localisées favorisent la connaissance des positions géographiques en temps-réel des objets mobiles utilisateurs d'un mode de transport, et d'obtenir ainsi des vues à la fois globales et locales d'un système.

Les systèmes de géolocalisation en temps-réel ont connu un développement considérable avec l'apparition du système GPS. Ce système américain est composé d'une balise qui reçoit le signal de satellites et, qui via une triangulation des données, détermine sa position [Taylor et Blewitt, 2006]. Il est couramment utilisé pour la localisation des moyens de transport terrestres pour l'aide à la navigation, et pour la localisation des moyens de transports maritimes et aériens. Dans ces deux derniers domaines, les données calculées sont transmises via des transpondeurs aux utilisateurs voire aux autorités compétentes pour suivre en temps réel l'évolution d'un système de transport. Dans le domaine maritime, un transpondeur AIS (Automatic Identification System) transmet la position déterminée par le GPS et des informations descriptives sur le moyen de transport via une antenne VHF (Very High Frequency). Le transpondeur AIS reçoit les données transmises par d'autres transpondeurs AIS et permet ainsi à un utilisateur mobile de connaître les déplacements et les positions des navires à proximité. Les informations reçues peuvent être couplées à des cartes numériques dans un lo-

giciel répondant à la norme ECDIS (Electronic Charts Display Information System) de l'OMI (Organisation Maritime Internationale) ou à un radar (RAdio Detection And Ranging - vue relative des positions). Ces systèmes sont progressivement mis en place dans le domaine maritime pour aider à la gestion des déplacements, pour des manoeuvres d'évitement de deux navires, et pour la surveillance de zones à fort trafic et des zones côtières.

Ces systèmes de géolocalisation s'intègrent de plus en plus aux Systèmes de Transport Intelligents (STI) qui regroupent un ensemble de technologies dont l'objectif est d'améliorer les circuits d'observation et les processus de décision et de planification dans le domaine du transport. D'après [Laumonier, 2004], les fonctionnalités de ces systèmes peuvent se catégoriser en différentes composantes [García-Ortiz et al., 1995] : gestion du trafic en temps-réel et détection des incidents éventuels sur le réseau représenté, étude de planification des routes de transport, études comportementales au niveau des objets individuels, planification des transports à différents niveaux d'échelle, étude des problèmes de sécurité. Ces systèmes connaissent un fort développement depuis les années 90 lié au développement des capteurs embarqués et des systèmes informatiques installés dans les véhicules et dans les infrastructures des réseaux de transport.

Ce développement des moyens de géolocalisation en transport s'accompagne de celui des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) qui se sont aussi développés grâce aux progrès des technologies informatiques [Longley et al., 1999]. Les SIG sont apparus au début des années 60 comme des outils de manipulation et de cartographie automatique des données géographiques. A partir des années 70, ces systèmes se sont attachés de plus en plus à modéliser, analyser et visualiser des données géographiques urbaines et environnementales, et à développer des outils d'aide à la décision. Les SIG se sont depuis largement développés dans de nombreux domaines d'applications grâce aux développements de l'infographie et des bases de données spatiales. Plus récemment, leur champ d'application s'élargit avec le développement de l'internet, des systèmes temps-réel, et celui des outils de géolocalisation de données spatio-temporelles évoqués précédemment.

La combinaison des ressources d'intégration de données localisées, des STI, et des SIG ouvre de larges perspectives applicatives dans le domaine du transport. Il reste cependant à aborder les modèles et les techniques d'exploitation de ces données et les types de services à offrir aux utilisateurs. Dans le domaine maritime qui est le terrain expérimental privilégié de cette thèse, le champ d'application est varié et encore relativement inexploré. Les perspectives sont nombreuses, elles passent de la détermination et le suivi des positions des moyens de transport maritime par les systèmes de géolocalisation, au couplage, à une gestion et une visualisation de ces données afin de permettre la mise à disposition de nouveaux outils de contrôle, d'observation et de surveillance des zones à fort trafic, et des solutions délocalisées d'aide à la décision pour les utilisateurs naviguants (figure 1).

Besoins

La mise en oeuvre de solutions de traitement d'informations de transport et de navigation impose l'identification de modèles spatio-temporels de données performants et d'outils de visualisation qui facilitent la perception et la compréhension des phénomènes observés. Les besoins sont en particulier nombreux dans la mesure où les besoins sont cruciaux dans le domaine des représentations et des visualisations adaptées du point de vue sémantique, de celui des interfaces d'observation et d'aide à l'analyse du trafic, et ce notamment dans des zones critiques et à forte densité. Dans le domaine de la navigation maritime, il existe princi-

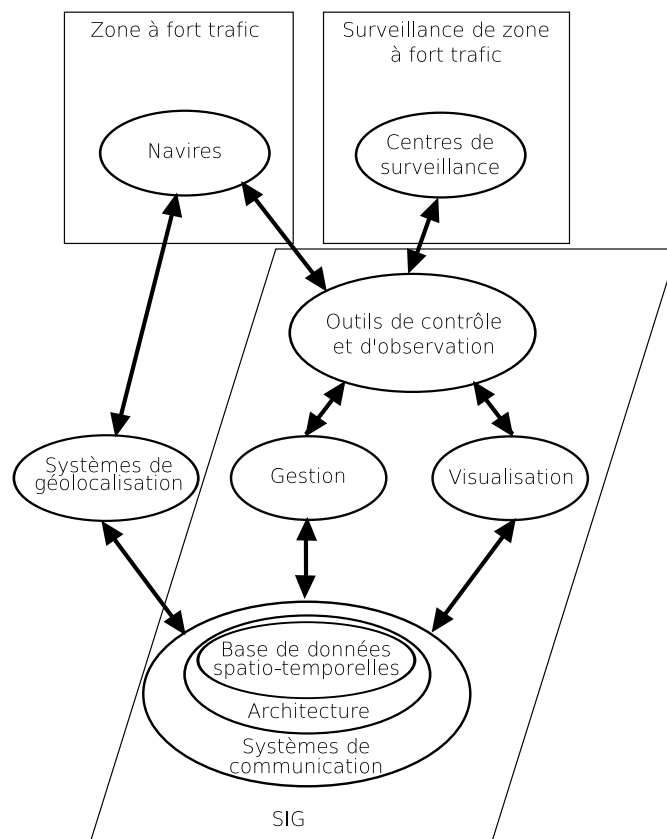


Figure 1 — Collaboration potentielle des SIG et des systèmes de géolocalisation dans le domaine maritime

palement deux situations significatives de visualisation de trajectoires des navires : les centres de surveillance observant une zone donnée de trafic maritime (de type capitainerie dans un port) et celui du point de vue d'un navire considéré comme un acteur interagissant dans son environnement. Dans ces deux cas, les progrès liés aux cartes numériques couplées aux systèmes de géolocalisation permettent actuellement de visualiser en temps réel les positions des navires dans une large zone d'environ 30 km de rayon, qui correspond au rayon de transmission des antennes VHF. Dans le cas des navires, ces progrès entraînent une visualisation de successions de positions qui renseignent sur la position du navire, ainsi que des navires à proximité, et sur l'environnement maritime géographique. Ces représentations ne permettent cependant pas d'analyser les situations en exploitant toutes les informations fournies par les systèmes de géolocalisation, et d'anticiper les déplacements des navires à proximité. Les cartes numériques actuelles offrent la visualisation de la succession de positions des navires, et la visualisation d'un état instantané des autres données transmises par l'AIS (cap et vitesse par exemple). Il apparaît cependant que la visualisation de la succession des données qualitatives et quantitatives liées aux trajectoires de ces navires améliorerait la compréhension des comportements grâce à l'intégration de la dimension temporelle. En particulier, la visualisation de la continuité des changements de position sur un intervalle de temps donné, et donc d'une trajectoire, et de la continuité des changements des autres données, démultiplierait les possibilités de visualisation et de simulation de ces déplacements, permettant ainsi l'analyse des tendances et des événements principaux. De tels besoins nous amènent à proposer une étude

des modèles et des outils de traitement les plus adaptés à la visualisation et la compréhension de la dynamique des données de navigation (figure 2).

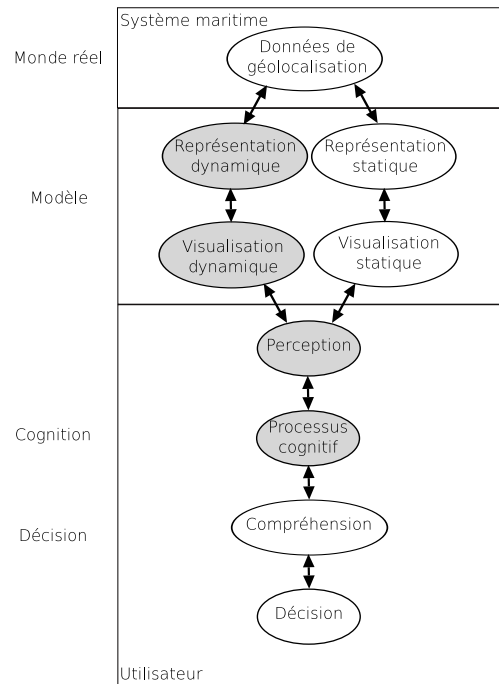


Figure 2 — Système d'aide à la décision pour l'aide à la navigation maritime

Objectifs et plan de thèse

Nous nous proposons donc de situer notre étude au niveau de la représentation et de la visualisation dynamique des données de trajectoires avec une application privilégiée dans le domaine maritime. Notre objectif consiste à définir un modèle de représentation et de manipulation de données géographiques temporelles qui prenne en compte toutes les dimensions nécessaires au suivi et à l'observation de trajectoires de navires (figure 2). Une telle représentation devrait permettre l'amélioration de la compréhension de situations complexes de navigations maritimes pour l'aide à la gestion et à l'observation de comportements de navires, notamment dans des zones à fort trafic et les ports.

Le choix des représentations spatio-temporelles doit s'effectuer en relation avec la compréhension de l'utilisateur des situations, dans lesquelles il est acteur ou spectateur, de déplacements des navires. L'utilisateur peut aussi, suivant les représentations, être au centre d'une situation donnée ou avoir une vue externe qui dominera la situation. La compréhension se base donc sur une représentation adaptée des données, et aussi sur une interprétation de ces dynamiques de navigation.

Le document est organisé en quatre chapitres principaux. La figure 3 présente cette organisation, les différentes parties et leur articulation. Le premier chapitre étudie les principes et les concepts liés à la modélisation, la représentation et la visualisation des données spatiales puis des données spatio-temporelles. A partir d'une vue d'ensemble des recherches existantes sur

la modélisation de trajectoires d'objets mobiles, nous justifions notre choix de représentation relative et spatio-temporelle des trajectoires géographiques d'objets mobiles.

Le second chapitre présente les fondements de la modélisation des objets mobiles, définit les différentes mesures choisies pour le modèle, et énonce leurs propriétés.

Le troisième chapitre est consacré à une étude de la relation entre le modèle et le langage naturel. Les caractérisations des processus relatifs au modèle et à la visualisation des trajectoires dans une vue plus globale sont analysées à partir du raisonnement spatio-temporel d'une application de diagrammes conceptuels de voisinage, et de tables de composition.

Le quatrième chapitre présente un prototype de visualisation de trajectoires maritimes dans une représentation absolue existante et dans une représentation relative des mesures définies dans le modèle. Une validation expérimentale de la représentation développée est présentée, et les résultats de cette validation sont traités.

Enfin, une conclusion établit les apports de ce nouveau modèle ainsi que ses limites. Des extensions à ce modèle et des perspectives dans le développement du prototype seront énoncées.

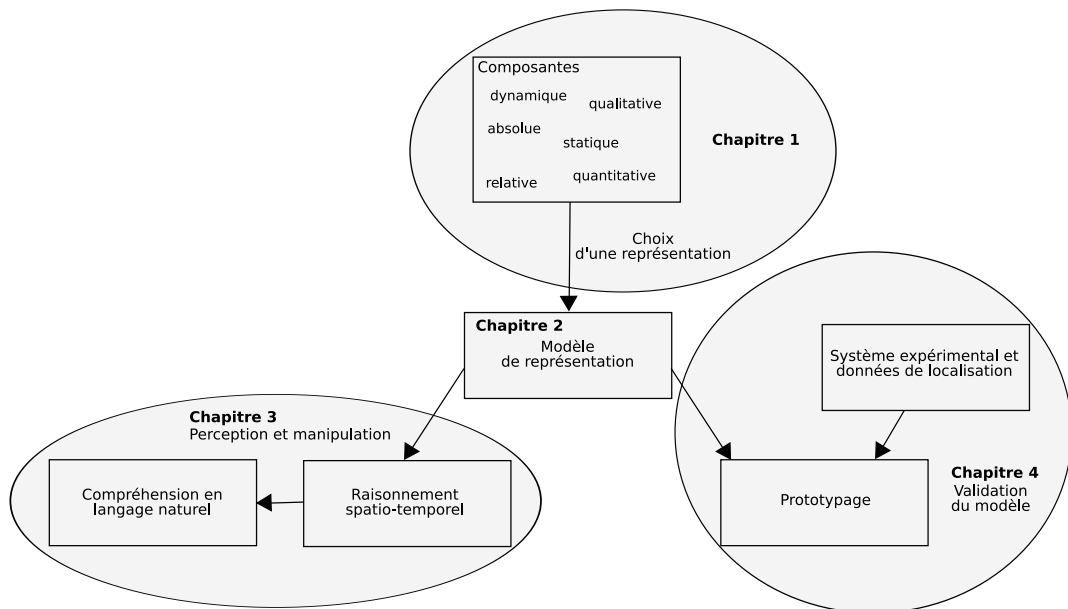


Figure 3 — Organisation et progression du mémoire

Chapitre 1

REPRÉSENTATION DE DONNÉES SPATIALES ET DE TRAJECTOIRES D'OBJETS MOBILES

1.1 Introduction

Le développement constant des moyens d'acquisition en temps-réel de données géoréférencées [Sistla et al., 1997], conjugué avec les nombreuses recherches orientées sur la modélisation, la représentation et la visualisation de données spatio-temporelles participent à l'émergence de la problématique des objets mobiles [Sistla et al., 1997] [Guting et Schneider, 2005]. Du point de vue des bases de données, les aspects traités concernent pour l'essentiel de la représentation, la manipulation et le traitement des informations [Guting et Schneider, 2005]. Les recherches actuelles peuvent plus précisément se classer en différents groupes [Spaccapietra, 2001] :

- celui des modèles cognitifs et conceptuels pour représenter les données spatio-temporelles afin de répondre aux demandes de l'utilisateur (modèles élaborés à partir des principes issus de la cognition spatiale, la géographie naïve, les ontologies et les principes du raisonnement spatio-temporel) ;
- celui des modèles logiques de description des structures de données compatibles avec les technologies des bases de données spatio-temporelles existantes ;
- celui des modèles physiques (ou internes) pour notamment gérer les performances d'accès aux données spatio-temporelles (i.e. index spatio-temporels).

Les modèles spatio-temporels actuellement développés sont orientés vers la représentation des données spatiales d'un point de vue général, ou vers des applications plus spécifiques comme celles qui concernent les objets mobiles et leurs trajectoires.

Ce chapitre introduit les principes de modélisation des données spatiales, et ceux utilisés pour la représentation des trajectoires d'objets mobiles. Il s'organise en deux parties : la représentation des données spatiales puis la représentation des trajectoires (figure 1.1). La section 1.2.1 introduit les principes généraux de la représentation des données spatiales. Nous présentons successivement les approches cognitives, la géographie naïve et le raisonnement spatial, et leur contribution dans la représentation de données spatiales. Dans la section 1.2.2,

la modélisation topologique des entités spatiales et la modélisation topologique de leurs relations sont développées. Les sections 1.2.3 et 1.2.4 présentent respectivement différents modèles logiques et physiques de description d'objets spatiaux. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous introduisons les principes de modélisation des objets mobiles et de leurs trajectoires. Les modélisations conceptuelles, logiques et physiques de ces objets sont développées dans les sections 1.3.1, 1.3.2 et 1.3.3. La section 1.3.4 aborde le domaine de la visualisation d'objets mobiles. La dernière section conclue ce chapitre en identifiant les premiers principes qui devraient orienter la construction de notre modèle de trajectoires d'objets mobiles.

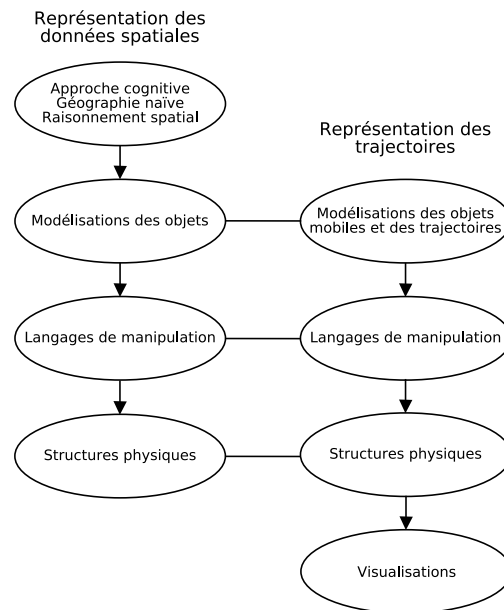


Figure 1.1 — Progression du chapitre

1.2 Représentation de données spatiales

1.2.1 Principes de représentation des données spatiales

Toute la finesse inhérente à l'interprétation et la compréhension des informations spatiales et temporelles par les humains ne sont pas complètement intégrées dans les modèles et les logiciels actuels de SIG. Il est donc indispensable, afin d'améliorer la pertinence de ces systèmes, de définir de nouveaux moyens de modélisation et de traitement qui respectent toute la sémantique de ces informations. Ces progrès sont en particulier essentiels pour un véritable développement des SIG compatibles avec les besoins de traitement et d'analyse des sciences pluri-disciplinaires [Thériault et Claramunt, 1999]. Ces besoins se traduisent par les évolutions récentes des modèles de représentation de données spatiales, où les principes issus de la cognition spatiale, de la géographie naïve et du raisonnement spatial qualitatif prennent de l'importance.

1.2.1.1 Approche cognitive et géographie naïve

Les propriétés cognitives sont des facteurs essentiels de la perception et de la communication de l'information spatiale. La communication d'informations spatiales prend des formes variées et fait référence à des notions qualitatives, quantitatives et imprécises de l'espace, et une interprétation des informations bien souvent liée au contexte [Montello, 2001]. L'étude de la perception et de l'interprétation des informations spatiales est un autre élément composant l'essence de l'approche cognitive. Ces perceptions sont conditionnées par les propriétés socio-culturelles des utilisateurs dans la mesure où les différences et les similitudes sont notamment dépendantes de l'âge, de l'éducation, du statut social ou encore de la culture des êtres humains.

Les propriétés cognitives des informations spatiales sont liées aux principes d'acquisition de la connaissance spatiale, et influencent les structures utilisées pour modéliser cette connaissance [Eschenbach et Schill, 1999] [Levinson, 1998] [Montello, 2001]. L'acquisition de la connaissance spatiale est liée aux systèmes sensoriels et moteurs mis en jeu lors, par exemple, de déplacements dans l'espace géographique. L'expression de cette connaissance passe par l'utilisation de cartes, du langage ou encore de modèles en trois dimensions, elle évolue également au cours du temps.

Les propriétés cognitives des informations spatiales sont utilisées pour décrire, prédire ou expliquer les relations entre les humains et leur environnement. Elles aident à la compréhension de multiples phénomènes, et améliorent l'utilisation des cartes et des systèmes géographiques.

En complément de l'approche cognitive, la géographie naïve développe des concepts plus intuitifs qui permettent de modéliser des phénomènes spatiaux et temporels avec un point de vue qualitatif. Elle concerne l'étude de la géographie du sens commun à travers des modèles dérivés de l'espace géographique [Egenhofer et Mark, 1995b] [Raubal et al., 1997]. Elle peut se définir comme "le corps de connaissance que les êtres humains ont du monde géographique qui les entoure". Elle formalise la façon de penser le temps et l'espace des êtres humains, et s'appuie sur le concept de la physique naïve développée par Hayes [Hayes, 1978, Hayes, 1985]. Son principal intérêt est d'établir un raisonnement spatial et temporel basé sur le raisonnement qualitatif. La géographie naïve s'appuie et utilise des concepts et des principes venant des sciences cognitives et linguistiques, elle permet d'établir un lien entre les perceptions de l'espace géographique et les manières de les communiquer.

A partir de la géographie naïve, l'espace géographique est perçu comme un référentiel à grande échelle dans lequel il est possible de représenter les objets par différentes géométries et à différentes échelles de représentation. L'espace géographique contient donc plus que ce qui est visible d'un seul point de vue [Kuipers, 1978] [Kuipers et Levitt, 1988]. La perception et l'exploration de cet espace est de nature à générer autant de représentations que d'utilisateurs.

La connaissance et le raisonnement liés à la géographie naïve et à la cognition spatiale donnent des bases nouvelles pour revisiter les modèles de SIG afin que les utilisateurs manipulent et interagissent plus simplement avec les logiciels et leur environnement [Berendt et al., 1998]. Il reste que si les concepts spatiaux et temporels paraissent intuitifs dans les méthodes de compréhension des humains, ils sont complexes à formaliser et donc à intégrer au sein de systèmes informatiques. L'intégration de ces concepts dans les modèles spatiaux peut constituer une première étape pour combler la différence existante entre ce que peut déduire un humain en utilisant un SIG, et ce que devrait idéalement offrir un SIG.

Plus concrètement, la géographie naïve dans une démarche de mise en oeuvre, est composée de deux approches complémentaires :

- le développement formel et mathématique de modèles spatiaux orientés vers un domaine de connaissance particulier, avec l’objectif d’être implémenté et testé auprès d’utilisateurs afin de les valider, de les améliorer et de les enrichir,
- la généralisation de modèles par l’étude de phénomènes similaires afin de définir des modèles formels génériques et proches de la perception humaine.

La géographie naïve contribue à l’émergence de nouvelles représentations cognitives de l’espace et du temps. Afin d’intégrer ces représentations dans les logiciels de SIG, il est donc essentiel de définir et de formaliser les concepts spatio-temporels répondant à un domaine de connaissance particulier, et à des problèmes précis de perception et de compréhension des informations spatio-temporelles.

1.2.1.2 Raisonnement spatial

Dans le raisonnement quantitatif, les valeurs numériques des données sont prises en compte. Ces valeurs permettent une représentation et une visualisation de l’évolution d’un système. Les modèles liés à ce type de raisonnement utilisent des valeurs absolues et précises. A contrario, dans le raisonnement qualitatif, les données sont représentées via des valeurs prédéterminées et qualitatives [De Kleer et Brown, 1984]. Ces raisonnements facilitent les traitements avec des informations incomplètes ou partiellement connues. Elles représentent une forme de généralisation ou d’abstraction de données quantitatives. Les modèles qualitatifs permettent de définir et de regrouper des comportements modélisés à partir de données quantitatives afin de les caractériser dans le langage naturel. Les modèles qualitatifs et quantitatifs sont complémentaires [Egenhofer et Mark, 1995b]. Les informations qualitatives sont généralement suffisantes pour aider à l’analyse de situations et à la prise de décision, mais il est parfois nécessaire que des informations quantitatives soient prises en compte afin de préciser les situations modélisées.

La représentation absolue de l’espace est la représentation actuellement la plus utilisée dans les modèles spatio-temporels [Vieu, 1997]. Son origine et son système de référence sont fixes et existent continuellement. Ils ne sont pas soumis à l’existence d’un objet particulier. Elle est facilement compréhensible dans la mesure où elle représente le plus souvent une vision globale d’une situation. La principale différence entre une représentation absolue et une représentation relative réside dans le fait que dans cette dernière le système de référence est fonction de la localisation de l’observateur qui généralement est partie prenante de la situation modélisée.

Les notions de *occurant* et *d’endurant* permettent de distinguer les comportements des objets dans l’espace-temps [Grenon et Smith, 2004]. Les *occurants* regroupent les entités qui sont valides pour un instant ou un intervalle donnés. La localisation d’une personne dans un bâtiment précis n’est par exemple valide que pour un intervalle précis mais elle peut se reproduire sur des intervalles de temps différents. Les *endurants* sont, au contraire des *occurants*, valides sur un grand intervalle de temps. Ils persistent dans le temps en subissant éventuellement des changements. Une entité “*personne*” est par exemple valide sur plusieurs années, bien que subissant des transformations, son identité reste la même. En fonction de la granularité temporelle d’une situation, un phénomène peut être compris comme statique ou dynamique. Les *endurants* n’ont pas d’évolution significative pour une “courte durée” relative. Ils peuvent donc être considérés comme dans un état statique. A une échelle temporelle plus grande, ces mêmes *endurants* peuvent être considérés comme dans une dynamique de mouvement. Parallèlement, et à partir du raisonnement spatio-temporel, un même phénomène peut être manipulé de manière différente suivant la granularité temporelle choisie.

Pour un même phénomène, les entités spatiales se modélisent à partir de notions ontologiques de différentes natures [Grenon et Smith, 2004]. La première est apparentée à un état et une entité qui perdure dans le temps, nommée SNAP (par analogie au concept d’occurent). La seconde, nommée SPAN, représente un changement ou un processus. Pour une échelle temporelle relativement fine, une personne est représentée par l’ontologie SNAP et la localisation de cette personne correspond à l’ontologie SPAN. L’ontologie SNAP correspond à une entité dont l’identité perdure dans le temps, avec une continuité. Elle ne représente pas les entités instantanées ni une agrégation d’entités instantanées, mais elle correspond plus à un snapshot ou au résultat d’un processus. L’ontologie SPAN correspond de son côté à une succession d’événements, d’entités. Elle correspond par analogie à une visualisation de changements via une vidéo. Elle représente les entités à travers la succession de leurs versions. A l’échelle humaine, pour un contexte géographique [Grenon et Smith, 2004] [Worboys, 2005], les montagnes, les lacs, les vallées, les villes correspondent à des ontologies de type SNAP. Des entités spatiales, notamment en mouvement, sont définies par des ontologies SPAN. Les processus géographiques peuvent représenter des processus physiques comme une érosion, des feux de forêt, des processus sociaux tels que les changements démographiques, les épidémies sont des processus qui se modélisent à partir d’une approche SPAN.

1.2.2 Modélisation des objets et de leurs relations

La modélisation du monde réel au sein d’un SIG nécessite une généralisation, une structuration et une catégorisation des informations de l’environnement [Hake et Grünreich, 1994]. Goodchild définit un modèle de données comme “une représentation limitée de la réalité, contrainte par la nature discrète et finie des dispositifs de calcul” [Goodchild, 1992]. Afin de représenter les objets spatiaux du monde réel, trois types d’entités géométriques sont essentiellement utilisées [Laurini et Milleret-Raffort, 1993] [Guting et Schneider, 2005] :

- le point qui définit un objet de dimension 0 dans l’espace, par exemple une ville, un bâtiment ou un navire sur une carte à petite échelle,
- la ligne définie comme une courbe dans l’espace qui représente un objet à une dimension ou une trajectoire, par exemple une rivière, une frontière ou le déplacement d’un navire,
- la région qui définit un objet en dimension 2, par exemple un pays, une forêt ou une zone portuaire.

Les relations spatiales entre les objets du monde réel peuvent être classées pour les principales en trois catégories : les relations topologiques, métriques et d’orientation qui peuvent être définies à partir des entités représentant ces objets [Colliot, 2003]. Les relations métriques telles que “*proche de*”, “*à telle distance de*” sont des relations binaires qui sont souvent traitées par des approches quantitatives même si des propositions récentes abordent la modélisation de distances d’un point de vue qualitatif [Clementini et al., 1997]. Les relations d’orientation entre deux objets sont relativement intuitives (“*à gauche*”, “*à droite*”, ...) et sont traitées qualitativement ou quantitativement [Ligozat, 1998] [Freska et Zimmermann, 1992]. Les relations topologiques entre objets sont des primitives fondamentales aux modèles de SIG. Elles définissent des relations spatiales absolues telles que “*est inclus dans*” à partir des relations ensemblistes. Plusieurs topologies définissant les relations entre deux régions ont été développées. Les définitions topologiques équivalentes d’un espace topologique essentiellement utilisées pour caractériser ces relations Les deux approches topologiques équivalentes essentiellement utilisées pour caractériser ces relations, sont celles de la topologie usuelle et du modèle des 9 intersections.

1.2.2.1 Topologie usuelle

Worboys présente les définitions de la topologie usuelle utilisée dans le contexte spatial, en reprenant les principes établis par Henle [Henle, 1979] [Worboys et Duckham, 2004]. Les définitions topologiques fondamentales sont les suivantes :

- Soit S un espace topologique qui a un ensemble de voisinages associé. Soit X un sous-ensemble de points de S et x un point individuel de S . x est proche de X si chaque voisinage de x contient des points de X .
- La fermeture de X est l'union de l'espace topologique formé par tous les points proches de X , elle est notée $\overline{X}$.
- Le complémentaire X' de X est l'ensemble des points n'appartenant pas à X .
- L'intérieur de X représente tous les points appartenant à X et n'étant pas proches de X' le complémentaire de X . Il est noté X° .
- La frontière de X représente tous les points proches de X et de X' , elle est notée ∂X .
- L'extérieur de X représente le complémentaire de la fermeture de X et elle est notée X^- .

Ces définitions sont utilisées dans un espace euclidien à deux dimensions où l'intérieur, la fermeture et la frontière des régions et des lignes sont représentées dans la figure 1.2.

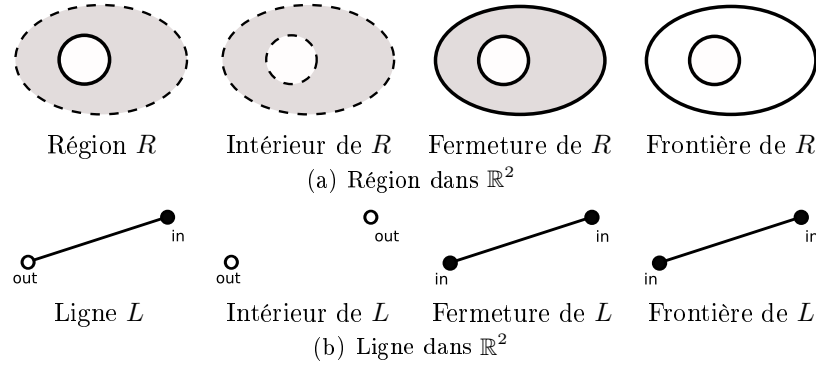


Figure 1.2 — Intérieur, fermeture et frontière d'une région et d'une ligne dans $\mathbb{R}^2$

Les opérations topologiques entre deux surfaces ou régions X et Y sont (figure 1.3) :

- X *touche* Y si et seulement s'il existe une partie de la frontière de X commune à la frontière de Y , et si X est à l'extérieur de Y .
- X *recouvre partiellement* Y si et seulement s'il existe une partie de l'intérieur de X commune à l'intérieur de Y , et si une partie de l'intérieur de X est commune à l'extérieur de Y .
- X *est dans* Y si et seulement si X est un sous-ensemble de Y , et s'il existe aucune partie de la frontière de X commune à la frontière de Y .
- X *couvre* Y si et seulement si Y est un sous-ensemble de X (Y est donc à l'intérieur de X) et s'il existe une partie de la frontière de X commune à la frontière de Y .

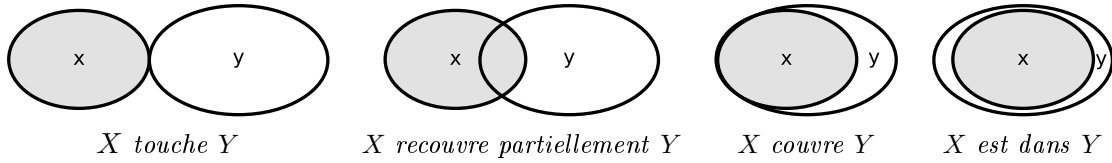


Figure 1.3 — Relations topologiques entre deux régions X et Y

1.2.2.2 Modèle des 9 intersections

Le modèle des 9 intersections développé par Egenhofer pour représenter les relations entre régions sans trous représentées par deux ensembles de points génère huit relations spatiales possibles entre ces régions modélisées comme des ensembles de points dans $\mathbb{R}^2$. Ces ensembles de points sont caractérisés par leur intérieur, leur frontière et leur complémentaire. Plus formellement [Egenhofer et Franzosa, 1991] :

- L'intérieur d'une région Y est défini par l'union de tous les ouverts qui sont contenus dans Y , i.e. l'intérieur de Y est le plus grand ouvert contenu dans Y
- Le complémentaire d'une région Y dans l'espace $\mathbb{R}^2$ ou l'extérieur d'une région Y est l'ensemble des points de $\mathbb{R}^2$ ne contenant pas Y [Egenhofer, 1994a]
- La fermeture d'une région Y est définie par l'intersection de tous les fermés contenant Y , i.e. la fermeture de Y est le plus petit ensemble fermé contenant Y
- La frontière d'une région Y est le résultat de l'intersection de la fermeture de Y et de la fermeture du complémentaire de Y . La frontière est un ensemble fermé.

Les relations topologiques entre deux ensembles de points A et B sont décrites par un ensemble de neuf intersections possibles entre l'intérieur, l'extérieur et la frontière de A et l'intérieur, l'extérieur et la frontière de B . Ces intersections peuvent se schématiser sous la forme de la matrice carrée évaluée par le résultat des intersections (soit ensemble vide $\emptyset$, soit ensemble non-vide $\neg\emptyset$) suivante :

$$\begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^- \\ \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

Dans un espace à plus de deux dimensions, 512 relations topologiques sont possibles entre deux régions mais dans l'espace $\mathbb{R}^2$, seules huit relations sont possibles entre deux régions sans trou [Egenhofer et Franzosa, 1991]. Le tableau 1.1 spécifie ces relations et les interprète spatialement.

Egenhofer a également défini les relations entre une ligne et une région dans $\mathbb{R}^2$ [Egenhofer et Mark, 1995a]. Une ligne est définie par un intérieur, une frontière et un extérieur (ce qui n'est pas le cas dans la topologie usuelle dans $\mathbb{R}^2$). La définition d'une ligne se base sur les connexions des 1-cellule la composant, c'est-à-dire les connections directes entre deux noeuds géométriques indépendants. Une ligne est alors une séquence de 1.. n 1-cellules connectées pour qu'elles ne forment pas de cycle. Les noeuds forment la frontière de la ligne et son intérieur est l'union de tous les intérieurs des noeuds et de toutes les connexions entre les noeuds. La fermeture d'une ligne représente l'union de son intérieur et de sa frontière et son extérieur le résultat de la différence entre l'espace $\mathbb{R}^2$ et sa fermeture. Les relations entre une région et une ligne sont donc le résultat de l'intersection entre les intérieurs, les frontières

$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ disjoint	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ contient	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ dans	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ égal
$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ touche	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ couvre	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ couvert par	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$ chevauche

Tableau 1.1 — Relations topologiques entre deux régions sans trous dans $\mathbb{R}^2$
[Egenhofer, 1994a]

et les extérieurs des deux objets. Dans $\mathbb{R}^2$, ces relations sont au nombre de dix-neuf (tableau 1.2).

1.2.2.3 Modèle Region Connection Calculus

La définition des relations existantes entre deux objets spatiaux via le modèle Region Connection Calculus (RCC) introduit dans [Randell et al., 1992], s'appuie sur la théorie de Clarke [Clarke, 1981]. Le formalisme de ce modèle se base sur la relation primitive $C(x, y)$ (x est relié à y) qui traduit le fait que les fermetures de x et de y se partagent un point commun. A partir de cette relation, deux axiomes sont introduits :

- $\forall x C(x, x)$
- $\forall xy [C(x, y) \rightarrow C(y, x)]$

Les relations entre deux régions sont ensuite définies :

- x est déconnecté de y
 $DC(x, y) \equiv_{def} \neg C(x, y)$
- x est identique à y
 $x = y \equiv_{def} P(x, y)^* \wedge P(y, x)$
- x couvre partiellement y
 $PO(x, y) \equiv_{def} O(x, y)^{**} \wedge \neg P(x, y)^* \wedge \neg P(y, x)$
- x est à l'extérieur de y et x est connecté à y
 $EC(x, y) \equiv_{def} C(x, y) \wedge \neg O(y, x)^{**}$
- x est à l'intérieur de y et x est tangent à y
 $TPP(x, y) \equiv_{def} PP(x, y)^{***} \wedge \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$

* avec $P(x, y) \equiv_{def} \forall z [C(z, x) \rightarrow C(z, y)]$, c'est-à-dire x est une partie de y .

** avec $O(x, y) \equiv_{def} \exists z [P(z, x) \wedge P(z, y)]$, c'est-à-dire x couvre y .

*** avec $PP(x, y) \equiv_{def} P(x, y) \wedge \neg P(y, x)$, c'est-à-dire x est une partie propre de y (tout point de x est un point de y [Randell et Cohn, 1989]).

$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$

Tableau 1.2 — Relations topologiques entre une région sans trou et une ligne dans $\mathbb{R}^2$
[Egenhofer, 1994a]

- x n'est pas tangent à y et x est à l'intérieur de y

$$NTPP(x, y) \equiv_{def} PP(x, y)^{***} \wedge \neg \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$$
- inverse de TPP

$$TPP^{-1}(x, y) \equiv_{def} TPP(y, x)$$
- inverse de $NTPP$

$$NTPP^{-1}(x, y) \equiv_{def} TPP(y, x)$$

Dans le cas de régions spatiales, cette modélisation des relations est proche de la modélisation de Egenhofer. Les correspondances sont illustrées dans la figure 1.4.

1.2.3 Langages de manipulation de données spatiales

L'identification de relations topologiques constitue un fondement essentiel pour le développement d'un langage de manipulation de données spatiales. Il existe deux approches différentes de l'expression de requêtes spatiales : l'approche textuelle et l'approche figurative [Bonhomme et Aaufaure, 2001]. L'approche textuelle se base sur une description des requêtes par un texte en langage naturel et/ou par des délimiteurs identifiés. Les langages logiques comme SQL ou OQL utilisent une structure identique pour toutes les requêtes. Dans le cas

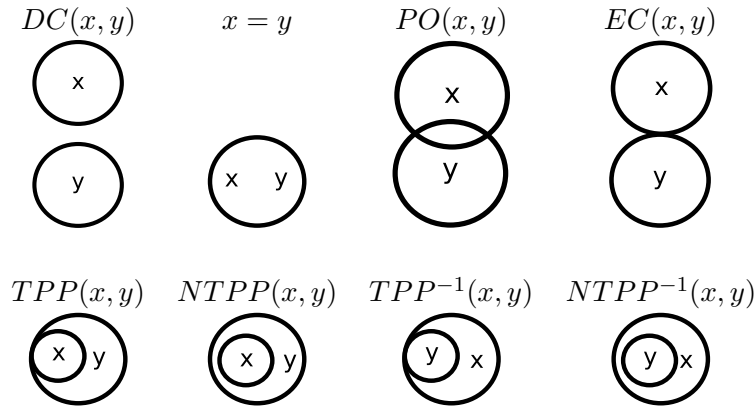


Figure 1.4 — Relations topologiques entre deux régions spatiales

du SQL, les requêtes sont définies sous la forme “*SELECT FROM WHERE*”. Cette structure de base permet de sélectionner un ensemble d’attributs à partir d’une table ou d’un ensemble de tables qui correspondent aux différents critères choisis. Si ces langages n’ont pas été développés pour les informations spatiales, différentes extensions ont été proposées [Arcieri et al., 1993] [Egenhofer, 1994b]. Une extension standardisée de SQL pour les données complexes telles que les données multimédia et les données spatiales est introduite dans la norme SQL3/MM [Organisation Internationale de Normalisation (ISO), 2000]. Dans le cas de OQL, les méthodes génériques définissant les relations spatiales entre les objets spatiaux sont déclarées pour des objets de type “*géométrie*” puis implémentées pour chaque géométrie (point, ligne et surface) [Devogele, 2002]. L’utilisation de constructions dérivées du langage naturel dans la définition de requêtes entraîne souvent une complexité liée à la formulation des idées et même à des ambiguïtés inhérentes aux langues utilisées [Bonhomme et Aufaure, 2001].

L’approche figurative permet de définir des requêtes sous une forme tabulaire, graphique ou visuelle. Ces langages se basent sur les principes du langage Query-By-Example (QBE) [Zloof, 1977]. La définition de la requête se fait par la désignation graphique des éléments pris en compte dans la requête, tout comme le choix des prédicats et la désignation du type de résultat voulu. L’utilisateur peut exprimer sa requête à partir d’icônes disponibles comme dans le langage Cigales, ou à partir d’un dessin libre comme dans les langages Sketch! et Spatial-Query-By-Sketch [Aufaure-Portier, 1995] [Meyer, 1992] [Egenhofer, 1997].

Ces différents langages de requêtes sont utilisés pour répondre à des requêtes élémentaires souvent complétées par des opérateurs intégrés comme des critères topologiques. Ces requêtes élémentaires utilisent essentiellement les notions de point, de ligne et de région. Elles répondent à des questions du type “*Quels sont les objets dans la zone Z*”. Ce type de requête se définit comme une recherche des entités spatiales recouvertes par la zone définie par l’utilisateur, la réponse à cette requête est donnée par l’ensemble des objets dont les coordonnées spatiales intersectent les coordonnées spatiales de la zone. Le résultat est alors l’ensemble des objets A , B , C , D et G dans l’exemple de la figure 1.5(a). Avec des requêtes topologiques, le positionnement et le voisinage des objets peuvent être définis comme des relations topologiques entre ces objets. Un autre exemple est celui de la recherche des plus proches voisins à un objet choisi par l’utilisateur (“*Quel est l’objet le plus proche de l’objet C*”). Le résultat est donné par l’ensemble des objets appartenant à une zone tampon créée autour de l’objet C dans la figure 1.5(b). L’objet B est le seul à intersecter la zone tampon autour de l’objet

C , il est le plus proche voisin de l'objet C .

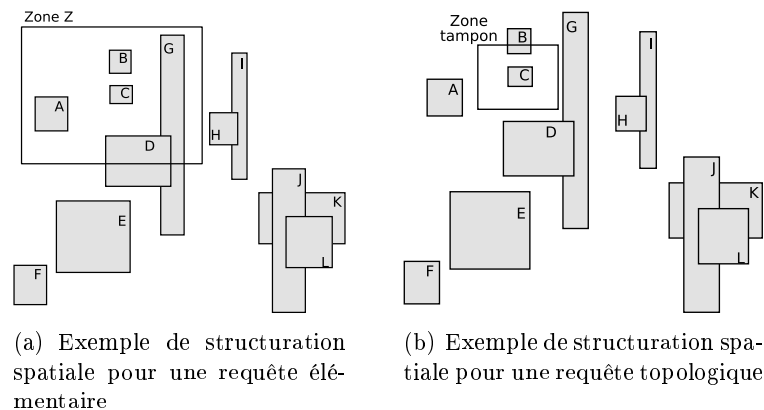


Figure 1.5 — Exemples de requêtes

1.2.4 Modélisation physique

Pour accéder plus facilement et plus rapidement aux données spatiales stockées dans les bases de données, des structures de stockage et des index doivent être développés. Les structures physiques permettent d'ordonner les données spatiales suivant les caractéristiques d'un ou plusieurs attributs. Les propriétés principales des index sont les suivantes [Gaede et Günther, 1998] :

- le dynamisme qui doit faciliter les opérations de mises à jour lors de modifications dans la base de données par insertion, mise à jour ou suppression,
- la gestion de stockages secondaires et tertiaires lorsque la mémoire principale ne peut pas contenir toutes les données,
- la diversité des opérations supportées,
- l'indépendance des données d'entrée lorsque le nombre des données est plus dense pour certaines dimensions,
- la simplicité de la structuration de l'index,
- l'extensibilité de l'index via l'ajout de données,
- la rapidité des exécutions,
- la taille minimisée de l'arbre,
- la gestion de la concurrence pour les bases de données multi-utilisateurs,
- l'impact minimal de l'ajout d'un index dans le reste du système.

Les index doivent être performants notamment pour des requêtes de pointé et par intervalle, par exemple, “*Lister toutes les personnes se trouvant à la position (x, y)* ” et “*Lister toutes les personnes se situant dans la zone définie par les coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2)* ”.

Deux principaux types d'index ont été développés pour les données spatiales : les index construits sur l'espace de référence et les index construits sur les objets spatiaux [Saglio, 2006]. Pour la première approche, l'espace est divisé en cellules régulières ou irrégulières qui permettent de référencer les objets. Les objets sont référencés dans chacune des cellules qu'ils

recouvrent tout ou partie, ce qui entraîne de multiples référencements de certains objets si ces objets ne sont pas des points. Dans le cas où les grilles ne sont pas régulières (grilles adaptatives), les cellules adjacentes où peu d'objets sont référencés sont regroupées. L'arbre B développé dans [Bayer et McCreight, 1972] est une de ces structures. Cet arbre équilibré qui a un déploiement pour chaque noeud borné par le nombre de données contenues dans le noeud a été étendue en arbre B^+ via l'ajout de pointeurs entre les différentes feuilles de l'arbre afin d'améliorer les performances d'accès séquentiel de feuille en feuille. Ainsi l'arbre B^+ est la structure d'index à la base d'un grand nombre de structures utilisées dans les bases de données. Un exemple de ces constructions se base sur les quadrees. Cette structure divise l'espace récursivement en quatre cellules identiques qui sont à leur tour divisées en quatre autres cellules identiques si le nombre d'objets dans la cellule est trop élevé (ce nombre est généralement déterminé par l'utilisateur). Lorsque les noeuds de cet arbre sont identifiés, il est possible de définir un arbre B^+ représentant un parcours de lecture afin d'accéder plus rapidement aux différents noeuds adjacents. Dans la figure 1.6(a), l'espace contient douze objets à hiérarchiser tels que le nombre de ces objets soit au maximum trois dans chacune des feuilles de l'arbre. En prenant un sens de lecture en Z (de droite à gauche et de haut en bas) sur la première division de l'espace, les quatre quadrants regroupent respectivement les objets A, B, C, D et $G; G, H$ et $I; D, E, F$ et G et G, I, J, K et L . Le deuxième quadrant ne contient que trois objets, aucune division supplémentaire n'est nécessaire pour stocker les objets. Les trois autres quadrants contiennent plus de trois objets, chacun est donc divisé en quatre quadrants. L'ensemble des divisions de l'espace tel qu'au plus trois objets soient dans chaque division de l'espace définit l'arbre de la figure 1.6(b).

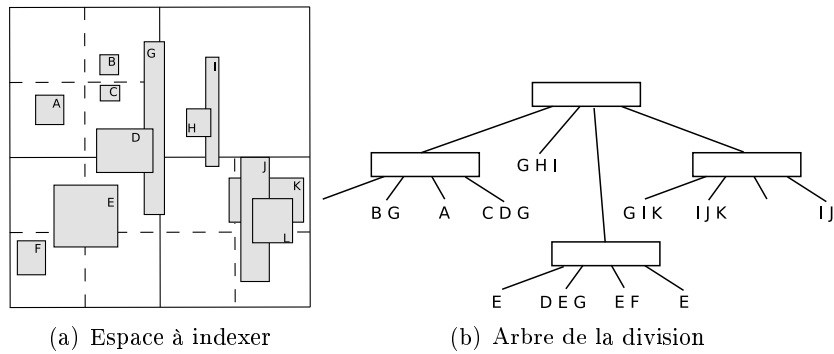


Figure 1.6 — Quadtree

Les quadrees peuvent aussi être utilisés pour la construction d'index sur les objets spatiaux où seules les cellules recouvertes par des objets sont présentes. Une autre méthode de construction d'index est l'approximation géométrique par Rectangle Englobant Minimal (REM). Chaque objet est contenu dans un REM et tous les REM sont regroupés dans des cadres rectangulaires. Les REM sont toujours indexés dans les feuilles de l'arbre résultant et les noeuds de cet arbre représentent les cadres qui les regroupent. La première variante de cette structure accepte le recouvrement des cadres (overlapping regions). Avec le même exemple d'objets répartis dans l'espace que lors de la construction du quadtree et un nombre d'objets stockés dans chaque cadre de trois, un arbre R est défini par le regroupement des REM des objets (figure 1.7(b)) [Guttman, 1984]. Les objets étant déjà représentés par des rectangles, les objets et leur REM sont identiques (figure 1.7(a)). Dans cet arbre, les objets sont indexés lorsqu'ils sont entièrement contenus dans un cadre pour éviter les doublons

dans la structure. L'arbre R^* optimise les cadres de regroupement de l'arbre R et supporte l'indexation simultanée de points et d'autres géométries [Beckmann et al., 1990].

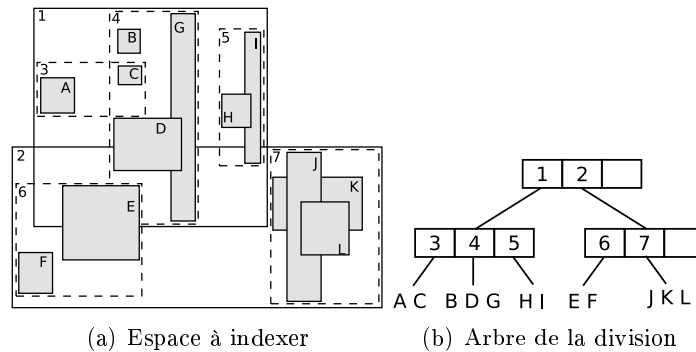


Figure 1.7 — Construction d'index avec recouvrement des cadres [Guttman, 1984]

Une autre variante permet de construire des index sans recouvrement des cadres (clipping) avec l'arbre- R^+ [Sellis et al., 1987]. En utilisant toujours le même exemple et un nombre maximal d'objets dans chaque noeud et feuille de trois, la division comporte cette fois sept cadres (figure 1.8(a)). L'objet D qui recouvre les cadres 4 et 5 est décomposé en deux sous-rectangles indexés soit dans le cadre 4 soit dans le cadre 5 et dont l'union forme le rectangle D .

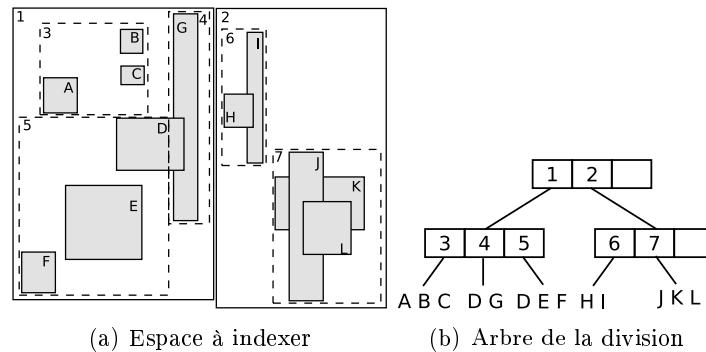


Figure 1.8 — Construction d'index sans recouvrement des cadres

1.3 Représentation de trajectoires

L'acquisition d'une connaissance spatiale et temporelle s'effectue en trois étapes : connaissance des points de repère (landmarks), des routes et enfin localisation de ces éléments. Une carte cognitive intègre donc les éléments spatiaux acquis ainsi que des éléments non spatiaux [Tversky, 1993] [Berendt et al., 1998]. La navigation est composée de deux étapes : la première se réfère à la capacité de l'être humain à se déplacer dans son environnement, et la seconde définit un plan afin d'atteindre une destination [Maass, 1993].

La richesse sémantique des données spatiales génère une grande diversité de phénomènes dynamiques, notamment lorsque la dimension temporelle devient une composante du système représenté. Les objets mobiles, et les trajectoires qu'ils génèrent dans l'espace, en sont un exemple très caractéristique. Les trajectoires des objets mobiles sont définies par un ensemble d'informations qui décrivent le déplacement de ces objets, qualifiées à partir des positions successives. La représentation, la modélisation et l'accès à ces données spatio-temporelles doivent se définir à partir de concepts spatiaux développés et adaptés à la particularité des changements fréquents des valeurs de ces données.

La modélisation de la trajectoire d'un objet mobile dans l'espace peut être appréhendée du point de vue d'un observateur distant, et donc à partir d'une vision globale et a priori absolue, ou du point de vue de cet objet mobile naviguant qui donnera une lecture plus égocentrique et relative du phénomène ainsi observé. À partir de ce constat, il paraît naturel d'aborder le problème de la modélisation d'une trajectoire à partir des principes de la cognition spatiale et de la géographie naïve, et ainsi d'une complémentarité de ces modes de représentation. Cette approche duale sera alimentée par les informations relatives aux objets mobiles qui sont généralement centrées autour de leurs positions, mais aussi des vecteurs vitesse. Les informations seront fournies par les systèmes de géolocalisation, et donc de valeurs précises qui sont traitées individuellement ou regroupées à partir de valeurs prédéterminées. Elles peuvent aussi être représentées à partir d'une vue externe ou interne à la situation, et cela de manière dynamique ou statique.

1.3.1 Modélisation d'objets mobiles

La modélisation d'objets mobiles dans les bases de données spatio-temporelles doit prendre en compte le changement continu des données. Différents points de vue d'une même situation peuvent être représentés afin d'aider à la compréhension des comportements de différents objets mobiles. Ces comportements peuvent être liés à l'environnement de ces objets, ou à leur interaction avec les objets environnants. Les représentations relatives sont plus particulièrement adaptées pour l'exploration de comportements individuels. Il est aussi possible de les utiliser pour l'analyse du comportement d'un objet mobile en fonction des autres objets en interaction avec cet objet. Ces deux représentations permettent de représenter différemment les informations d'une même situation, ce qui favorise les visions complémentaires. Elles permettent une compréhension plus facile et plus intuitive des trajectoires et de l'interaction entre un objet mobile, son environnement et les objets mobiles à proximité. Les recherches actuelles dans le domaine des bases de données spatio-temporelles s'orientent vers des modélisations à base d'objets ou de contraintes afin de prendre en compte les différentes informations existantes, et utiles aux représentations et aux visualisations de trajectoires d'objets mobiles.

1.3.1.1 Modélisation à base d'objets

La modélisation d'objets mobiles à partir d'une approche orientée objet aborde la position des objets mobiles par une fonction temporelle [Sistla et al., 1997]. Ce modèle, nommé Moving Objects Spatio-Temporal (MOST), est utilisé pour des bases de données contenant des entités spatiales dynamiques. Il permet les requêtes portant sur les changements. Un attribut dynamique est défini par trois sous-attributs : la valeur, la date de la dernière mise à jour et une fonction. Le dernier attribut est une fonction d'une variable temporelle qui est nulle à $t = 0$ et s'incrémente avec le temps. La valeur résultante dépend du temps, elle est valide tant qu'une nouvelle mise à jour de la base de données n'est pas effectuée.

Dans le modèle développé par Güting, les objets sont définis par des types de données [Güting et al., 2000]. Les types de base sont les entiers, les réels, les booléens et les chaînes de caractères. Les données spatiales sont représentées par les types *point*, *points*, *ligne* et *région* qui sont respectivement définis par un point dans le plan euclidien, un ensemble de points, une union finie de courbes, et une union finie de faces. Le type *instant* représente un point dans le temps. Les types temporels sont définis par deux constructeurs : *moving* et *intime*. Le premier constructeur définit une fonction décrivant le développement temporel de la valeur associée à un type passé en paramètre de ce constructeur. Le second constructeur convertit un type donné en paramètre en une paire constituée de ce type et d'un instant. Le dernier type permet de faire un lien entre le domaine et l'image des fonctions définies dans les types temporels.

Des opérateurs sont définis à partir de ces types de données. Ces opérateurs sont les plus génériques possibles, ils sont consistants que les types des données soient temporels ou non. Des opérateurs sont définis pour les types non-temporels et pour les types temporels (tableaux 1.3 et 1.4). Les opérateurs sur les types non-temporels définissent notamment les relations topologiques entre deux objets qui peuvent être des points, des lignes ou des régions : *intersects*, *inside*, *touche*, *overlaps* par exemple. Les opérateurs peuvent avoir une surcharge de leur définition. Par exemple, l'opérateur *distance* est défini plusieurs fois suivant le type des entités qui sont passées en paramètre. Les opérateurs sur les types temporels sont définis sur les instants et les intervalles de temps et adaptent les opérateurs sur les types non-temporels aux objets mobiles. Ils sont utilisés dans les langages de requêtes afin de répondre à des problèmes spatio-temporels.

Tableau 1.3 — Opérateurs sur les types non-temporels selon Güting [Güting et al., 2000]

Classes	Opérateurs
Prédicat sur des objets	isempty
	=, ≠, intersects, inside
	<, ≤, ≥, >, before
Ensemblistes	touche, attached, overlaps, on_border, in_interior
	intersection, union, minus
	crossings, touch_points, commun_border
Agrégation	min, max, avg, center, single
Numériques	no_components, size, perimeter, duration, length, area
Distance et Direction	distance, direction
Type de base	and, or, not

1.3.1.2 Modélisation à base de contraintes

Dans les modèles à base de contraintes, les données sont représentées comme des objets mathématiques [Mokhtar et al., 2002]. Dans le cas des objets mobiles, les trajectoires, la direction et la vitesse sont des propriétés utilisées par ces modèles. Ces propriétés sont manipulées par des contraintes linéaires. Des exemples de contraintes linéaires sur les nombres réels sont les prédicats d'égalité, d'ordre et d'addition.

Tableau 1.4 — Opérateurs sur les types temporels selon Güting [Güting et al., 2000]

Classes	Opérateurs
Projection Domaine/Image	deftime, rangevalues, locations, trajectory routes, traversed, inst, val
Interactions entre Domaine et Image	at_instant, at_periods, initial, final, present at, atmin, atmax, passes
Quand	when
Adaptation aux objets mobiles	opérateurs non-temporels
Dérivées	derivative, speed, turn, velocity

Mokhtar propose un modèle où les positions des points mobiles sont représentées par une fonction linéaire ou linéaire par morceau ayant comme paramètre le temps et comme résultat un espace à n dimensions [Mokhtar et al., 2002]. Une trajectoire est définie comme une fonction continue linéaire par morceau de $\mathbb{R}$ dans $\mathbb{R}^n$. La trajectoire d'un avion dans un espace en trois dimensions peut être définie par :

$$\begin{aligned}
& \tau = (2, -1, 0)t + (-40, 23, 30) \wedge 0 \leq t \leq 21 \\
\vee \quad & \tau = (0, -1, -5)t + (2, 23, 135) \wedge 21 \leq t \leq 22 \\
\vee \quad & \tau = (0.5, 0, -1)t + (-9, 1, 47) \wedge 22 \leq t
\end{aligned}$$

En suivant cette trajectoire, l'avion se déplace vers le sud-est entre les instants 0 et 21, puis tourne à l'instant 21 en descendant puis tourne de nouveau à l'instant 22 en continuant à descendre.

Su se base sur les méthodes de la géométrie différentielle afin de proposer un modèle pour les objets mobiles [Su et al., 2001]. Un point mobile en dimension n est une fonction du type $P : time \rightarrow point_n$ qui peut être représentée par un vecteur $P(t) = (p_1(t), \dots, p_n(t))$ qui satisfait les conditions suivantes :

- pour chaque $1 < i < n$, p_i est continue dans le temps
- il existe un entier m et m instants $t_1 < t_2 < \dots < t_m$ tel que pour chaque $1 < i < n$

$$p_i|_{(-\infty, t_1)} \text{ et } p_i|_{(t_m, \infty)} \text{ sont infiniment différentiables et}$$

pour chaque $1 < j < m - 1$, $p_i|_{(t_j, t_{j+1})}$ sont infiniment différentiables.

Le vecteur vitesse de l'objet mobile $vel(P)$ correspond à la dérivée de P et le vecteur d'accélération $acc(P)$ est défini par la dérivée de la vitesse. La direction, la vitesse d'un objet et la distance entre deux objets mobiles sont respectivement définies par :

$$dir(P) = \frac{vel(P)}{\|vel(P)\|} \quad (1.1)$$

$$\|vel(P)\| \quad (1.2)$$

$$dist(P, Q) = \|P - Q\| \text{ (Distance Euclidienne)} \quad (1.3)$$

Avec ces définitions, dix-huit relations de base entre les différents objets sont définies et groupées dans douze classes. Ces relations sont binaires et s'appliquent à deux objets mobiles

ou à un objet mobile et un objet statique (tableau 1.5). Les objets mobiles sont représentés par des points et les objets stationnaires sont représentés par des régions. Leurs relations sont basées sur les relations topologiques des objets. Une région est donc définie par un intérieur, une frontière et un extérieur.

Tableau 1.5 — Relations entre les objets selon Su [Su et al., 2001]

1 objet mobile et	Position		Vitesse		Accélération	
1 objet mobile	collision, distless- than	catching- up	opp-dir, closer	collision- course	meet	approa- ching
1 objet stationnaire	in, on- line, distless- than	stays-in	enter, aim-at, closer	toward	land	approa- ching
temps	instant	intervalle	instant	intervalle	instant	intervalle

1.3.2 Langages de manipulation

1.3.2.1 Langage sur les modélisations à base d'objets

Le langage Futur Temporal Logic (FLT) développé par Sistla est une extension qui peut être utilisée à partir de SQL ou d'OQL, il définit des opérateurs temporels sur les objets mobiles [Sistla et al., 1997]. Les requêtes sont classées en trois catégories : les requêtes instantanées, les requêtes continues et les requêtes persistantes. Ces requêtes s'appliquent au modèle MOST précédemment introduit. Les requêtes instantanées sont les requêtes des bases de données classiques étendues aux bases de données spatio-temporelles. Une requête instantanée est un prédicat sur l'état courant de la base de données et peut faire référence à un instant ou à un intervalle de temps présent ou futur. Par exemple, la requête Q_1 liée au prédicat : “Donner la liste de tous les hôtels à moins de 5 km de ma position” exprime implicitement la valeur temporelle du prédicat, c'est-à-dire l'instant présent (figure 1.9(a)). Dans le cas d'une requête sur un intervalle de temps futur, le résultat peut être fini ou infini. Le résultat de la requête Q_2 : “Donner la liste de tous les hôtels que je vais croiser dans les 3 prochaines minutes” est donné après un intervalle de temps fini et borné. Le résultat de la requête Q_3 : “Donner la liste de tous les hôtels que je vais croiser et les heures correspondantes” n'est pas donné, le temps d'exécution de la requête est infini, aucune condition d'arrêt n'étant précisée dans le prédicat. Une requête continue est une séquence de requêtes instantanées posées à chaque instant (figure 1.9(b)). Tant que l'objet mobile est en mouvement, le résultat est révisé à chaque instant. Il n'est donc pas infini comme dans le cas de la requête Q_3 , la condition d'arrêt étant l'absence de mouvement de l'objet. Les requêtes persistantes sont des séquences de requêtes instantanées qui sont évaluées à chaque instant $t' > t$ où une mise à jour des données est effectuée (figure 1.9(c)). Ce type de requête implique la gestion d'un historique des localisations des objets mobiles entre l'instant où la requête est posée et le résultat de la requête. Afin de répondre aux différentes requêtes définies, Sistla propose deux opérateurs temporels : *Until* et *Nexttime*. Avec le premier opérateur g *Until* f est valide à un instant si et seulement si : g est valide à cet instant et g est valide à l'instant suivant et g est valide tant que f est continu. De même, *Nexttime* f est valide si et seulement si f est valide à l'instant

futur suivant.

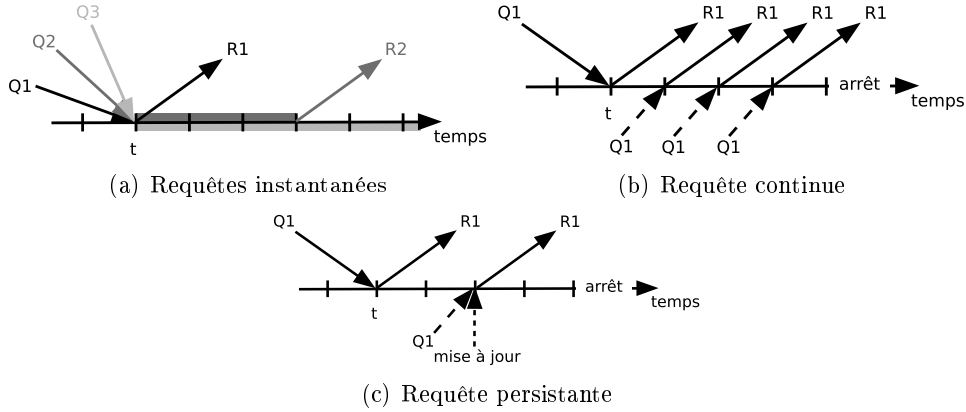


Figure 1.9 — Différentes requêtes du langage FLT [Sistla et al., 1997]

Dans le modèle développé par Güting, les types de données et les opérateurs définis peuvent être utilisés avec différents langages existants. Par exemple, en utilisant le langage SQL, la requête Q_4 : “A quel instant et à quelle distance, l’avion LH numéro 257 passe au plus proche de la tour Eiffel” est définie par : la création de la fonction *closest*, la recherche de l’élément “Tour Eiffel” et de l’instant et de la distance entre l’avion et la tour. Cette requête se décompose en l’expression suivante :

```

LET closest = FUN(mp : mpoint, p : point)
    atinstant(mp, inst(initial(atmin(distance(mp, p)))));
LET avion257 =
    ELEMENT(SELECT route FROM flight WHERE airline = "LH" and no = 257);

LET Tour =
    ELEMENT(SELECT pos FROM site WHERE name = "Tour Eiffel");
LET passage = closest(avion257, Tour);
inst(passage);
distance(Tour, val(passage));

```

1.3.2.2 Langages à contraintes

Les langages spatio-temporels à contraintes ont été développés afin d’exprimer mathématiquement les requêtes spatiales et temporelles, ils s’appliquent généralement à une base de données à contraintes. En considérant une base de données D , une requête Q , une séquence de mise à jour de la base de données Δ et un objet o , l’expression $o \in Q(D)$ est valide lorsque pour toute séquence Δ , $o \in Q(\Delta D)$ et la réponse valide à la requête est : $Q^v(D) = \{o | o \in Q(D) \text{ et } o \text{ est valide}\}$.

Mokhtar utilise ce langage afin de décrire des requêtes passées, futures et continues [Mokhtar et al., 2002]. Les requêtes sont définies sous la forme d’un triplet contenant un objet pouvant être variable, une trajectoire et un prédicat. Par exemple, la requête Q_5 : “Quels

sont les objets qui sont passés dans la zone Z entre les instants t_1 et t_2 ” est décomposée en plusieurs requêtes pour chaque objet de la base telle que “L’objet O_1 est-il passé dans la zone Z entre les instants t_1 et t_2 ”. Le résultat des requêtes est l’ensemble des objets qui répondent au prédicat. Les requêtes passées font référence à un état passé avant l’instant t de l’expression de la requête, et sont définies par la contrainte $Q(D) = Q^v(D)$, les mises à jour futures ne pouvant pas changer le résultat de la requête. Pour la requête Q_5 appliquée à une base de données où trois objets et leurs trajectoires sont sauvegardées, le résultat de la requête, lorsque t_1 et t_2 sont antérieurs à t est l’ensemble des objets O_1 et O_3 (figure 1.10(a)). Les requêtes futures sont posées à l’instant t tel que $t < t_1 < t_2$ et sont définies par la contrainte : $Q(D) \neq Q^v(D)$ et $Q^v(D) = \emptyset$. Le résultat de la requête est donné, lorsque les mises à jour de la base apportent des informations sur les objets entre les instants t_1 et t_2 (figure 1.10(b)). Enfin, les requêtes continues sont posées à l’instant t tel que $t_1 < t < t_2$ et sont définies par $Q(D) \neq Q^v(D)$ et $Q^v(D) \neq \emptyset$. Le résultat est alors partiellement connu (figure 1.10(c)).

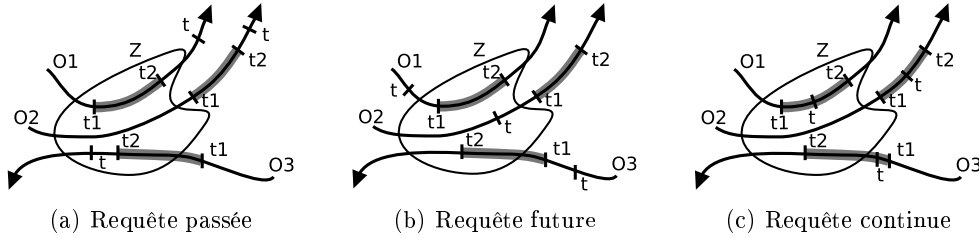


Figure 1.10 — Requêtes passées, futures et continues [Mokhtar et al., 2002]

A partir des relations que Su a développées dans son modèle, des requêtes prenant en compte les vitesses et les accélérations peuvent être posées et résolues par un langage à contraintes [Su et al., 2001]. Par exemple, la requête Q_6 : “Donner la liste des paires d’avions qui sont actuellement à moins de 300 miles de l’aéroport de San Francisco, qui ont une direction opposée et dont la vitesse augmente” a comme résultat l’ensemble défini par l’ensemble des contraintes suivantes :

- soit deux avions
- soit l’aéroport nommé San Francisco noté SFO
- la direction de déplacement des avions est opposée
- les avions sont à moins de 300 miles de l’aéroport de San Francisco.

Le résultat est décrit par l’ensemble suivant :

$$\begin{aligned}
 \{(a_1, a_2) | & \exists PQx_1x_2rp \text{ } FLIGHTS(x_1, a_1, P) \wedge FLIGHTS(x_2, a_2, Q) \\
 & \wedge AIRPORTS(SFO, CA, r) \wedge opposite_direction(P, Q, t_{now}) \\
 & \wedge r(p) \wedge \exists y_1y_2y_3 \text{ } P(t_{now}; y_1, y_2, y_3) \wedge len(p - (y_1, y_2)) \leq 300 \\
 & \wedge \exists z_1z_2z_3 \text{ } Q(t_{now}; z_1, z_2, z_3) \wedge len(p - (z_1, z_2)) \leq 300\}
 \end{aligned}$$

1.3.3 Index spatio-temporels

Pour répondre efficacement aux requêtes spatio-temporelles, des index spatio-temporels sont développés. Les index spatio-temporels doivent permettre l’exécution de requêtes telles que : “Trouver les objets qui croisent une zone A à un instant t ”, “Trouver les objets qui

croisent une zone A entre $[t_0, t_1]$ ”, ou encore “Quelle est la vitesse maximale de l’objet O dans l’heure qui s’est écoulée”. Ils peuvent être classés dans deux catégories : indexation des données spatio-temporelles passées et indexation des données spatio-temporelles présentes et futures [Mokbel et al., 2003] [Guting et Schneider, 2005].

1.3.3.1 Indexation du passé

L’indexation des données spatio-temporelles passées doit permettre d’accéder à l’historique du mouvement d’objets mobiles, c’est-à-dire aux trajectoires. Ces données sont par nature en continuelle augmentation. Deux approches sont utilisées pour diminuer la taille de l’historique de ces données : seul un échantillon des positions est mis en mémoire et une interpolation linéaire est utilisée pour recréer les données entre les positions de l’échantillon ; l’objet transmet alors les données que lorsque celles-ci ont changé (vitesse ou direction par exemple) [Pakalnis, 2007].

Les structures se basant sur un arbre RT se fondent sur une indexation spatiale des données avec une intégration de la dimension temporelle [Xu et al., 1990]. Les objets mobiles qui ont modifié une de leurs données entre les instants t_i et t_{i+1} créent de nouveaux noeuds dans l’arbre. Cet arbre est construit à partir de la structure d’index spatial de l’arbre R [Guttman, 1984] et sur la structure d’index temporel de l’arbre TSB [Lomet et Salzberg, 1989]. L’arbre R_0 représentant la subdivision de l’espace à l’instant t_0 est défini par un arbre R (figure 1.11). Le déplacement de l’objet B modifie la subdivision de l’espace, à l’instant t_1 un nouvel arbre R_1 où les subdivisions qui ne sont pas modifiées sont liées aux feuilles de l’arbre R_0 , et où les subdivisions modifiées sont stockées (subdivisions 1, 3 et 4) (figure 1.11(c)).

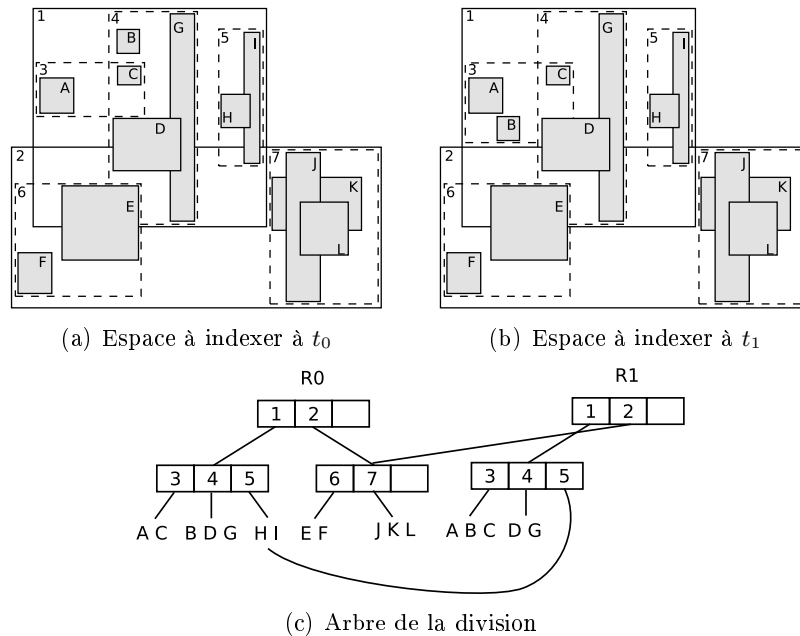


Figure 1.11 — Indexation de données spatio-temporelles passées [Xu et al., 1990]

Sur le même principe que l’arbre RT , l’arbre STR est une extension de l’arbre R où les

trajectoires sont capturées dans des parallélogrammes basés sur les REM afin qu'elles se déplacent d'un des angles vers l'angle opposé pour diminuer l'espace mort* [Pfoser et al., 2000]. Les informations stockées représentent alors l'identifiant de l'objet, le numéro de la portion de la trajectoire, le REM et l'orientation de la trajectoire.

1.3.3.2 Indexation du présent et du futur

Afin de prédire les positions futures d'objets mobiles ponctuels, les informations comme le vecteur vitesse ou la destination de l'objet mobile lorsque cette dernière est connue sont stockées. Les positions futures peuvent alors être calculées tant que le vecteur vitesse n'est pas modifié. Une trajectoire est représentée linéairement par un ensemble de fonctions paramétriques définies pour un vecteur vitesse donné [Sistla et al., 1997]. L'indexation des positions futures correspond alors à l'indexation de segments de droite représentant chaque dimension. Les *PMR*-quadtrees organisent ces segments de droite en utilisant une division spatiale des segments de droite par des quadtrees [Tayeb et al., 1998].

Une seconde solution d'indexation des trajectoires passe par l'utilisation d'un espace autre que le domaine espace-temps. Kollios [Kollios et al., 1999] et Agarwal [Agarwal et al., 2000] utilisent un espace dual. Dans cet espace, un segment de droite défini sous la forme $x = a*t + b$ est représenté par un point dont les coordonnées sont (a, b) . Pour Chon, une trajectoire est définie par quatre coordonnées qui représentent : la position initiale, la destination, l'instant de la position initiale et la vitesse initiale [Chon et al., 2002]. Porkaew propose une solution où un arbre R est utilisé pour indexer un espace (x, y, t) par un arbre de cinq dimensions [Porkaew et al., 2001]. Les deux premières dimensions de l'arbre représentent la position de l'objet mobile, les deux suivantes les coordonnées du vecteur vitesse et la dernière le temps. Pour une position et un vecteur vitesse donnés, un intervalle de temps est indexé dans l'arbre. L'intervalle de temps d'existence de l'objet mobile n'est donc pas connu, il correspond à l'union de tous les intervalles de temps de l'arbre pour cet objet.

Dans une troisième solution, les trajectoires sont indexées en utilisant des rectangles paramétriques qui prennent en compte les déplacements futurs des objets mobiles via leur vecteur vitesse. Toutes ces méthodes d'indexation se basent sur l'arbre *TPR* développé par Šaltenis [Šaltenis et al., 2000] : l'arbre *PR*, l'arbre *NSI*, l'arbre *R VCI*, l'arbre *STAR*, l'arbre *R^{EXP}* ou encore l'arbre *TPR** [Cai et Revesz, 2000] [Porkaew et al., 2001] [Prabhakar et al., 2002] [Procopiuc et al., 2002] [Šaltenis et Jensen, 2002] [Tao et al., 2003]. L'arbre *TPR* définit des REM pour les objets à l'instant de référence et sa taille se modifie avec la prise en compte des vecteurs vitesse des objets qu'il inclut pour les instants suivants. A l'instant de référence t_0 , la subdivision de l'espace est définie afin que les objets les plus proches soient regroupés mais sans la prise en compte des vecteurs vitesse des objets, et à l'instant t_1^{**} , les REM ne sont plus minimaux (figure 1.12(a)). Lorsque les vecteurs vitesse sont pris en compte, les REM à l'instant t_0 sont plus grands que sans la prise en compte des vecteurs vitesse mais ils sont minimaux à l'instant t_1 (figure 1.12(b)).

1.3.4 Visualisations de trajectoires d'objets mobiles

De nouvelles représentations et visualisations sont développées pour représenter des données de trajectoires spatio-temporelles. Ces trajectoires sont représentées afin de compléter

*Un espace mort indique la taille de l'espace inoccupé par l'objet dans son REM.

** t_1 est dans le futur.

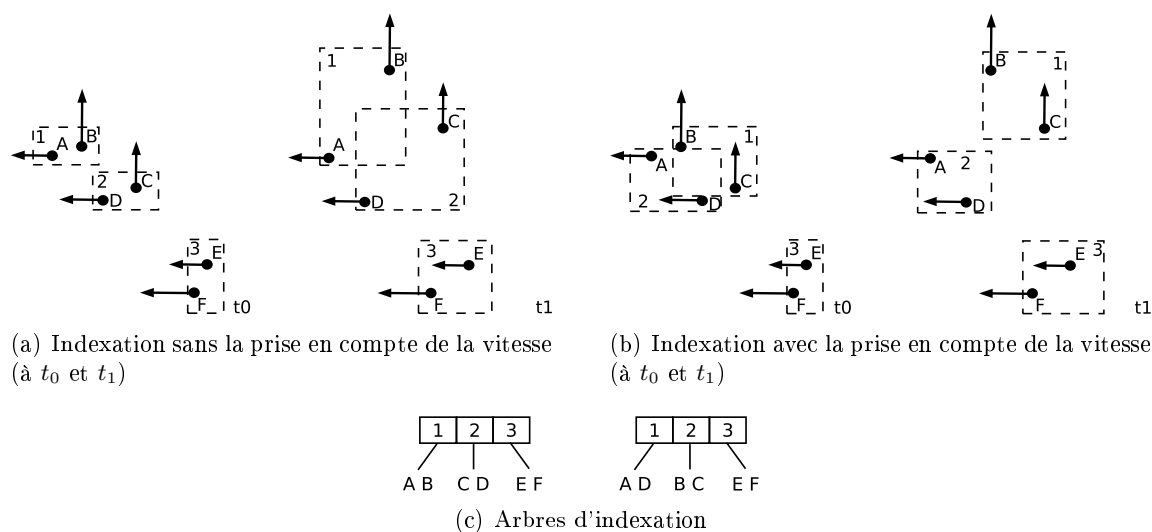


Figure 1.12 — Indexation de données spatio-temporelles présentes et futures [Šaltenis et al., 2000]

les représentations absolues existantes et permettent d'analyser des comportements à partir de données différentes des positions absolues.

1.3.4.1 Visualisation de trajectoires selon Imfeld

Le contexte applicatif de la thèse de Imfeld est le déplacement d'animaux dans les milieux naturels [Imfeld, 2000]. Ces animaux sont représentés par des points mobiles, l'acquisition des données est réalisée via la radiotélémétrie et la télémétrie satellitaire. Le principe de sa représentation est la réduction des aspects spatiaux à une seule dimension pour une prise en compte de la dimension temporelle dans un espace résultant à deux dimensions. La projection de l'espace dans une dimension est réalisée par le calcul de la dimension spatiale choisie entre deux points mobiles à chaque instant. Cette méthode permet de mettre en évidence la régularité ou les irrégularités des données. Imfeld a défini plusieurs versions de son modèle : Time-plots (T-plots) représente dans un tableau à une dimension une donnée spatiale, TT-plots qui dans un tableau matriciel représente une donnée spatiale calculée avec en entrée de la matrice deux instants.

T-plots se résume à un axe pour le temps et un axe pour la dimension spatiale. Différentes données spatiales peuvent être représentées :

- représentation d'un caractère spatial existant : soit l'abscisse du déplacement, alors l'axe des ordonnées représente le temps ; soit l'ordonnée du déplacement est représentée et l'axe des abscisses représente le temps. Une troisième opération permet de représenter les déplacements avec l'axe des abscisses qui représente le temps et l'axe des ordonnées les déplacements suivant l'angle de vue de l'observateur (figure 1.13).
- représentation des dérivées des données spatiales : la vitesse de l'objet mobile est représentée dans le temps. L'axe des abscisses représente le temps et l'axe des ordonnées représente la vitesse.
- représentation du changement de la distribution spatiale des données en se basant sur

l'utilisation de deux ensembles de données d'acquisition.

Le déplacement d'un animal sur une ligne avec une représentation absolue des positions peut être décrit par l'évolution des coordonnées dans le temps (figure 1.13). Ces visualisations révèlent des phases homogènes ou des particularités dans les mouvements. Le déplacement observé dans les figures 1.13(b) et 1.13(c) présente une régularité dans l'évolution des abscisses et des ordonnées dans le temps. Cette présentation permet alors de détecter les tendances dans les déplacements des animaux.

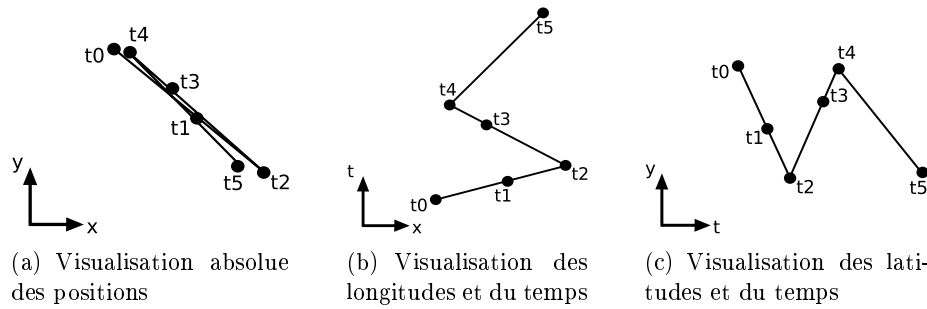


Figure 1.13 — Visualisation d'un déplacement selon Imfeld [Imfeld, 2000]

La représentation TT-plot consiste à projeter deux données spatiales et une donnée temporelle vers une représentation en trois dimensions en calculant la matrice de distance entre les événements et en ajoutant deux axes temporels (figure 1.14). Il suffit de créer une matrice de distance euclidienne entre chaque point et tous les autres points pour chaque instant. Les axes des abscisses et des ordonnées représentent le temps et le troisième axe représente la distance entre les points. Pour représenter la troisième dimension, la couleur est utilisée suivant si la distance est grande, moyenne ou petite (respectivement rouge, verte et bleue). Le résultat est symétrique par rapport à la diagonale passant par les points (t_0, t_0) , (t_1, t_1) , (t_2, t_2) et (t_3, t_3) . Quand la matrice est calculée, une interpolation des distances est effectuée afin de visualiser des surfaces. Une seconde représentation de TT-plot possible est le calcul du parallélisme (différence des directions) entre le premier point et les autres points et ainsi de suite pour les points suivants. Le résultat est entre 0 et 180 degrés.

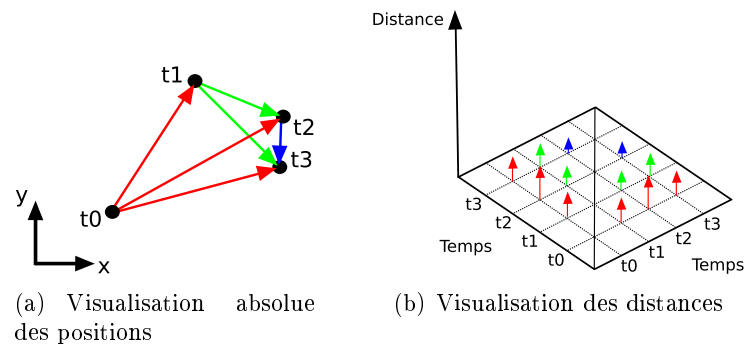


Figure 1.14 — Visualisation des distances dans un déplacement selon Imfeld [Imfeld, 2000]

1.3.4.2 QTC (Qualitative Trajectory Calculus)

Van de Weghe introduit dans sa thèse une nouvelle représentation qualitative des trajectoires en prenant notamment en considération la distance entre deux objets mobiles et la vitesse de ces objets [Van De Weghe, 2004]. Le modèle défini représente les relations entre deux objets mobiles distincts représentés par des points et dont les déplacements se font sur une seule dimension. Qualitative Trajectory Calculus (QTC) représente ces relations pour un instant donné. La figure 1.15 présente deux points mobiles A et B ayant respectivement pour vecteur vitesse $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_B$.

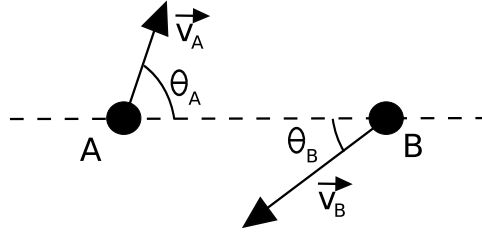


Figure 1.15 — Présentation d'une situation à un instant t

Dans la version la plus complète de QTC, un ensemble de six valeurs représente une situation :

- le mouvement de l'objet A en fonction de la position de l'objet B : si le vecteur projeté de $\vec{v}_A$ sur le segment $[AB]$ a la même direction que le vecteur $\overrightarrow{AB}$ alors le résultat est -, si le projeté est un vecteur nul alors le résultat est 0 et si le projeté a une direction inverse au vecteur $\overrightarrow{AB}$ alors le résultat est +. Dans la figure 1.15, le projeté du vecteur vitesse de A a la même direction que le vecteur $\overrightarrow{AB}$ donc le résultat est -.
- le mouvement de l'objet B en fonction de la position de l'objet A : si le vecteur projeté de $\vec{v}_B$ sur le segment $[AB]$ a la même direction que le vecteur $\overrightarrow{BA}$ alors le résultat est -, si le projeté est un vecteur nul alors le résultat est 0 et si le projeté a une direction inverse au vecteur $\overrightarrow{BA}$ alors le résultat est +. (dans la figure, le résultat est -)
- le placement du vecteur vitesse de l'objet A par rapport à la droite (AB) : avec l'angle de vue placé en A dans la direction de B , si le vecteur est à gauche de la droite (AB) alors le résultat est -, si le vecteur est à droite de la droite (AB) alors le résultat est + et si le vecteur est sur la droite (AB) , alors le résultat est 0. (pour la figure le résultat est -)
- le placement du vecteur vitesse de l'objet B par rapport à la droite (AB) : avec l'angle de vue placé en B dans la direction de A , si le vecteur est à gauche de la droite (AB) alors le résultat est -, si le vecteur est à droite de la droite (AB) alors le résultat est + et si le vecteur est sur la droite (AB) , alors le résultat est 0. (pour la figure le résultat est -)
- la différence des normes des vitesses : si la norme du vecteur vitesse de l'objet A est plus petite que la norme du vecteur vitesse de l'objet B ($\|\vec{v}_A\| < \|\vec{v}_B\|$) alors le résultat est -, si $\|\vec{v}_A\| > \|\vec{v}_B\|$ alors le résultat est + et si $\|\vec{v}_A\| = \|\vec{v}_B\|$, le résultat est 0. (dans la figure, le résultat est -)
- la différence des angles créés par les vecteurs vitesse et la droite (AB) : si l'angle $\theta_A = (\vec{v}_A, \overrightarrow{AB})$ est plus petit que l'angle $\theta_B = (\vec{v}_B, \overrightarrow{BA})$ alors le résultat est -, si l'angle

$\theta_A > \theta_B$, alors le résultat est + et si les angles sont égaux, le résultat est 0. (dans la figure, le résultat est +).

Ces valeurs sont résumées dans le tableau 1.6. Sept cent vingt neuf états (six-uplet) différents et possibles sont définis mais seulement 305 sont réalisables. La situation de la figure 1.15 est représentée dans QTC par le six-uplet $(- - - - - +)$.

Tableau 1.6 — Lien entre les valeurs et les processus du six-uplet [Van De Weghe, 2004]

Valeurs	Processus
$\{+, 0, -\}$	Déplacement futur de A par rapport à B
$\{+, 0, -\}$	Déplacement futur de B par rapport à A
$\{+, 0, -\}$	Placement de $\vec{v}_A$ par rapport à (AB)
$\{+, 0, -\}$	Placement de $\vec{v}_B$ par rapport à (AB)
$\{+, 0, -\}$	Signe de $\ \vec{v}_A\ - \ \vec{v}_B\ $
$\{+, 0, -\}$	Signe de $(\vec{v}_A, \overrightarrow{AB}) - (\vec{v}_B, \overrightarrow{BA})$

Pour représenter une trajectoire, un ensemble de représentations est identifié à chaque changement de situation. Ces situations sont liées par des flèches qui donnent le sens de lecture. Par exemple, le déplacement des objets A et B dont les vecteurs vitesse sont inchangés entre les instants t_0 et t_4 de la figure 1.16 est respectivement représenté dans QTC par l'ensemble des six-uplets : $\{(- - - - - +) \rightsquigarrow (0 - - - - +) \rightsquigarrow (+ - - - - +) \rightsquigarrow (+0 - - - +) \rightsquigarrow (+ + - - - +)\}$

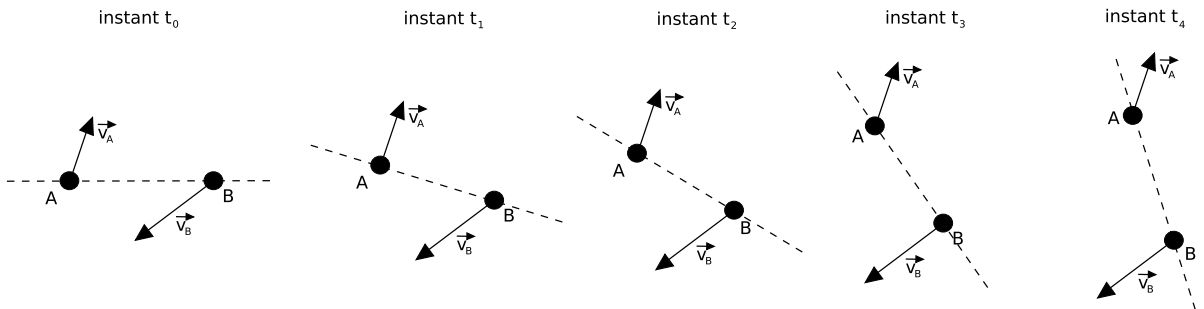


Figure 1.16 — Déplacement de deux objets mobiles selon [Van De Weghe, 2004]

Les changements d'états sont représentés graphiquement sur un diagramme où chaque état est visualisé. Ces changements étant continus, Van de Weghe montre par la théorie de la dominance définie par Galton [Galton, 1995b] que le passage d'un état - à un état + n'est possible que par le passage par l'état intermédiaire 0 [Van De Weghe et Maeyer, 2005]. Dans l'exemple de la figure 1.17(a), et pour des raisons de clarté, seuls les neuf états différents relatifs aux deux premiers éléments du six-uplet sont visualisés (les changements de distance). Pour représenter les six valeurs, six dimensions sont nécessaires dans le diagramme. Les déplacements sont donc représentés par des flèches joignant les différents états entre eux et les instants

auxquels les différents états étaient atteints. La figure 1.17(b) représente les changements de distance entre les objets A et B de la figure 1.16.

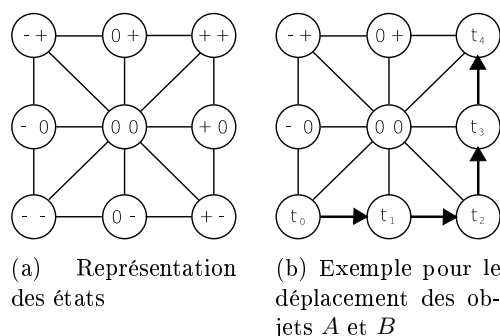


Figure 1.17 — Représentation graphique des changements de distance possibles entre deux objets mobiles [Van De Weghe et Maeyer, 2005]

Cette représentation graphique est aussi utilisée dans le cas de l'évolution de relations entre plus de deux objets. Ces relations étant définies entre deux objets, les noms des objets sont ajoutés à la représentation, par exemple pour les objets A et B , la notation serait $AB : t_0$ dans l'état $--$.

1.4 Discussion

Les principes relatifs à la cognition spatiale, la géographie naïve et le raisonnement spatial aident à développer de nouvelles représentations spatiales pour aider à la compréhension et à l'analyse de phénomènes géographiques. Ces principes constituent des éléments fondamentaux pour le développement de nouvelles représentations spatio-temporelles adaptées à la complexité des phénomènes géographiques.

Afin d'utiliser les informations fournies par des systèmes de géolocalisation, les objets mobiles sont les éléments de base d'une démarche de modélisation. Les informations indispensables à cette modélisation des objets mobiles et de leurs déplacements sont pour l'essentiel les positions et les vecteurs vitesse de ces objets. Les modèles de représentation et de visualisation actuellement utilisés dans les SIG adoptent pour l'essentiel les approches absolues et quantitatives. Un grand nombre de travaux sont en particulier orientés vers les langages de manipulation et les structures physiques [Güting et al., 2000] [Sistla et al., 1997]. De nouvelles représentations et visualisations des trajectoires sont actuellement envisagées [Su et al., 2001] [Imfeld, 2000] [Van De Weghe, 2004]. Le modèle proposé par Su prend notamment en compte la vitesse, la position, et l'accélération d'un objet mobile, et permet d'exprimer des requêtes mais n'inclut pas une visualisation qualitative des données. La représentation et les techniques de visualisation des déplacements proposés par Imfeld ont pour objectif essentiel de faire émerger des tendances générales ou des particularités d'un système pris dans sa globalité, mais pas les caractéristiques locales et relatives d'une trajectoire. La représentation et la visualisation de Van De Weghe utilise les informations sur la position et le vecteur vitesse des objets mobiles, mais n'est pour l'instant essentiellement appliquée qu'aux déplacements de deux objets mobiles disjoints représentés par deux points mobiles.

Afin de compléter les représentations actuelles, nous retenons le point de vue relatif d'un

objet en mouvement, considéré comme observateur ou acteur d'une situation donnée. Ce point de vue permet de situer un observateur ou un acteur dans son environnement, et de percevoir sa trajectoire et celles des objets environnants. Un modèle relatif des trajectoires devrait permettre de mieux apprécier et appréhender les informations émergentes d'un système dynamique en offrant un point de vue complémentaire aux visions absolues et quantitatives. Cette complémentarité est indispensable dans la mesure où la représentation absolue conserve des informations pertinentes comme celle des orientations des trajectoires, et de la perception globale de la dynamique d'un environnement. Nous proposons donc de compléter ces représentations absolues et quantitatives par une démarche de modélisation relative des trajectoires d'un objet mobile afin d'en améliorer leur perception et leur compréhension.

En prenant le point de vue d'une représentation relative, les facteurs essentiels à l'anticipation des changements permettent de gérer l'évolution d'une trajectoire et l'interaction d'un objet mobile avec son environnement. La relation d'un objet mobile avec son environnement doit pouvoir s'appréhender par la position relative des objets composant son voisinage, et l'évolution des caractéristiques de sa trajectoire. A travers la construction de ce modèle, il nous faudra montrer que les positions et les vitesses relatives de ces objets constituent des caractéristiques pertinentes pour une vision dynamique de l'environnement. Un autre objectif de notre approche consiste à évaluer au delà des propriétés formelles, dans quelle mesure les configurations élémentaires de notre modèle sont compatibles avec les processus habituellement qualifiés par le langage naturel. Nous considérons que cette approche relative est potentiellement adaptée à une compréhension de l'évolution d'objets mobiles à partir d'une visualisation graphique qui devrait compléter les représentations spatiales existantes, tel est l'enjeu de la suite de notre recherche.

Chapitre 2

MODÈLE CONCEPTUEL

2.1 Introduction

Ce chapitre développe le modèle conceptuel de trajectoires géographiques, conçu comme un modèle de représentation relative complémentaire de la représentation géographique absolue généralement utilisée au sein des SIG. Ce modèle est basé sur des mesures de position relative et de vitesse relativisée qui se fondent respectivement sur une forme de distance topologique entre deux objets mobiles, et un différentiel des vecteurs vitesse de ces objets. La position relative est évaluée à partir d'une mesure de distance qualitativement pondérée par la relation topologique entre ces mêmes objets. La vitesse relativisée complète la mesure de position relative et permet de distinguer les objets plus rapides des objets moins rapides que l'objet de référence. Dans la suite du mémoire, nous utiliserons les termes suivants lors de la description de trajectoires :

*Un **Objet référent** est un objet mobile qui représente le point de vue de la configuration spatiale des trajectoires représentées.*

*Un **Objet cible** est un objet mobile dans le voisinage spatial de l'objet référent.*

La première partie de ce chapitre expose les objectifs de notre représentation conceptuelle de trajectoires géographiques. La seconde partie présente les notions topologiques utilisées par le modèle. Les deux dernières parties définissent respectivement la position relative et la vitesse relativisée.

2.2 Objectifs de la représentation

La représentation et la visualisation de trajectoires géographiques pour la gestion et l'aide à l'analyse dans un contexte de mobilité impliquent que les données spatiales soient représentées par des fonctions continues dans le temps (continuité de classe C^{1*}). Cette continuité des tra-

*Une fonction de classe C^1 est une fonction dérivable dont la dérivée est continue.

jectoires, nécessaire pour garantir une représentation et une visualisation fidèles, et facilement manipulables et compréhensibles, permet d'appréhender les trajectoires dans l'espace-temps, comme pour simuler un déplacement futur ou pour analyser les comportements passés des objets mobiles. Nous définissons la position relative d'un objet cible par rapport à un objet référent comme une mesure calculée à partir de la distance entre deux objets mobiles, qui distingue également la nature des relations topologiques entre ces objets afin de différencier les cas où l'objet cible est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'objet référent (et inversement). Cette prise en compte des relations topologiques doit permettre de distinguer les situations où l'un des objets mobiles cible est entièrement ou en partie à l'intérieur, est entièrement à l'extérieur, ou touche l'objet mobile référent. Une telle approche reprend implicitement l'importance des concepts méréotopologiques dans l'expression de cette position relative dans la mesure où elle distingue les situations topologiques les plus élémentaires et les plus significatives dans des environnements mobiles [Smith, 1996]. Cette prise en compte se traduit par une caractérisation des relations topologiques vis-à-vis de la totalité ou d'une partie de la représentation spatiale des objets mobiles. Notre objectif est donc de dériver, de la distance et des relations topologiques entre deux objets, une valuation de la position relative pour différencier qualitativement ces situations. L'intérêt de ce choix est illustré par l'existence de comportements différents lorsque les objets mobiles sont entièrement à l'extérieur de zones particulières, ou lorsque ces objets sont entièrement ou en partie dans ces zones, comme les zones portuaires où la vitesse maximale des navires est limitée.

La représentation du différentiel des vitesses permet, elle, de mettre en évidence les objets cibles plus rapides des objets cibles moins rapides que l'objet référent. Un changement de vitesse permet de distinguer, par exemple, une situation où deux objets se rapprochent en accélérant d'une situation où deux objets se rapprochent en décélérant. Dans le premier cas, une collision entre les deux objets mobiles représentés est plus probable que dans le second cas, où la diminution de la vitesse laisse présager un arrêt possible avant la collision.

Dans notre contexte d'étude, des représentations géographiques absolues et relatives sont donc utilisées pour présenter les trajectoires des objets mobiles dans leur environnement. Ce contexte donne un cadre où la perception de la dynamique de la vitesse et de la distance devrait enrichir les représentations spatiales existantes. Le modèle défini présente l'évolution des vitesses et des distances des objets d'un point de vue relatif sur une seule représentation géographique. Il est complémentaire des représentations actuelles où les positions dans l'environnement des objets mobiles permettent de percevoir les notions d'orientation absolue nord-sud [Frank, 1992] ou relative de type gauche-droite [Freksa, 1992b][Moratz et al., 2002][Zimmermann et Freksa, 1996], et les positions absolues entre les objets mobiles et les objets constituant leur environnement.

2.3 Représentation spatiale des objets

Nous considérons des objets mobiles dans un espace géographique à deux dimensions, définis comme des ensembles de points qualifiés dans la suite du mémoire selon [Worboys et Duckham, 2004] :

Un **Point** est un couple (a, b) de réels de $\mathbb{R}^2$.

Une **Droite** est un ensemble de points $\{\lambda a + (1 - \lambda)b \mid \lambda \in \mathbb{R}\}$ où a et b sont deux points distincts de $\mathbb{R}^2$.

Un **Segment de droite** est un ensemble de points $\{\lambda a + (1 - \lambda)b \mid \lambda \in [0, 1]\}$ où a et

b sont deux points distincts de $\mathbb{R}^2$.

Une **Polyligne** est un ensemble fini de segments de droite où chaque point extremum d'un segment de droite appartient au maximum à deux segments de droite de cet ensemble. Nous considérons dans notre modèle qu'une polyligne est un ensemble de points fermé et connexe* formant une figure de dimension une dans l'espace en deux dimensions.

Une polyligne simple est une polyligne sans boucle et une polyligne fermée est une polyligne où chaque point extremum d'un segment appartient à exactement deux segments de droite.

Nous considérons qu'une **Polyligne mobile** est une polyligne où chaque point est muni d'un vecteur vitesse identique.

Un **Polygone** est défini comme une région fermée par une polyligne simple fermée. Nous considérons dans notre modèle qu'un polygone est un ensemble de points fermé connexe, sans trou formant une figure de dimension deux dans un espace en deux dimensions.

Nous considérons qu'un **Polygone mobile** est un polygone où chaque point est muni d'un vecteur vitesse identique.

Notons qu'une polyligne mobile et un polygone mobile ne peuvent se déplacer que par translation et ne peuvent donc changer de forme dans la mesure où nous considérons que tous leurs points ont un vecteur vitesse identique, ce qui implicitement correspond à considérer des objets rigides. Un polygone peut être convexe** ou concave***. Un polygone est caractérisé par son intérieur, sa frontière et son extérieur, un point et une polyligne le sont seulement par leur frontière et leur extérieur tel que définis dans la topologie usuelle (section 1.2.2.1). Les relations topologiques entre les représentations spatiales des objets mobiles sont définies par les intersections entre leurs intérieurs (s'ils existent), leurs frontières et leurs extérieurs [Egenhofer et Franzosa, 1991]. L'un des objectifs du modèle est en effet de distinguer si un objet mobile cible est tout ou partie à l'intérieur de l'objet référent, tout ou partie à la frontière (et en partie à l'extérieur) de l'objet référent ou complètement à l'extérieur de l'objet référent. Trois relations topologiques du point de vue de l'objet référent sont prises en compte dans notre modèle : la disjonction, le toucher et l'intersection. L'objet référent et l'objet cible sont représentés par un polygone, une polyligne ou un point tels que définis par notre modèle.

Définition 1 : Disjonction

Soient A et B deux objets. A est l'objet référent et B est l'objet cible. B est disjoint de A lorsque B est entièrement à l'extérieur de A (figures 2.1, 2.2 et 2.3). Il est immédiat de noter que cette relation est symétrique et non-transitive. Plus formellement, nous distinguons les cas suivants qui représentent toutes les configurations possibles :

A est un polygone et B est un polygone (figure 2.1(a))

$$B \text{ est disjoint de } A \Leftrightarrow A^\circ \cap B^\circ = \emptyset \wedge \partial A \cap \partial B = \emptyset$$

* A est un ensemble connexe si topologiquement A n'est composé que d'une seule partie.

** A est convexe si et seulement si $\forall x, y \in A$, le segment $[x, y] \subset A$.

*** Dans la suite du rapport, les illustrations des polygones sont des polygones convexes mais elles s'appliquent aussi à des polygones concaves.

A est un polygone et B est une polyligne ou un point (figures 2.1(b) et 2.1(c)) (et inversement pour les figures 2.2(a) et 2.3(a))

$$B \text{ est disjoint de } A \Leftrightarrow A^\circ \cap \partial B = \emptyset \wedge \partial A \cap \partial B = \emptyset$$

A est une polyligne ou un point et B est une polyligne ou un point (figures 2.2(b), 2.2(c), 2.3(b) et 2.3(c))

$$B \text{ est disjoint de } A \Leftrightarrow \partial A \cap \partial B = \emptyset$$

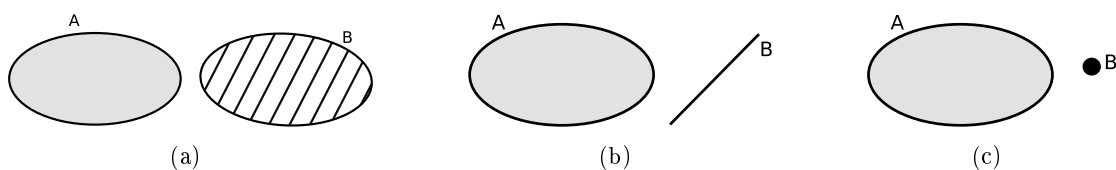


Figure 2.1 — B est disjoint de A et A est un polygone

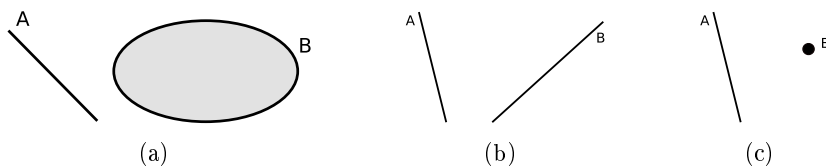


Figure 2.2 — B est disjoint de A et A est une polyligne

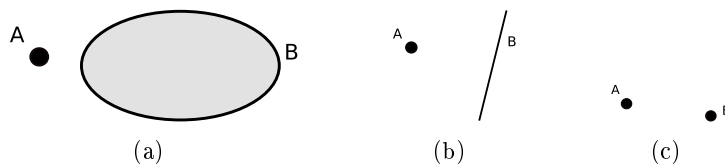


Figure 2.3 — B est disjoint de A et A est un point

Définition 2 : Toucher

Soient A et B deux objets. A est l'objet référent et B l'objet cible. Du point de vue de A , B touche A lorsque B est entièrement ou en partie à la frontière de A mais pas en partie à l'intérieur de A (figure 2.4, 2.5 et 2.6). Il est immédiat de noter que cette relation est symétrique et non-transitive. Plus formellement, nous distinguons les cas suivants qui représentent toutes les configurations :

A est un polygone et B est un polygone (figure 2.4(a))

$$B \text{ touche } A \Leftrightarrow A^\circ \cap B^\circ = \emptyset \wedge \partial A \cap \partial B = \neg \emptyset$$

A est un polygone et B est une polyligne ou un point (figures 2.4(b) et 2.4(c)) (et inversement pour les figures 2.5(a) et 2.6(a))

$$B \text{ touche } A \Leftrightarrow A^\circ \cap \partial B = \emptyset \wedge \partial A \cap \partial B = \neg \emptyset$$

A est une polyligne ou un point et B est une polyligne ou un point (figures 2.5(b), 2.5(c), 2.5(d), 2.6(b) et 2.6(c))

$$B \text{ touche } A \Leftrightarrow \partial A \cap \partial B = \neg \emptyset$$

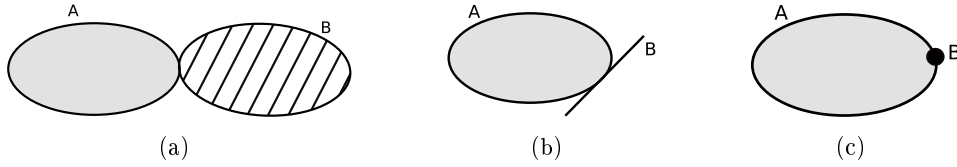


Figure 2.4 — B touche A et A est un polygone

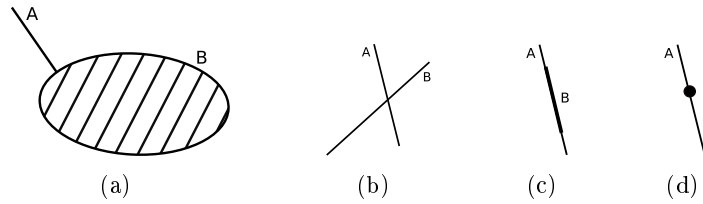


Figure 2.5 — B touche A et A est une polyligne

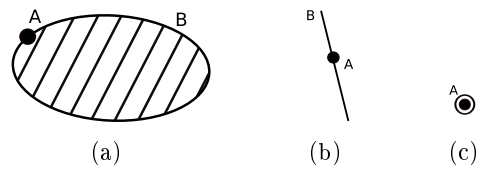


Figure 2.6 — B touche A et A est un point

Définition 3 : Intersection

Soient A et B deux objets. A est l'objet référent et B l'objet cible. B intersecte A lorsque B est entièrement ou en partie dans l'intérieur de A (A ou B est un polygone) (figure 2.7). Il est immédiat de noter que cette relation est symétrique et non-transitive. Plus formellement, nous distinguons les cas suivants qui représentent toutes les configurations possibles :

A est un polygone et B est un polygone (figures 2.7(a), 2.7(b) et 2.7(c))

$$B \text{ intersecte } A \Leftrightarrow A^\circ \cap B^\circ = \neg \emptyset$$

A est un polygone et B est une polyligne ou un point (figures 2.7(d) et 2.7(e)) (et inversement pour les figures 2.7(f) et 2.8)

$$B \text{ intersecte } A \Leftrightarrow A^\circ \cap \partial B = \neg \emptyset$$

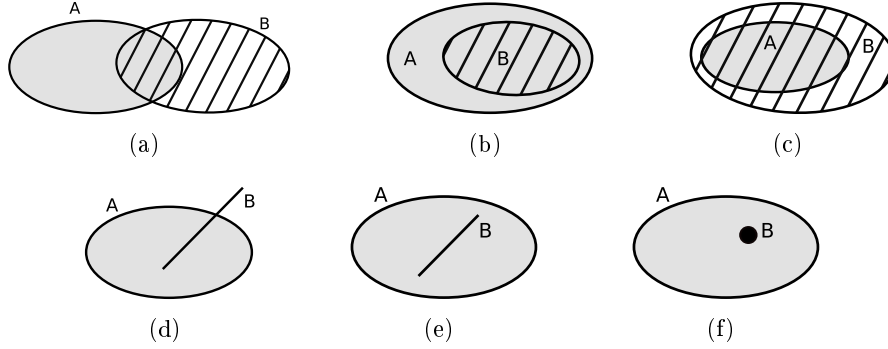


Figure 2.7 — B intersecte A et A est un polygone

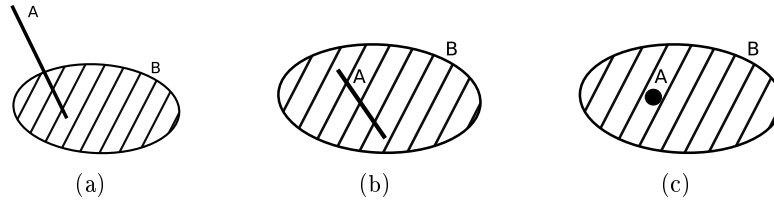


Figure 2.8 — B intersecte A et A est une polyligne ou un point

Les définitions des relations topologiques distinguent les trois situations topologiques d'un objet cible du point de vue d'un objet référent les plus élémentaires. La définition de l'intersection réunit les notions d'intersection totale et d'intersection partielle entre les deux objets. Les cas d'intersections entre deux polygones définis par Egenhofer dans [Egenhofer et Franzosa, 1991] : *contient*, *dans*, *égal*, *couvre*, *couvert par* et *chevauche* et les cas d'intersections définis par Clementini dans [Clementini et al., 1993] : *dans*, *égal*, *couvre* et *chevauche* sont généralisés dans la définition 3.

Ces définitions permettent de distinguer les situations où les objets ne sont pas connectés* des autres situations. Etant plus générales que les définitions exprimées dans les topologies d'Egenhofer [Egenhofer et Franzosa, 1991] et de Clementini [Clementini et al., 1993], elles permettent de caractériser les configurations que nous considérons élémentaires dans notre démarche de modélisation. Le tableau 2.1 reprend toutes les relations topologiques entre deux objets qui seront utilisées dans la suite du chapitre. Les matrices présentées se basent sur la matrice des intersections d'Egenhofer [Egenhofer et Franzosa, 1991] où les intersections non déterminantes ne sont pas représentées (notée $-$), et où le symbole $\perp$ est utilisé lorsqu'il n'existe pas de résultat comme par exemple lorsqu'il n'y a pas d'intérieur pour l'un des objets.

* A et B sont connectés si A contient un point proche de B et/ou B contient un point proche de A [Worboys et Duckham, 2004]

Tableau 2.1 — Relations topologiques entre les objets

	Polygone		Polyligne		Point	
Polygone	disjoint	$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
	touche	$\begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & - \\ \perp & - & - \end{pmatrix}$	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
	intersecte	$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}$	intersecte	$\begin{pmatrix} \perp & \neg\emptyset & - \\ \perp & - & - \\ \perp & - & - \end{pmatrix}$	intersecte	$\begin{pmatrix} \perp & \neg\emptyset & - \\ \perp & - & - \\ \perp & - & - \end{pmatrix}$
Polyligne	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \emptyset & \neg\emptyset & - \\ \neg\emptyset & - & - \end{pmatrix}$	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \neg\emptyset & - \\ \perp & - & - \end{pmatrix}$	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \neg\emptyset & - \\ \perp & \emptyset & - \end{pmatrix}$
	intersecte	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \neg\emptyset & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}$				
Point	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	disjoint	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \emptyset & \neg\emptyset \\ \perp & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$
	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \neg\emptyset & \emptyset \\ \perp & - & - \end{pmatrix}$	touche	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \perp & \neg\emptyset & \emptyset \\ \perp & \emptyset & - \end{pmatrix}$
	intersecte	$\begin{pmatrix} \perp & \perp & \perp \\ \neg\emptyset & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix}$				

2.4 Position relative

2.4.1 Principes, définitions et propriétés

La position relative est une mesure basée sur le calcul d'une distance où les relations topologiques entre les objets sont prises en compte. Avant de définir la position relative, nous introduisons la notion de distance minimale entre deux objets :

Définition 4 : Distance minimale entre deux objets

Soit O l'ensemble des objets (polygones, polygones et points) et $A, B \in O$. La distance minimale $d : O \times O \rightarrow \mathbb{R}^+$ est définie pour les objets A et B par :

$$d(A, B) = \min\{d_p(a, b) | a \in A \wedge b \in B\}$$

Elle répond aux propriétés suivantes :

- $\forall A, B \in O : d(A, B) = d(B, A)$ (symétrie)
- $\forall A, B \in O : (d(A, B) = 0 \Leftrightarrow \exists a \in A \wedge \exists b \in B | a = b)$ et $(\forall A, B \in O : d(A, B) > 0 \Leftrightarrow \forall a \in A \wedge \forall b \in B \text{ alors } a \neq b)$ (séparation d'objets)

La distance entre deux points appartenant à deux objets distincts $d_p : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^+$ est caractérisée par les propriétés mathématiques suivantes qui qualifient les distances :

- $\forall x, y \in \mathbb{R}^2 : d_p(x, y) = d_p(y, x)$ (symétrie)
- $\forall x, y \in \mathbb{R}^2 : d_p(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$ et $\forall x, y \in \mathbb{R}^2 : d_p(x, y) > 0 \Leftrightarrow x \neq y$ (séparation)
- $\forall x, y, z \in \mathbb{R}^2 : d_p(x, z) \leq d_p(x, y) + d_p(y, z)$ (inégalité triangulaire)

La distance minimale entre deux objets n'est pas caractérisée par les trois propriétés qualifiant les distances, elle n'est donc pas une distance au sens mathématique du terme. En particulier, l'inégalité triangulaire n'est pas respectée entre deux objets. La distance minimale entre un objet A et un objet C peut être inférieure, égale ou supérieure à la somme de la distance minimale entre les objets A et B et la distance minimale entre les objets B et C .

Il est immédiat de noter que la distance minimale entre deux objets est positive lorsque l'objet cible est *disjoint* de l'objet référent et nulle lorsque l'objet cible *touche* ou *intersecte* l'objet référent :

$$d(A, B) = \begin{cases} \min\{d_p(a, b) | a \in A \wedge b \in B\} > 0 & \text{si } A \text{ et } B \text{ sont } \textit{disjoints} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.1)$$

Définition 5 : Position relative

Soient deux objets A et B , A objet référent et B objet cible. La position relative p_{AB} entre l'objet référent A et l'objet cible B est définie :

- lorsque B *intersecte* A , comme l'opposé* de la distance entre l'extérieur de A et l'un des points les plus éloignés de l'extérieur de A appartenant à l'intersection de A et de B (figure 2.9(a)). Le calcul d'une distance étant toujours positive, la position relative est donc négative dans ce cas. Plus formellement, elle s'écrit :

$$p_{AB} = -\max\{d(b, \overline{A^-}) | b \in \overline{A \cap B}\}$$

- sinon comme la distance entre A et l'un des points les plus proches de A appartenant à B (figure 2.9(b)). La position relative est positive ou nulle dans ce cas. Plus formellement, elle s'écrit :

$$p_{AB} = +d(A, B)$$

Dans les définitions formelles suivantes, nous distinguons les cas orthogonaux, qui représentent toutes les configurations possibles entre nos objets :

Définition 5.1 : Position relative pour la relation *disjonction*

Lorsque B est *disjoint* de A (figures 2.1, 2.2 et 2.3), la position relative est positive. Elle représente la distance minimale entre l'un des points de B le plus proche de A , c'est-à-dire la distance entre A et B , ce que nous notons par :

$$B \text{ est } \textit{disjoint} \text{ de } A \Rightarrow p_{AB} = +d(A, B) \quad (2.2)$$

*L'opposé d'un nombre n est le nombre tel que, lorsqu'il est ajouté à n donne zéro.

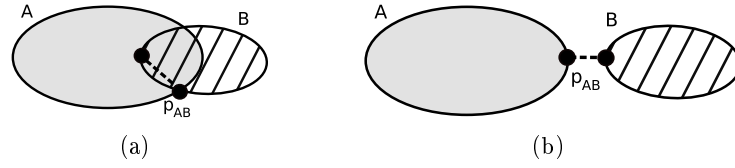


Figure 2.9 — Exemples de positions relatives entre un polygone référent A et un polygone cible B

Définition 5.2 : Position relative pour la relation *toucher*

Lorsque B *toucher* A (figures 2.4, 2.5 et 2.6), la position relative s'exprime de façon identique à la relation de *disjonction* entre les deux objets. L'intersection des frontières des deux objets n'est pas un ensemble vide, il existe donc au moins un point de B appartenant à A , et la position relative est donc nulle :

$$B \text{ touche } A \Rightarrow p_{AB} = 0 \quad (2.3)$$

Définition 5.3 : Position relative pour la relation *intersection* et A un point

Lorsque B *intersecte* A , A est un point et B est un polygone (figure 2.8(c)), il existe au moins un point B appartenant à A , la position relative est donc nulle :

$$B \text{ intersecte } A \text{ et } A \text{ est un point} \Rightarrow p_{AB} = 0 \quad (2.4)$$

Définition 5.4 : Position relative pour la relation *intersection* et A une polyligne

Lorsque B *intersecte* A , A est une polyligne et B est un polygone (figures 2.8(a) 2.8(b)), il existe au moins un point B appartenant à A , la position relative est donc nulle :

$$B \text{ intersecte } A \text{ et } A \text{ est une polyligne} \Rightarrow p_{AB} = 0 \quad (2.5)$$

Définition 5.5 : Position relative pour la relation *intersection* et A un polygone

Lorsque B *intersecte* A et A est un polygone (figure 2.7), la position relative représente l'opposé de la valeur maximale appartenant à l'ensemble des distances entre les points de l'intersection de A et B et l'extérieur de A (l'utilisation de la fermeture de tous les ensembles entraîne la certitude que ces ensembles sont des fermés et ainsi, les bornes inférieures et supérieures sont atteintes d'où l'emploi des minimums et maximums) :

$$B \text{ intersecte } A \Rightarrow p_{AB} = -\max\{d(b, \overline{A^-}) | b \in \overline{A \cap B}\} \quad (2.6)$$

La valuation de la position relative permet donc de distinguer les trois relations topologiques :

$$p_{AB} \begin{cases} > 0 & \text{si } B \text{ est disjoint de } A \\ = 0 & \text{si } B \text{ touche } A \text{ ou } B \text{ intersecte } A \text{ (} A \text{ polyligne ou point)} \\ < 0 & \text{si } B \text{ intersecte } A \text{ (} A \text{ polygone)} \end{cases} \quad (2.7)$$

Par convention, les valeurs positives, nulles et négatives de la position relative sont notées :

$A(p^+)B$ lorsque B est disjoint de A .

$A(p^0)B$ lorsque B touche A ou B intersecte A (A polyligne ou point).

$A(p^-)B$ lorsque B instersecte A (A polygone).

La position relative distingue qualitativement, à distance égale, les configurations représentées par les relations *toucher* et *intersection* lorsque l'objet référent ou l'objet cible est un polygone. La position relative, pouvant être négative, n'est donc pas une distance au sens mathématique du terme.

Propriété 1 : Continuité

La position relative est une fonction continue dans le temps.

Preuve :

Nous allons montrer que :

- la distance est une fonction continue
- la position relative est continue lorsque les objets sont soit *disjoints*, se *touchent* ou *s'intersectent*
- la position relative est continue sur son intervalle de définition.

La fonction représentant le changement de position d'objets mobiles est une fonction continue dans le temps. Le résultat de la combinaison linéaire de fonctions continues (c'est-à-dire $\forall a, b \in \mathbb{R} \wedge f, g$ fonctions réelles continues, $a * f + b * g$ est une fonction continue) est une fonction continue. Le calcul de la distance entre deux positions est donc une fonction continue.

La position relative entre deux objets représente la distance minimale entre les objets lorsque l'objet cible est *disjoint* de l'objet référent. Elle est donc continue dans ce cas. De même, lorsque l'objet cible *intersecte* l'objet référent, la position relative représente l'opposé de la distance entre deux points des deux objets et est donc continue.

La distance entre deux objets *disjoints* tend vers 0 lorsque les objets tendent à se *toucher*. Lorsque l'objet cible est *disjoint* de l'objet référent, la position relative tend donc vers 0 quand la relation entre les objets tend vers le *toucher*. De même, lorsque l'objet cible *intersecte* l'objet référent, la position relative tend aussi vers 0 quand la relation entre les objets tend vers le *toucher*. Lorsque l'objet cible *touche* l'objet référent, la position relative est nulle. Les limites de la position relative lorsque les relations entre les objets sont l'*intersection* et la *disjonction* sont égales à la valeur de la position relative de la relation *toucher*.

La position relative est donc une fonction continue dans le temps.

□

Propriété 2 : Symétrie

La position relative est symétrique lorsque (figure 2.10) :

- B est *disjoint* de A
- B *touche* A

Preuve :

Nous montrons la symétrie pour les différents cas suivants :

- B est *disjoint* de A

- B touche A et les dimensions de A et de B sont identiques
- B touche A et A et B sont des polygones ou des points
- B touche A , A est un polygone et B est une polyligne ou un point

- B est disjoint de A

La position relative représente la distance entre deux objets (définition 4) qui répond à la propriété de symétrie.

- B touche A et les dimensions de A et de B sont identiques

D'après la définition du *toucher* (définition 2), lorsque les deux objets sont deux polygones, deux polygones ou deux points, seule l'intersection de leurs frontières n'est pas vide ($\partial A \cap \partial B = \neg \emptyset$). La position relative représente la distance entre deux objets (définition 4) ayant au moins un point de leur frontière en commun. Les positions relatives p_{AB} et p_{BA} sont donc nulles et identiques.

- B touche A et A et B sont des polygones ou des points

Lorsque A est une polyligne, B un point et $\partial A \cap \partial B = \neg \emptyset$, il existe donc au moins un point appartenant à A qui appartient à B . Les positions relatives p_{AB} et p_{BA} , représentant la distance entre les deux objets, sont donc nulles et identiques.

De même, lorsque A est un point et B une polyligne, les positions relatives sont donc nulles et identiques.

- B touche A , A est un polygone et B est une polyligne ou un point

Lorsque A est un polygone, et B une polyligne, l'intersection entre l'intérieur de A et la frontière de B est un ensemble vide ($A^\circ \cap \partial B = \emptyset$) et l'intersection entre leurs frontières est non vide ($\partial A \cap \partial B = \neg \emptyset$). Les positions relatives p_{AB} et p_{BA} représentant la distance entre les deux objets qui ont au moins un point de leurs frontières en commun, sont donc nulles et identiques.

De même, lorsque A est un polygone et B un point ou lorsque A est une polyligne et B un polygone, ou lorsque A est un point et B un polygone, les positions relatives p_{AB} et p_{BA} sont donc nulles et identiques.

Les positions relatives p_{AB} et p_{BA} entre les objets A et B sont identiques lorsque les relations entre les objets sont la *disjonction* ou le *toucher*. Lorsque les objets sont dans ces cas, la position relative est donc symétrique.

□

Propriété 3 : Non-symétrie

La position relative n'est pas symétrique lorsque B intersecte A (figure 2.11).

Preuve :

Nous montrons la non-symétrie pour les différents cas suivants :

- B intersecte A et A et B sont des polygones
- B intersecte A , A est une polygline ou un point et B est un polygone

- B intersecte A et A et B sont des polygones

Lorsque A est un polygone, B un polygone et l'intersection de leurs intérieurs n'est pas vide ($A^\circ \cap B^\circ = \neg\emptyset$), le point appartenant à l'intersection de A et de B le plus éloigné de l'extérieur de A n'est pas toujours le même que le point appartenant à l'intersection de A et de B le plus éloigné de l'extérieur de B (figure 2.11(a)). Les positions relatives p_{AB} et p_{BA} représentent donc des distances différentes.

Lorsque A est un polygone, B une polygline et l'intersection entre l'intérieur de A et la frontière de B n'est pas vide ($A^\circ \cap \partial B = \neg\emptyset$), alors B intersecte A (définitions 3). La position relative p_{AB} représente l'opposé de la distance entre le point de l'intersection de A et B le plus éloigné de l'extérieur de B et la position relative p_{BA} représente la distance entre les deux objets qui ont au moins un point en commun. La position relative p_{AB} est négative et la position relative p_{BA} est nulle. Elles sont donc différentes. De même, lorsque A est un polygone et B un point, les positions relatives p_{AB} et p_{BA} sont différentes.

- B intersecte A , A est une polygline ou un point et B est un polygone

Lorsque A est une polygline, B un polygone et l'intersection entre la frontière de A et l'intérieur de B n'est pas vide ($\partial A \cap B^\circ = \neg\emptyset$), A intersecte B (figure 2.11(b)). La position relative p_{AB} est nulle et la position relative p_{BA} est négative. Les deux positions relatives sont donc différentes.

De même, lorsque A est un point, B un polygone et l'intersection entre la frontière de A et l'intérieur de B n'est pas vide, alors les positions relatives p_{AB} et p_{BA} sont différentes (figure 2.11(c)).

Les positions relatives p_{AB} et p_{BA} entre deux objets A et B sont différentes lorsque B intersecte A , la position relative n'est donc pas symétrique dans ces cas.

□

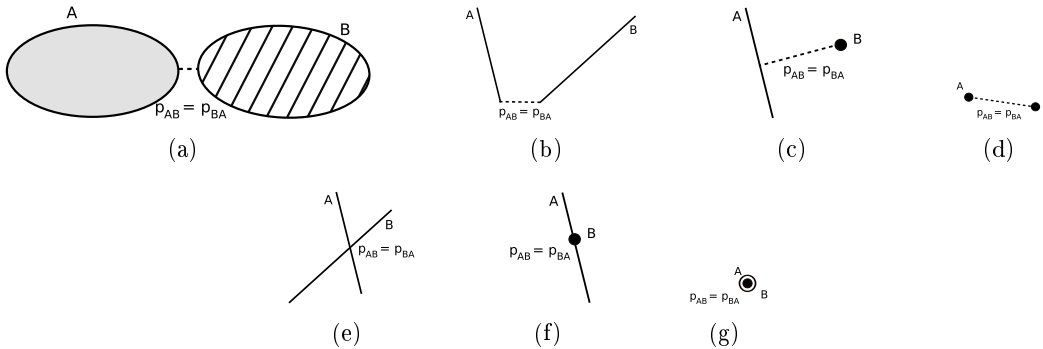


Figure 2.10 — Exemples de positions relatives identiques du point de vue de A et du point de vue de B

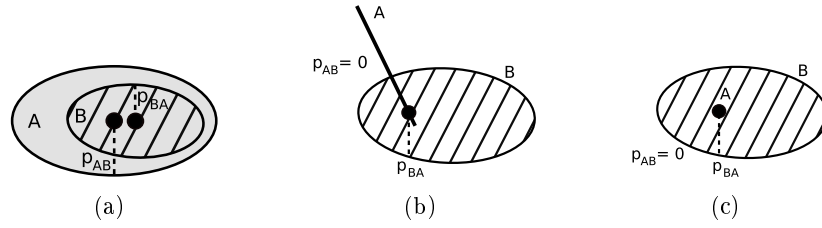


Figure 2.11 — Exemples de positions relatives différentes suivant le point de vue

La propriété 3 implique que dans le cas où un polygone B *intersecte* une polyligne ou un point A , la position relative est différente lorsque A est l'objet référent ou lorsque B est l'objet référent. Elle permet donc de distinguer l'objet contenant de l'objet contenu. Si l'objet B contient totalement ou partiellement l'objet A (B est l'objet contenant et A est l'objet contenu), alors B *intersecte* A , B est un polygone et A n'a pas d'intérieur (A est une polyligne ou un point); c'est-à-dire $B^\circ \cap \partial A = \neg\emptyset \wedge A^\circ = \emptyset$. Elle permet donc de proposer la propriété suivante :

Propriété 4 : Différence entre objet contenant et objet contenu

La position relative permet de différencier le point de vue du contenant du point de vue du contenu, lorsque l'un des objets est un polygone et le second une polyligne ou un point.

Preuve :

La position relative n'est pas symétrique (propriété 3). Lorsque l'objet A est un polygone et l'objet B une polyligne, si l'intersection entre l'intérieur de A et la frontière de B n'est pas vide, alors A contient entièrement ou en partie B (A est le contenant) et la position relative est négative et B est contenu entièrement ou en partie par A (B est le contenu) et la position relative est nulle.

La position relative distingue donc le point de vue du contenant du point de vue du contenu.

□

2.4.2 Exemples

Les exemples suivants mettent en évidence la distinction des relations topologiques entre deux objets dans la définition de la position relative, ainsi que des propriétés de cette mesure.

La visualisation des déplacements* de l'objet A dans les figures 2.12, 2.13, 2.14 et 2.15, lorsque l'objet B est immobile, permet d'établir les similitudes et les différences entre la distance entre A et B et les positions relatives p_{AB} et p_{BA} lorsque respectivement A est l'objet référent et B est l'objet référent. L'objet mobile A touche l'objet B entre t_4 et t_5 pour la figure 2.12 et entre t_5 et t_6 pour les figures 2.13, 2.14 et 2.15. Lorsque aucun des objets n'est un polygone, les positions relatives p_{AB} et p_{BA} sont identiques à la distance minimale entre A et B (définition 5) (figure 2.12). Lorsque l'un des objets est un polygone, la position relative du point de vue de cet objet peut être négative.

*Le déplacement des objets est continu même si seuls quelques instants sont illustrés dans les figures.

La comparaison de l'évolution des positions relatives p_{AB} et p_{BA} permet de déterminer l'objet contenant et l'objet contenu (figures 2.13 et 2.14) et de mettre en évidence la différence de taille entre les objets (figure 2.15). La position relative négative est moins petite * lorsque l'objet référent a une taille plus petite que l'objet cible, et inversement la position relative négative est plus petite lorsque l'objet référent a une taille plus grande que l'objet cible.

La représentation des positions relatives de p_{AB} et p_{BA} permet de mettre en évidence les instants et les intervalles où l'objet cible est le plus à l'intérieur de l'objet référent. Pendant l'intervalle de temps i (figure 2.15(c)), l'objet B est le plus à l'intérieur de l'objet A , la distance entre le point de l'intersection de A et de B le plus éloigné de la frontière de A et l'extérieur de A reste stable sur cet intervalle. Dans la figure 2.15(d), sur l'intervalle de temps j , l'objet A est le plus à l'intérieur de l'objet B , la distance entre le point de l'intersection de A et de B le plus éloigné de la frontière de B et la frontière de B reste stable.

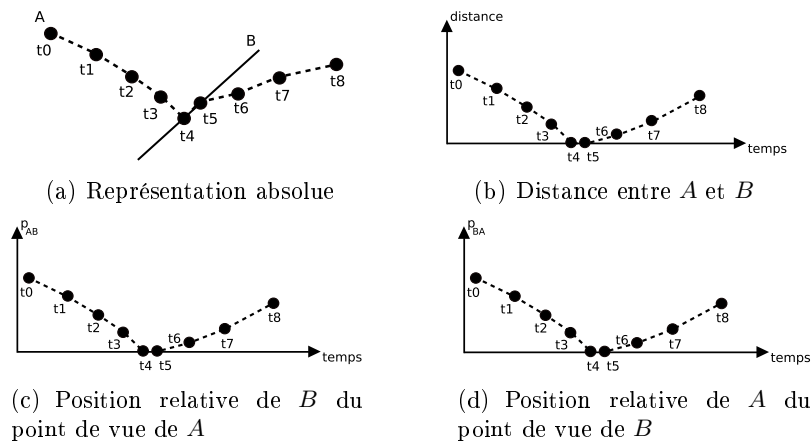


Figure 2.12 — Visualisation des changements de la position relative d'une polygône et d'un point

2.5 Vitesse relativisée

2.5.1 Principe, définition et propriétés

La représentation relative de la vitesse est couramment définie par la vitesse relative d'un objet dans le référentiel d'un second objet. Le vecteur vitesse représentant la vitesse relative de l'objet B dans le référentiel de l'objet A est défini par $\vec{v}_r = \vec{v}_B - \vec{v}_A$. Cette vitesse est représentée par un vecteur dont la norme est toujours positive et qui ne distingue pas l'objet le plus rapide. Nous définissons la vitesse relativisée en associant à la notion de la vitesse relative une pondération qui permet de distinguer les cas où l'objet cible est plus rapide que l'objet référent de ceux où l'objet cible est moins rapide que l'objet référent.

Définition 6 : Vitesse relativisée

Nous définissons la vitesse relativisée entre un objet référent A et un objet cible B comme la multiplication de la norme de la vitesse de B dans le référentiel de A par la différence des

*La valeur est négative, donc si $a > b > 0$, alors $-a < -b < 0$

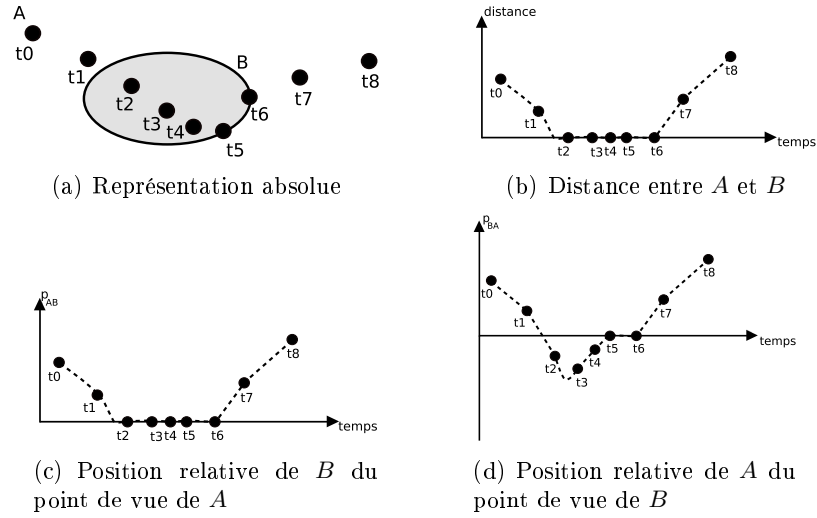


Figure 2.13 — Visualisation des changements de la position relative d'un polygone et d'un point

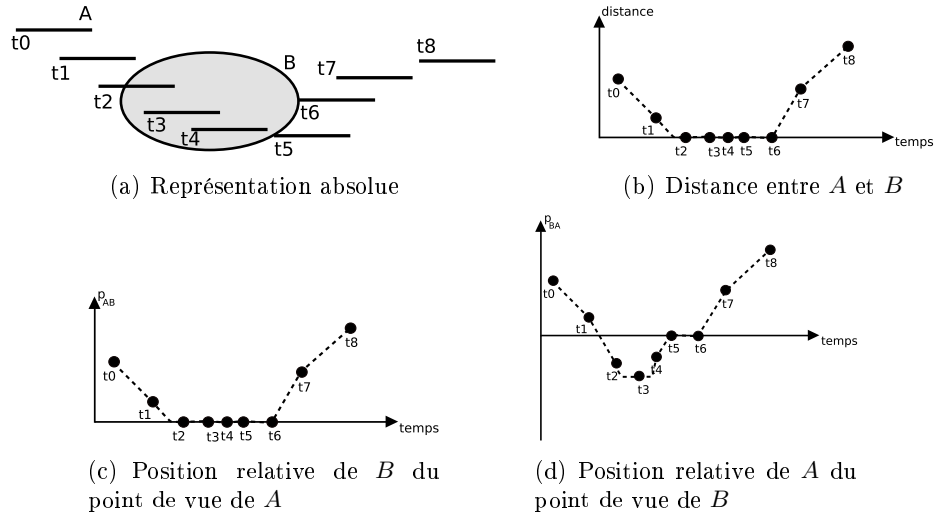


Figure 2.14 — Visualisation des changements de la position relative d'un polygone et d'une polyligne

normes des vecteurs vitesse de A et de B :

$$v_{AB} = (\|\vec{v}_A\| - \|\vec{v}_B\|) * \|\vec{v}_r\| \quad \text{avec } \vec{v}_r = \vec{v}_B - \vec{v}_A \quad (2.8)$$

où $\vec{v}_A$ représente le vecteur vitesse de l'objet référent A et $\vec{v}_B$ représente le vecteur vitesse de l'objet cible B. Le vecteur vitesse $\vec{v}_r$ représente le vecteur vitesse de l'objet B dans le référentiel de l'objet référent A.

La vitesse relativisée de l'objet cible B dans le référentiel de l'objet A se décline de la

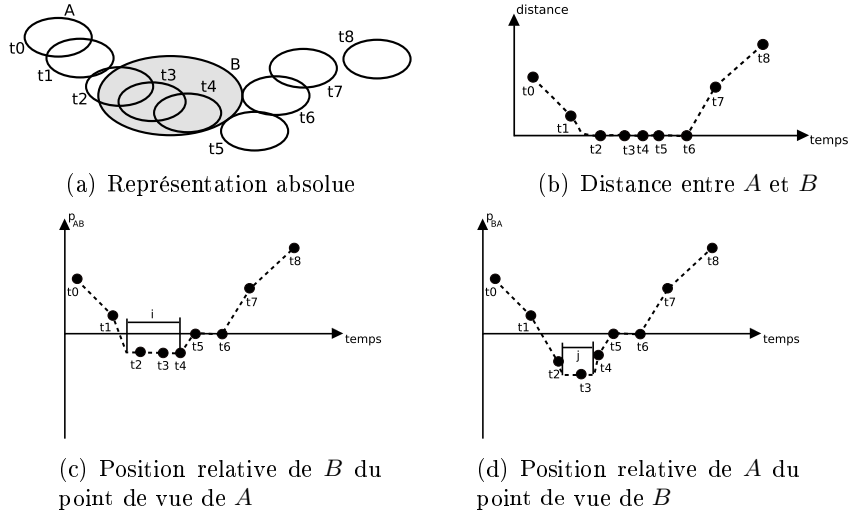


Figure 2.15 — Visualisation des changements de la position relative de deux polygones

façon suivante :

$$v_{AB} \begin{cases} > 0 & \text{si } \|\vec{v}_A\| > \|\vec{v}_B\| \\ = 0 & \text{si } \|\vec{v}_A\| = \|\vec{v}_B\| \\ < 0 & \text{si } \|\vec{v}_A\| < \|\vec{v}_B\| \end{cases} \quad (2.9)$$

Par convention et pour représenter les valeurs positives, nulles et négatives de la vitesse relativisée, les notations suivantes sont utilisées dans la suite du document :

$A(v^+)B$ lorsque B est moins rapide que A

$A(v^0)B$ lorsque A et B ont une vitesse identique (norme du vecteur vitesse identique)

$A(v^-)B$ lorsque B est plus rapide que A

Propriété 5 : Continuité

La vitesse relativisée est une fonction continue dans le temps.

Preuve :

La vitesse relativisée est un produit de normes des vecteurs vitesse. La fonction représentant la norme du vecteur vitesse d'un objet mobile est une fonction continue dans le temps. De plus, le produit de deux fonctions continues est une fonction continue.

La vitesse relativisée est donc une fonction continue dans le temps.

□

Propriété 6 : Rapidité des objets

La vitesse relativisée permet de déterminer si l'objet cible est plus rapide, moins rapide que l'objet référent ou si les objets cibles et référents ont une vitesse identique (normes des vecteurs vitesse identiques).

Cette dernière propriété montre que la vitesse relativisée lorsque A est l'objet référent et B

l'objet cible correspond à la valeur opposée à la vitesse relativisée lorsque B est l'objet référent et A l'objet cible.

2.5.2 Exemples

Les exemples suivants mettent en évidence l'apport de la vitesse relativisée notamment dans le cas où les objets cibles et référents sont mobiles.

La figure 2.16 reprend l'exemple de la figure 2.13 et permet de visualiser les vitesses relativisées lorsque les objets référents sont respectivement A et B . Le polygone B est immobile entre t_0 et t_8 et le point A a une vitesse constante entre t_0 et t_2 , décélère à partir de t_2 jusqu'à un instant t entre t_3 et t_4 , puis accélère entre t_4 et t_7 et enfin décélère à partir de t_7 . La vitesse relativisée permet de déduire que l'objet A est plus rapide que l'objet B entre t_0 et t_8 , la vitesse relativisée v_{AB} est positive et la vitesse relativisée v_{BA} est négative. La visualisation de l'évolution des vitesses relativisées v_{AB} et v_{BA} montre que v_{AB} représente la valeur opposée de v_{BA} .

Dans la figure 2.17, l'apport de la vitesse relativisée d'un objet mobile cible B dans le référentiel d'un objet mobile A par la prise en compte de l'objet le plus rapide est mis en évidence. La visualisation des déplacements des objets mobiles A et B dans la représentation absolue (figure 3.6(a)) montre la difficulté à mettre en évidence et à percevoir l'évolution comparée des vitesses de ces objets. En effet, les changements de vitesse des deux objets A et B sont identiques du point de vue de A et du point de vue B , lorsque seule la norme de la vitesse relative $||\vec{v}_A - \vec{v}_B||$ ou $||\vec{v}_B - \vec{v}_A||$ (la norme de la vitesse relative est symétrique et donc indépendante de l'objet référent) est utilisée (figure 2.17(c)). A contrario, lorsque les vitesses relativisées v_{AB} ou v_{BA} sont utilisées, l'objet le plus rapide est mis en évidence et la différence entre les normes des vecteurs vitesse augmente la valeur de la vitesse relative (figures 2.17(d) 2.17(e)). Dans la figure 2.17(d), la vitesse relativisée v_{AB} diminue entre t_0 et i , la différence entre les vecteurs vitesse de A et de B augmente. Entre i et j , la différence entre les vecteurs vitesse de A et de B diminue jusqu'à s'annuler. A j , A et B ont une norme de vitesse identique puis la différence entre les vecteurs vitesse augmente, A est plus rapide que B . A partir de t_4 , la vitesse relativisée diminue jusqu'à t_5 , où l'objet cible est plus rapide que l'objet référent. Elle augmente de nouveau entre t_5 et t_7 , avec une valeur nulle de la vitesse relativisée à l , l'objet A étant plus rapide que l'objet B entre l et t_7 . Enfin, la vitesse relativisée diminue entre t_7 et t_8 . Cette succession de changements de la vitesse relativisée v_{AB} correspond à la succession de changements de la vitesse relativisée v_{BA} où les diminutions et les augmentations de la vitesse relativisée sont inversées.

2.6 Conclusion

Le modèle conceptuel de trajectoires géographiques ainsi défini permet de représenter dynamiquement deux mesures spatiales et spatio-temporelles sur une même représentation géographique : la position relative et la vitesse relativisée. Ces deux mesures s'appliquent sur des ensembles de points au sens topologique, et plus spécifiquement sur des polygones, des polygones et des points. Les relations topologiques entre deux objets sont définies, elles permettent de représenter la relation existante entre ces objets du point de vue de l'objet référent.

La position relative définit une mesure représentant la distance entre deux objets et distingue la topologie des relations entre l'objet cible et l'objet référent. Lorsque l'objet cible est

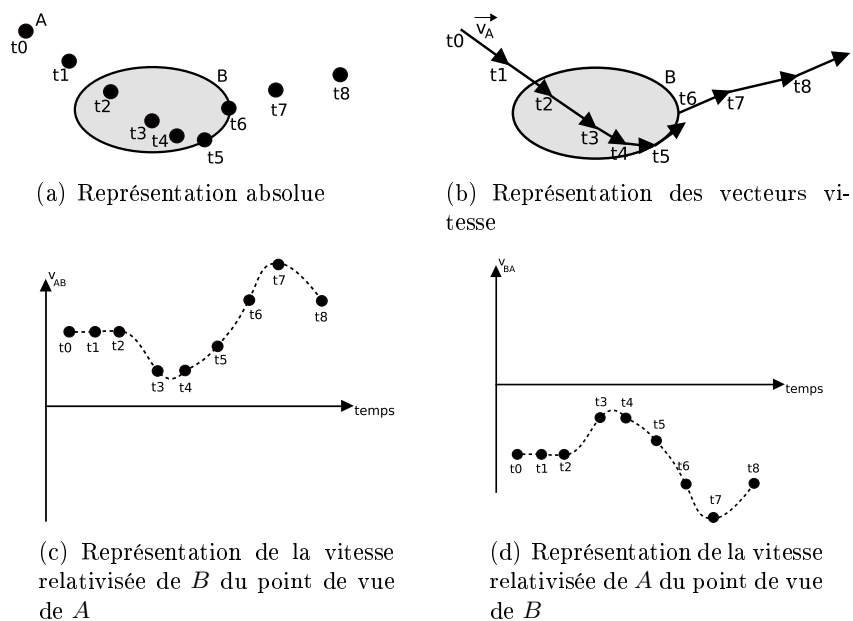


Figure 2.16 — Visualisation des changements de la vitesse relativisée d'un point mobile et un polygone statique

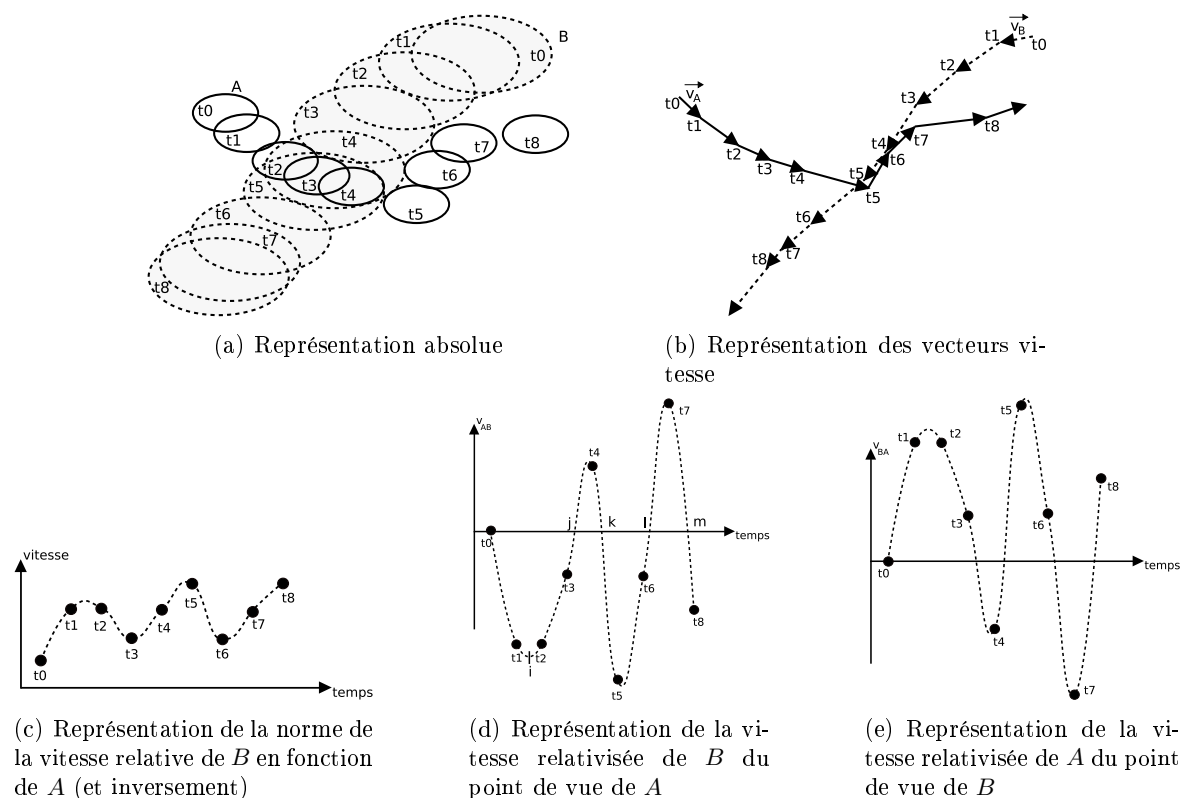


Figure 2.17 — Visualisation des changements de la vitesse relativisée de deux polygones

disjoint de l'objet référent ou l'objet cible *touche* l'objet référent, la position relative représente la distance entre les deux objets et lorsque l'objet cible *intersecte* l'objet référent, elle représente l'opposé de la distance entre le point appartenant à l'intersection le plus éloigné de l'extérieur de l'objet référent. La position relative est continue et n'est pas symétrique ce qui favorise la distinction entre le point de vue de l'objet contenant et le point de vue de l'objet contenu.

La vitesse relativisée définit une mesure représentant la vitesse relative de l'objet cible dans le référentiel de l'objet référent évaluée par la différence entre les normes des vecteurs vitesse de l'objet référent et de l'objet cible. La vitesse relativisée est continue et détermine l'objet le plus rapide. Cette distinction permet de visualiser les objets cibles potentiellement plus dangereux car plus rapides que l'objet référent.

Dans le contexte maritime, cette représentation géographique de la position relative et de la vitesse relativisée permet de faire la distinction entre l'objet contenant et l'objet contenu : une zone portuaire (objet référent) visualise les navires (objets cibles) se déplaçant dans la zone et les navires (objets référents) connaissent leur position en fonction de la zone (objet cible) ; c'est-à-dire soit à l'extérieur, soit à la frontière ou à l'intérieur de la zone (figure 2.16). Lorsque la zone portuaire est l'objet référent, les navires dans la zone sont souvent soumis à une vitesse maximale et les navires ne respectant pas cette vitesse peuvent être mis en évidence. Lorsqu'un navire est l'objet référent, la position relative de la zone permet de déterminer une éventuelle limitation de vitesse du navire et d'adapter le comportement de celui-ci.

Chapitre 3

RAISONNEMENT SPATIO-TEMPOREL

3.1 Introduction

Le modèle conceptuel de trajectoires géographiques représente des données quantitatives qui peuvent être catégorisées selon leur valuation dans la mesure où la position relative et la vitesse relativisée sont chacune positive, nulle ou négative. Ces trois cas, orthogonaux pour chaque mesure, classent les informations en groupes qualitatifs qui peuvent être combinés, caractérisés et confrontés à leur signification cognitive que nous aborderons à travers leur expression dans le langage naturel.

La première partie de ce chapitre présente les notions d'états, d'événements et de processus de la littérature. La seconde partie expose les états spatio-temporels du modèle conceptuel de trajectoires géographiques, et la caractérisation de ces états dans le langage naturel. La troisième partie détermine les transitions continues existantes entre les états spatio-temporels définis via la théorie de la dominance, puis caractérise ces transitions dans le langage naturel. Enfin, la quatrième partie présente les résultats des compositions entre les états spatio-temporels identifiés.

3.2 Etats, événements et processus

Les états, les événements et les processus peuvent être classés à partir des concepts d'occurrent (de perdurant) et d'endurant [Grenon et Smith, 2004] [Masolo et al., 2003] [Worboys et Duckham, 2004] [Desclés, 1994] [Galton, 2000]. Les occurrents regroupent les concepts se produisant à partir d'un instant précis sur une période de temps déterminée, les perdurants sont des occurrents qui ne sont pas instantanés et les endurants regroupent les concepts qui durent dans le temps sans subir de changement [Grenon et Smith, 2004].

Worboys propose une classification où les états sont des endurants, et où les événements et les processus font partie des perdurants [Worboys et Duckham, 2004]. Il illustre les principes définis dans [Mourelatos, 1978] où le concept de situation est spécifié par des états (le navire

est rouge) et des occurrences subdivisées en événements (le navire s'arrête) et en processus (le navire se déplace rapidement) (figure 3.1).

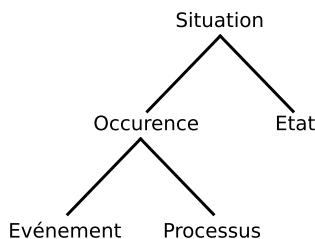


Figure 3.1 — Taxonomie d'une situation

Desclés et Galton caractérisent un état comme une absence de changement dans une situation [Galton, 2000] [Desclés, 1994]. Cette absence de changement définit une certaine homogénéité dans la situation. Par exemple, la situation “*Monsieur Dupont respire*” est un état bien qu’il existe des phases d’inspiration et d’expiration. Suivant le point de vue temporel, une série de captures de situations à des intervalles irréguliers ne permet pas d’établir une évolution de la situation. Une situation est donc un état, lorsque il n’existe pas de changement perceptible dans sa description.

Une situation est décrite par un événement lorsqu’elle définit un élément discret facilement distingué des autres événements. “*Monsieur Dupont s’endort*” et “*Monsieur Dupont se réveille*” sont des événements qui caractérisent la transition entre deux états en déterminant la fin ou le début d’un état [Galton, 2000] [Desclés, 1994] [Worboys et Hornsby, 2004]. Il sont caractérisés par la vue globale du résultat d’un ensemble de processus [Bestougeff et Ligozat, 1993]. “*Monsieur Dupont se réveille*” est le résultat de processus tels que “*Le coeur de Monsieur Dupont accélère*” et “*Monsieur Dupont ouvre les yeux*”. “*Monsieur Dupont s’endort*” est un événement qui donne fin à l’état “*Monsieur Dupont est réveillé*” et le début de l’état “*Monsieur Dupont dort*” et à l’inverse l’événement “*Monsieur Dupont se réveille*” met fin à l’état “*Monsieur Dupont dort*” et commence l’état “*Monsieur Dupont est réveillé*”.

Enfin, une situation est définie comme un processus lorsqu’un changement net est obtenu, c’est-à-dire lorsque la capture de la situation à des intervalles irréguliers permet d’ordonner les changements [Galton, 2000] [Bestougeff et Ligozat, 1993]. La situation “*Monsieur Dupont grossit*” n’établit pas la situation comme un état. Elle est définie par une suite de captures temporelles qui sont ordonnées. L’évolution de cette situation est visible et cette situation est caractérisée par un processus qui est défini comme un changement dans son évolution.

Dans le cas des processus spatio-temporels, il en existe trois catégories essentielles lorsque ces derniers sont modélisés dans un contexte géographique [Claramunt et Thériault, 1996] [Hornsby et Egenhofer, 2000] :

- l’évolution d’une entité individuelle qui concerne les changements liés à l’identité (ex : apparition, disparition), les transformations (ex : expansion, contraction) et les mouvements (ex : translation, rotation)
- les relations fonctionnelles entre plusieurs entités qui regroupent les processus de diffusion (ex : production, reproduction) et les processus de remplacement (ex : succession, permutation)
- l’évolution de structures spatiales (ex : division, union).

Les notions d'état, d'événement et de processus, appliquées à un modèle conceptuel de données, permettent d'identifier et de caractériser dans le langage naturel des situations stables et des situations en évolution. Notre objectif consiste donc à rechercher une caractérisation des différentes situations dans le modèle de trajectoires géographiques qui lie les données représentées au langage naturel et permette de distinguer les situations stables (les états) et les situations en évolution (les processus).

3.3 Caractérisation des états

La caractérisation qualitative de la position relative et de la vitesse relativisée représentent des configurations élémentaires qui, combinées deux à deux, engendrent des états élémentaires. Dans le cas de la position relative, les configurations positives, nulles et négatives caractérisent les relations topologiques existantes entre les objets (tableau 3.1). Les configurations positives, nulles et négatives de la vitesse relativisée permettent de différencier les situations où les objets cibles sont plus rapides ou non que l'objet référent (tableau 3.2).

Tableau 3.1 — Description des configurations élémentaires de la position relative

Configuration	Caractérisation de la position relative
$A(p^+)B$	B est entièrement à l'extérieur de A
$A(p^0)B$	B est entièrement ou en partie à la frontière de A
$A(p^-)B$	B est entièrement ou en partie à l'intérieur de A

Tableau 3.2 — Description des configurations élémentaires de la vitesse relativisée

Configuration	Caractérisation de la vitesse relativisée
$A(v^+)B$	B est moins rapide que A
$A(v^0)B$	B a la même vitesse que A (norme des vecteurs vitesse identique)
$A(v^-)B$	B est plus rapide que A

La combinaison des configurations élémentaires de la position relative et de la vitesse relativisée engendre neuf états spatio-temporels possibles dans lesquels peuvent se trouver un objet cible par rapport à l'objet référent (tableau 3.3) :

$$A(v^+p^+)B \text{ note que } A(v^+)B \wedge A(p^+)B$$

$$A(v^0p^+)B \text{ note que } A(v^0)B \wedge A(p^+)B$$

$$A(v^-p^+)B \text{ note que } A(v^-)B \wedge A(p^+)B$$

$$A(v^+p^0)B \text{ note que } A(v^+)B \wedge A(p^0)B$$

$$A(v^0p^0)B \text{ note que } A(v^0)B \wedge A(p^0)B$$

$A(v^-p^0)B$ note que $A(v^-)B \wedge A(p^0)B$

$A(v^+p^-)B$ note que $A(v^+)B \wedge A(p^-)B$

$A(v^0p^-)B$ note que $A(v^0)B \wedge A(p^-)B$

$A(v^-p^-)B$ note que $A(v^-)B \wedge A(p^-)B$

Dans les cas où l'objet référent est un polygone, les neuf états spatio-temporels sont valides. Dans le cas où l'objet référent est une polyligne ou un point, seuls les six premiers états sont valides, les positions relatives négatives ne sont pas possibles entre une polyligne ou un point et un objet cible représenté par un polygone, une polyligne ou un point.

Tableau 3.3 — Etats spatio-temporels

	$A(v^-)B$	$A(v^0)B$	$A(v^+)B$
$A(p^+)B$	$A(v^-p^+)B$	$A(v^0p^+)B$	$A(v^+p^+)B$
$A(p^0)B$	$A(v^-p^0)B$	$A(v^0p^0)B$	$A(v^+p^0)B$
$A(p^-)B$	$A(v^-p^-)B$	$A(v^0p^-)B$	$A(v^+p^-)B$

Ces états spatio-temporels sont caractérisés par la combinaison des caractérisations de la position relative et de la vitesse relativisée. L'état spatio-temporel $A(v^+p^+)B$ est caractérisé par les configurations : “ B est moins rapide que A ” et “ B est à l'extérieur de A ”. Les différentes illustrations de la figure 3.2 représentent cet état spatio-temporel $A(v^+p^+)B$ lorsque l'objet référent est un polygone (figure 3.2(a)), une polyligne (figure 3.2(b)) ou un point (figure 3.2(c)). La représentation diagrammatique dans la figure se base sur le tableau 3.3 où les lignes représentent les positions relatives positives, nulles et négatives et les colonnes représentent les vitesses relativisées négatives, nulles et positives. Lorsque l'objet référent est une polyligne ou un point, seules les lignes où la position relative est positive ou nulle sont représentées. Le point noir dans cette représentation diagrammatique visualise l'état spatio-temporel où la position relative et la vitesse relativisée sont positives : $A(v^+p^+)B$.

3.4 Transitions d'états

La description qualitative des changements d'état est étroitement liée à la continuité de ces changements. Elle doit permettre de définir les changements possibles. Dans le cas des nombres réels, il est possible de définir trois états : positif $\mathbb{R}^+$, négatif $\mathbb{R}^-$ ou nul $\mathbb{R}^0$ et de définir les changements possibles entre ces états : du positif au nul et inversement et du négatif au nul et inversement. Le changement sans un passage par un état intermédiaire entre l'état positif et l'état négatif (et inversement) n'est pas possible : passage obligatoire par l'état nul. C'est sur la base de ces principes que nous allons étudier les transitions possibles entre nos états spatio-temporels.

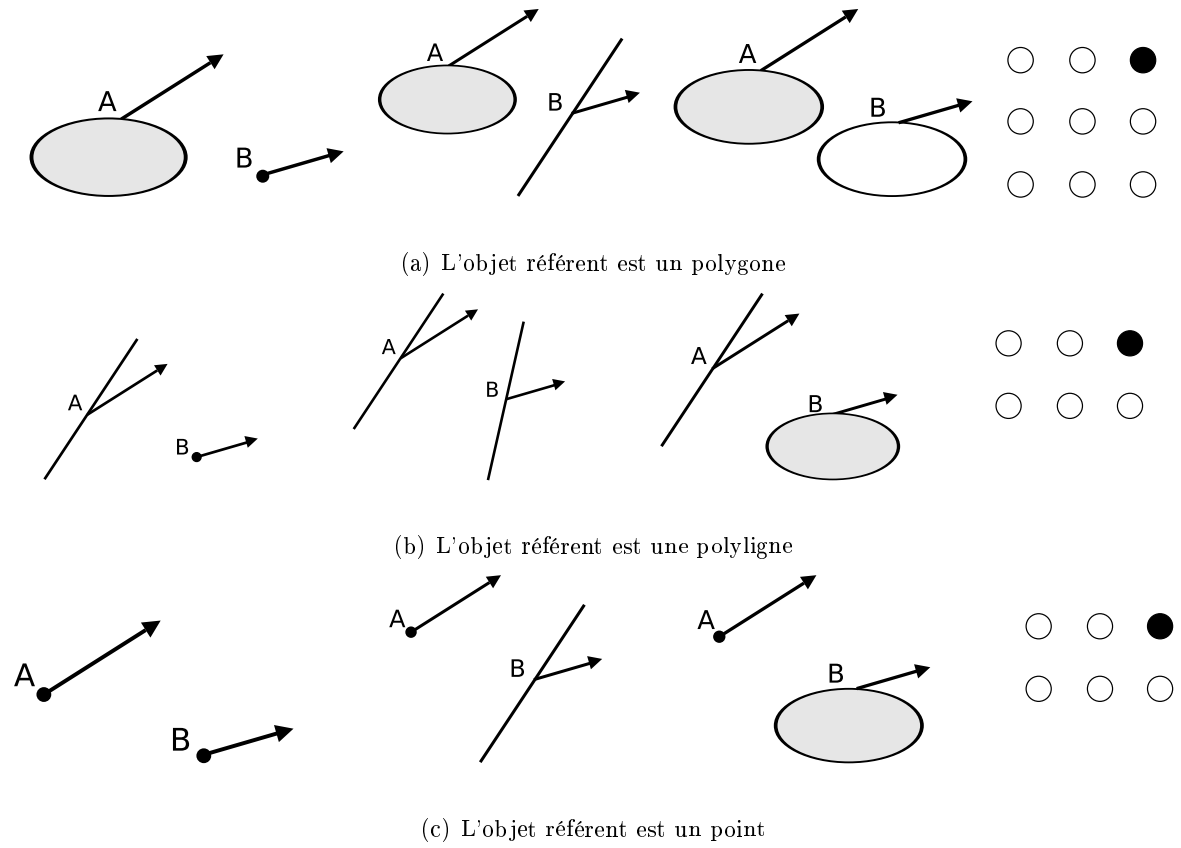


Figure 3.2 — Illustration de l'état spatio-temporel $A(v^+p^+)B$ et sa représentation diagrammatique

3.4.1 Théorie de la dominance

La théorie de la dominance définit les changements possibles entre deux états spatio-temporels, et détermine les états intermédiaires lorsqu'il n'existe pas de changement direct entre deux états [Galton, 1995a, Galton, 1995b].

La théorie de la dominance se fonde sur la continuité dans le temps des changements d'états spatio-temporels. Nous l'introduisons à partir des concepts et des notations suivants :

Un ensemble $\mathcal{T}$ d'instants muni d'un opérateur d'ordre dense et continu linéairement $<$.

L'ensemble des intervalles est alors noté $\mathcal{I}$ où un intervalle de temps est une paire d'instants (t_1, t_2) , avec $t_1 < t_2$ et $t_1, t_2 \in \mathcal{T}$.

A partir des ensembles temporels définis, les concepts temporels suivants sont développés :

Soit $i \in \mathcal{I}$ et $i = (t_1, t_2)$,

$$t \text{ limite } i \Leftrightarrow \text{Lim}(t, i) \Leftrightarrow t = t_1 \vee t = t_2$$

Soit $i \in \mathcal{I}$ et $i = (t_1, t_2)$,

$$t \text{ divise } i \Leftrightarrow \text{Div}(t, i) \Leftrightarrow t_1 < t < t_2$$

A partir de ces concepts, les prédicats sur la validité d'un état à un instant et sur un intervalle sont définis :

$$L'etat\ S\ est\ valide\ à\ l'instant\ t \Leftrightarrow Holds_at(S, t)$$

$$L'etat\ S\ est\ valide\ sur\ l'intervalle\ i \Leftrightarrow (Holds(S, i) =_{def} \forall t (Div(t, i) \Rightarrow Holds_at(S, t)))$$

Définition 7 : Espace dominant

Un espace dominant est une paire $(\mathcal{S}, \succ)$, où $\mathcal{S}$ est un ensemble fini d'états, $\succ$ est une relation irreflexive et asymétrique sur $\mathcal{S}$ où $S_1 \succ S_2$ est lu comme " S_1 domine S_2 " et induit que :

$$\forall S, S' \in \mathcal{S}, Holds(S, i) \wedge Lim(t, i) \wedge Holds_at(S', t) \Rightarrow S' \succeq S$$

(où $S' \succeq S \Leftrightarrow S' \succ S \vee S' = S$) est valide.

Pour que l'état S' domine l'état S avec $S, S' \in \mathcal{S}$, il suffit que S soit valide sur un intervalle de temps $i = (t_1, t_2)$ et que S' soit valide à un instant t qui représente une des limites de l'intervalle i , c'est-à-dire $t = t_1$ ou $t = t_2$. Dans le cas des états définis pour les nombres réels, l'état nul domine l'état positif et l'état négatif. L'espace dominant est alors noté $(\{\mathbb{R}^-, \mathbb{R}^0, \mathbb{R}^+\}, \succ)$ (l'état dominant est toujours au centre de l'ensemble des états).

La théorie de la dominance permet de combiner les espaces dominants afin de former un nouvel espace dominant en appliquant le théorème suivant :

Théorème 1 : Combinaison d'espaces dominants

Soit $(\mathcal{S}_1, \succ_1), (\mathcal{S}_2, \succ_2), \dots, (\mathcal{S}_n, \succ_n)$ n espaces dominants, $(\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2 \times \dots \times \mathcal{S}_n, \succ)$ est un espace dominant où $\succ$ est défini par :

$$(S_1, \dots, S_n) \succ (S'_1, \dots, S'_n) \Leftrightarrow S_i \succeq_i S'_i \mid i = 1 \dots n \text{ et } (S_1, \dots, S_n) \neq (S'_1, \dots, S'_n)$$

A partir d'espaces dominants définis en dimension un, il est alors possible de définir des espaces dominants à n dimensions en combinant n espaces dominants.

3.4.2 Espaces dominants : position relative et vitesse relativisée

La position relative est une fonction continue dans le temps où les états p^- , p^0 et p^+ représentent respectivement l'ensemble des positions relatives négatives, nulles et positives. p^- est défini par un ensemble de valeurs réelles négatives borné dont la limite à gauche est indéfinie et la limite à droite est la valeur nulle. De même, p^+ est un ensemble de valeurs réelles positives borné dont la limite à gauche est la valeur nulle et la limite à droite est indéfinie. p^0 est composé d'une seule valeur, la limite à droite de p^- et la limite à gauche de p^+ , c'est-à-dire la valeur nulle. Les ensembles de définition sont donc :

- $] -\infty, 0[$ pour p^-
- 0 pour p^0
- $]0, +\infty[$ pour p^+

p^0 n'étant composé que d'une valeur, p^0 peut être valide sur un intervalle de temps ou à un seul instant. p^- et p^+ étant composés d'un ensemble de valeurs, ils ne sont valides que sur

un intervalle de temps. Soit le choix d'un élément de p^- ou de p^+ , il existe toujours un autre élément appartenant à p^- (respectivement à p^+) entre l'élément défini et p^0 (valeur nulle)*.

De plus, le changement d'état de la position relative p^- à la position relative p^+ et de p^+ vers p^- doit obligatoirement passer par la position relative p^0 (limite à droite de p^- et à gauche de p^+). En utilisant la définition 7 d'un espace dominant, il est possible de définir l'espace dominant $(\{p^-, p^0, p^+\}, \succ)$ où $p^0 \succ p^-$ note que " p^0 domine p^- ", et $p^0 \succ p^+$ note que " p^0 domine p^+ ".

De même que la position relative, la vitesse relativisée est une fonction continue dans le temps. Les ensembles de définition des états v^- , v^0 et v^+ sont :

- $] -\infty, 0[$ pour v^-
- 0 pour v^0
- $]0, +\infty[$ pour v^+

v^0 peut être valide sur un intervalle de temps et à un instant seulement, et v^- et v^+ ne peuvent être valides que sur un intervalle de temps pour les mêmes raisons que pour la position relative. Les changements de la vitesse relativisée négative vers la vitesse relativisée positive (et inversement) imposent un passage par la vitesse relativisée nulle. Ainsi, en utilisant la définition 7, $(\{v^-, v^0, v^+\}, \succ)$ est un espace dominant où $v^0 \succ v^-$ note que " v^0 domine v^- ", et $v^0 \succ v^+$ note que " v^0 domine v^+ ".

3.4.3 Combinaison des espaces dominants

La position relative et la vitesse relativisée sont des mesures indépendantes, leurs espaces dominants $(\{p^-, p^0, p^+\}, \succ)$ et $(\{v^-, v^0, v^+\}, \succ)$ peuvent donc être combinés (théorème 1) et l'espace résultant $(\{v^-p^+, v^0p^+, v^+p^+, v^-p^0, v^0p^0, v^+p^0, v^-p^-, v^0p^-, v^+p^-\}, \succ)$ est un espace dominant. Cet espace contient les relations de dominance définies dans chacun des espaces de dominance combinés et les relations de dominance résultant de la combinaison.

Dans la figure 3.3, les lignes continues représentent les changements "orthogonaux" des états, i.e. les changements dans seulement l'une des deux dimensions (la position relative ou la vitesse relativisée) et les lignes discontinues représentent les changements "diagonaux" où il existe un changement simultané dans les deux dimensions. La figure 3.3(a) montre l'espace de dominance dans le cas où l'objet référent est un polygone. Lorsque l'objet référent est une polyligne ou un point, la théorie de la dominance s'applique sur les états existants : p^0 et p^+ et l'espace dominant en deux dimensions est $(\{v^-p^+, v^-p^0, v^0p^0, v^0p^+, v^+p^0, v^+p^+\}, \succ)$ (figure 3.3(b))

3.4.4 Transitions continues

Les relations de dominance représentant les changements continus entre les états spatio-temporels permettent de définir les transitions continues entre deux états où la position relative ou/et la vitesse relativisée évoluent :

*De même, il existe toujours dans l'ensemble des réels négatifs $\mathbb{R}^-$ ou l'ensemble des réels positifs $\mathbb{R}^+$ un réel x entre un réel y quelconque et 0.

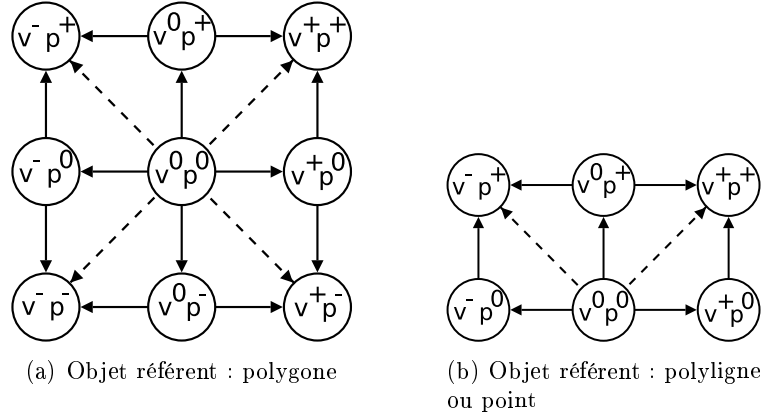


Figure 3.3 — Espaces dominants de la position relative et de la vitesse relativisée

Définition 8 : Transition continue entre deux états

Il existe une transition continue entre deux états e_1 et e_2 distincts si et seulement s'il existe un changement continu sans passage par un état intermédiaire entre e_1 et e_2 .

Les relations de dominance entre deux positions relatives permettent de définir les transitions continues : de p^- vers p^0 , de p^0 vers p^- , de p^+ vers p^0 , et de p^0 vers p^+ . De même, la vitesse relativisée v^0 domine v^- et v^+ , il existe donc des transitions continues de v^- vers v^0 , de v^0 vers v^- , de v^+ vers v^0 , et de v^0 vers v^+ .

Lorsque les deux espaces dominants sont combinés, les transitions continues sont donc les suivantes : (v^-p^+, v^0p^+) , (v^0p^0, v^-p^0) , (v^0p^0, v^+p^0) , (v^+p^+, v^0p^+) , (v^+p^-, v^0p^-) , (v^-p^-, v^0p^-) , (v^-p^+, v^-p^0) , (v^-p^-, v^-p^0) , (v^+p^+, v^+p^0) , (v^+p^-, v^+p^0) , (v^0p^0, v^0p^+) , (v^0p^0, v^0p^-) , (v^-p^+, v^0p^0) , (v^+p^+, v^0p^0) , (v^+p^-, v^0p^0) et (v^-p^-, v^0p^0) où (e_1, e_2) représente la transition continue "de e_1 vers e_2 ".

Afin de compléter ces transitions continues entre deux états distincts qui peuvent être valides sur un instant ou sur un intervalle de temps, il est possible d'étudier la cohérence physique de la validité d'un état spatio-temporel sur un intervalle de temps [Noyon et al., 2005b] [Noyon et al., 2005a] :

- Dans le cas où les deux objets sont des points, il est immédiat de noter que la position relative $p_{AB}(t)$ ne peut pas être nulle sur un intervalle de temps lorsque la vitesse relative $v_{AB}(t)$ n'est pas nulle ce qui implique que $A(v^-p^0)B$ et $A(v^+p^0)B$ sont des états spatio-temporels instantanés*. Il est aussi immédiat de noter que les états spatio-temporels $A(v^-p^+)B$, $A(v^0p^+)B$, $A(v^+p^+)B$ et $A(v^0p^0)B$ sont valides sur un intervalle de temps ou sur un instant.
- Dans les cas où au moins un des deux objets n'est pas un point, la position relative peut rester nulle sur un intervalle de temps que la vitesse relativisée soit nulle ou non, donc les états spatio-temporels ne sont pas obligatoirement instantanés.

*Si la vitesse relativisée est nulle, soit les vecteurs vitesse de A et de B n'ont pas le même sens et la même direction et l'état $A(v^0p^0)B$ est instantané, soit les vecteurs vitesse de A et de B ont même sens et même direction, donc $A(v^0p^0)B$ est valide sur un intervalle de temps.

Les transitions continues entre états spatio-temporels de deux objets sont visualisées dans la figure 3.4 par des lignes continues, et les états spatio-temporels pouvant être valides sur un intervalle de temps sont représentés par une boucle discontinue. Les transitions entre deux états spatio-temporels où l'objet référent est une polyligne ou un point ne permettent pas une position relative négative.

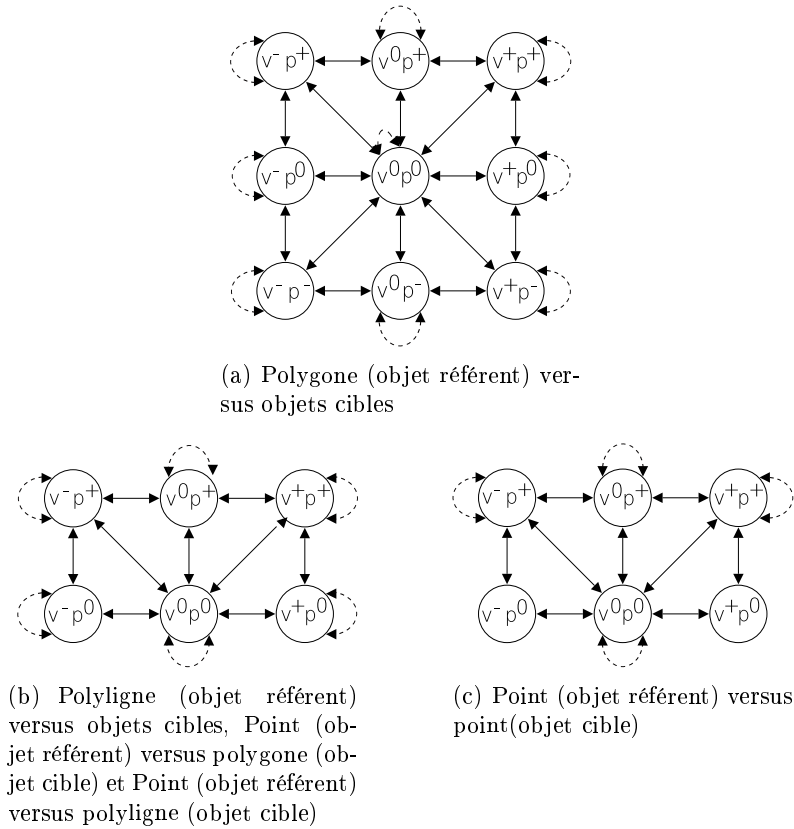


Figure 3.4 — Transitions continues

3.4.5 Caractérisation des processus de trajectoire

Les transitions continues définies représentent des processus de trajectoire. Les transitions entre un polygone (objet référent) et un objet cible sont représentées dans le tableau 3.4, les transitions entre une polyligne (objet référent) et un objet cible dans le tableau A.1 (annexe A) et les transitions entre un point (objet référent) et un objet cible dans le tableau A.2 (annexe A). Les transitions continues qui ne sont pas valides sont représentées par le symbole indéfini $\perp$ et l'absence de changement est représentée par l'état auquel la situation se rapporte.

Dans ces tableaux, les transitions et les états physiquement possibles sont représentés. Ils permettent de visualiser les changements de position relative, les changements de vitesse relativisée et l'absence complète de changement. La caractérisation des transitions, et donc des processus qui expriment ces changements, est définie dans les tableaux 3.5 et 3.6. La caractérisation des états est définie par les tableaux 3.1 et 3.2 [Noyon et al., 2005a] [Noyon et al., 2007].

Tableau 3.4 — Transitions continues lorsque A est un polygone

	$A(p^+)B$ $\downarrow$ $A(p^0)B$	$A(p^0)B$ $\downarrow$ $A(p^+)B$	$A(p^+)B$ $\downarrow$ $A(p^+)B$	$A(p^0)B$ $\downarrow$ $A(p^0)B$	$A(p^-)B$ $\downarrow$ $A(p^-)B$	$A(p^-)B$ $\downarrow$ $A(p^0)B$	$A(p^0)B$ $\downarrow$ $A(p^-)B$
$A(v^+)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$		$\perp$					$\perp$
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^+)B$	$\perp$					$\perp$	
$A(v^-)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$		$\perp$					$\perp$
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^-)B$	$\perp$					$\perp$	
$A(v^+)B$ $\downarrow$ $A(v^+)B$			$A(v^+p^+)B$	$A(v^+p^0)B$	$A(v^+p^-)B$		
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$			$A(v^0p^+)B$	$A(v^0p^0)B$	$A(v^0p^-)B$		
$A(v^-)B$ $\downarrow$ $A(v^-)B$			$A(v^-p^+)B$	$A(v^-p^0)B$	$A(v^-p^-)B$		

Tableau 3.5 — Changements de la position relative

Transition	Caractérisation des transitions pour la position relative
$A(p^+)B \longrightarrow A(p^0)B$	B se déplace de l'extérieur à la frontière A
$A(p^0)B \longrightarrow A(p^+)B$	B se déplace de la frontière à l'extérieur de A
$A(p^+)B \longrightarrow A(p^+)B$	B reste à l'extérieur de A
$A(p^0)B \longrightarrow A(p^0)B$	B reste à la frontière de A
$A(p^-)B \longrightarrow A(p^-)B$	B reste à l'intérieur de A
$A(p^-)B \longrightarrow A(p^0)B$	B se déplace de l'intérieur à la frontière de A
$A(p^0)B \longrightarrow A(p^-)B$	B se déplace de la frontière à l'intérieur de A

Cette caractérisation des changements et des processus sous-jacents permet d'analyser l'évolution d'une situation de la position relative et de la vitesse relativisée dans le temps. En considérant les données quantitatives en plus des données qualitatives de la position relative

Tableau 3.6 — Changements de la vitesse relativisée

Transition	Caractérisation des transitions pour la vitesse relativisée
$A(v^+)B \longrightarrow A(v^0)B$	Décélération de A ou/et accélération de B pour atteindre une vitesse relativisée nulle
$A(v^0)B \longrightarrow A(v^+)B$	Accélération de A ou/et décélération de B à partir d'une vitesse relativisée nulle
$A(v^-)B \longrightarrow A(v^0)B$	Accélération de A ou/et décélération de B pour atteindre une vitesse relativisée nulle
$A(v^0)B \longrightarrow A(v^-)B$	Décélération de A ou/et accélération de B à partir d'une vitesse relativisée nulle
$A(v^+)B \longrightarrow A(v^+)B$	B reste moins rapide que A
$A(v^0)B \longrightarrow A(v^0)B$	A et B ont la même vitesse (norme des vecteurs identique)
$A(v^-)B \longrightarrow A(v^-)B$	B reste plus rapide que A

et de la vitesse relativisée, le point de vue spatio-temporel est précisé, et il est alors possible de décrire les changements de valeur des mesures dans un état stable. Un état qualitatif peut être décrit par un ensemble d'état quantitatifs stables et de processus quantitatifs. La caractérisation de ces changements complète la caractérisation des informations qualitatives des tableaux 3.5 et 3.6 (tableaux 3.7 et 3.8). Dans le cas où la position relative est nulle ou le cas où la vitesse relativisée est nulle, seule l'absence de changement peut être qualifiée quantitativement, les autres cas représentent des transitions.

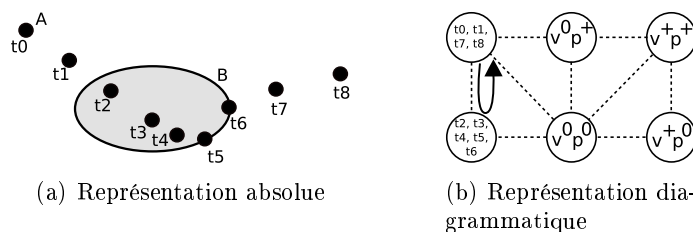
Tableau 3.7 — Changements quantitatifs de la position relative entre deux instants (état inchangé)

Etat	Transition	Caractérisation du changement
B est <i>disjoint</i> de A	p_{AB} augmente	B s'éloigne de la frontière de A
	p_{AB} ne change pas	B reste à la même distance de la frontière de A
	p_{AB} diminue	B se rapproche de la frontière de A
B <i>touche</i> A	p_{AB} augmente	définit la transition vers : $A(p^+)B$
	p_{AB} ne change pas	B reste à la même distance de A
	p_{AB} diminue	définit la transition vers : $A(p^-)B$
B <i>intersecte</i> A	p_{AB} diminue	B s'éloigne de la frontière de A
	p_{AB} ne change pas	B reste à la même distance de la frontière de A
	p_{AB} augmente	B se rapproche de la frontière de A

Tableau 3.8 — Changements quantitatifs de la vitesse relativisée entre deux instants (état inchangé)

Etat	Transition	Caractérisation du changement
B est moins rapide que A	v_{AB} augmente	B décélère ou/et A accélère
	v_{AB} ne change pas	la vitesse relativisée de B reste stable
	v_{AB} diminue	B accélère ou/et A décélère
B a la même vitesse que A	v_{AB} augmente	définit la transition vers : $A(v^+)B$
	v_{AB} ne change pas	la vitesse relativisée de B reste stable
	v_{AB} diminue	définit la transition vers : $A(v^-)B$
B est plus rapide que A	v_{AB} diminue	B décélère ou/et A accélère
	v_{AB} ne change pas	la vitesse relativisée de B reste stable
	v_{AB} augmente	B accélère ou/et A décélère

Les figures 3.5 et 3.6 permettent de visualiser l'ensemble des transitions continues et des états de la position relative et de la vitesse relativisée sur des exemples représentant les déplacements d'un point et d'un polygone, et de deux polygones. Les représentations diagrammatiques visualisent les états et les transitions du point de vue de l'objet A entre les instants t_0 et t_8 . Chaque instant est noté dans une zone représentant un état et la suite des transitions est représentée par une flèche : à la figure 3.5, entre les instants t_1 et t_2 , une transition représentant le changement de la situation* de l'état $A(v^-p^+)B$ à l'état $A(v^-p^0)B$ est visualisée.

**Figure 3.5** — Visualisation des changements avec la représentation diagrammatique lorsque l'objet référent est un point

A partir de ces représentations diagrammatiques les changements dans la situation sont caractérisables en s'appuyant sur les tableaux 3.5 et 3.6. Les caractérisations des situations des figures 3.5 et 3.6 scindent les états pour les différents instants par l'ajout des transitions (descriptions B.1 et B.3 de l'annexe B). L'extrait 3.1 de la description B.1 met en évidence qu'un état n'est pas toujours instantané. De plus, le passage d'un instant à un autre, c'est-à-dire le passage d'un état spatio-temporel à un autre, peut être représenté par un ensemble de transitions (extrait 3.2 de la description B.3).

*Une situation est un concept pouvant être décrit par un état ou un processus dans notre modèle.

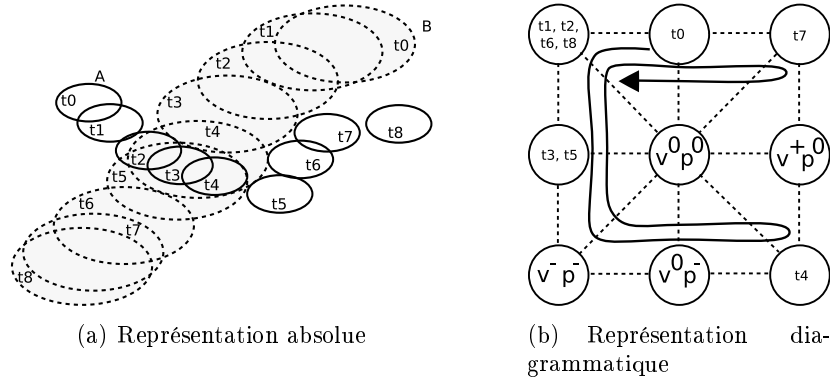


Figure 3.6 — Visualisation des changements avec la représentation diagrammatique lorsque l'objet référent est un polygone

$$\left. \begin{array}{l} t_2 \\ t_2 \rightarrow t_3 \\ t_3 \\ t_3 \rightarrow t_4 \\ t_4 \\ t_4 \rightarrow t_5 \\ t_5 \\ t_5 \rightarrow t_6 \\ t_6 \end{array} \right\} \text{état :} \quad B \text{ est à la frontière de A et B est moins rapide que A}$$

Description 3.1 — Extrait de la caractérisation des changements de la situation de la figure 3.5

$$t_3 \rightarrow t_4 \left\{ \begin{array}{ll} \text{transition :} & B \text{ se déplace de la frontière à l'intérieur de A, et B est plus rapide que A} \\ \text{transition :} & B \text{ reste à l'intérieur de A, et B décélère ou A accélère pour atteindre une vitesse identique} \\ \text{transition :} & B \text{ reste à l'intérieur de A, et B décélère ou A accélère à partir d'une vitesse identique} \end{array} \right.$$

Description 3.2 — Extrait de la caractérisation des changements de la situation de la figure 3.6

L'exemple de la description 3.1 montre que la caractérisation qualitative ne permet pas de suivre l'évolution des mesures dans un état. La description B.1 de l'exemple de la situation visualisée à la figure 3.5 est plus détaillée avec l'ajout de la caractérisation de l'évolution quantitative de la position relative et de la vitesse relativisée. La description B.2 se base sur l'évolution des mesures représentées à la figure 3.7. L'extrait présenté dans la description 3.3 permet de différencier l'évolution et les changements quantitatifs lorsque l'état spatio-temporel qualitatif est "*B est à la frontière de A*" et "*B est moins rapide que A*". Entre les instants t_2 et t_4 , la vitesse relativisée diminue, l'objet référent *A* décélère ou l'objet cible *B* accélère

entre les instants t_4 et t_6 , la vitesse relativisée augmente, l'objet référent A accélère ou l'objet cible B décélère. La position relative reste stable sur l'ensemble de l'intervalle.

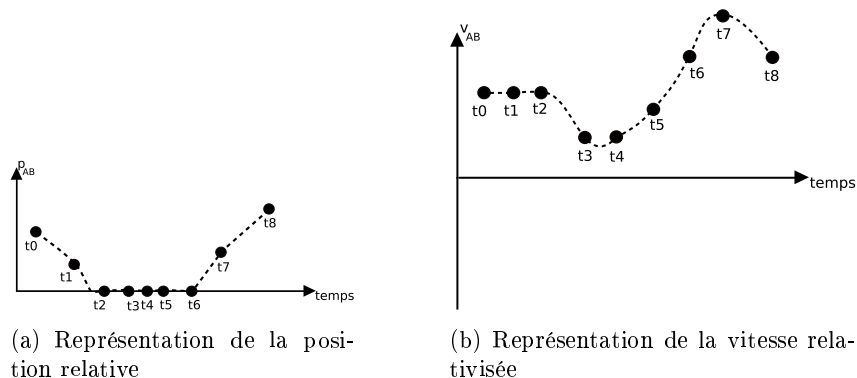


Figure 3.7 — Visualisation de l'évolution de la position relative et de la vitesse relativisée de la situation 3.5

t_2	état :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A
$t_2 \rightarrow t_3$	} changement :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A la position relative reste stable et A décélère
t_3		
$t_3 \rightarrow t_4$		
t_4	état :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A
$t_4 \rightarrow t_5$	} changement :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A la position relative reste stable et A accélère
t_5		
$t_5 \rightarrow t_6$		
t_6	état :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A

Description 3.3 — Extrait de la caractérisation des changements qualitatifs et quantitatifs de la situation de la figure 3.5

3.5 Tables de composition

Les tables de composition introduites par Allen [Allen, 1983] sont appliquées aux intervalles temporels, et permettent de déterminer les relations existantes entre un objet A et un objet C lorsque seules les relations entre les objets A et B et les objets B et C sont connues. Elles sont généralement utilisées pour définir les relations transitives entre les objets et raisonner avec une connaissance incomplète des relations entre les objets [Freksa, 1992a][Van de Weghe et al., 2005]. Nous proposons de dériver les tables de compositions à partir d'un raisonnement diagrammatique effectué sur les relations entre un objet référent A et des objets cibles B et C . Le résultat des compositions entre les états spatio-temporels, donne une disjonction des états spatio-temporels qui dénotent les états possibles entre l'objet référent A et l'objet cible C (annexe D) [Noyon et al., 2007].

3.5.1 Représentation et raisonnement diagrammatique

Les représentations diagrammatiques et les représentations linguistiques sont complémentaires. L'un des avantages des représentations linguistiques est l'utilisation de mots et de constructeurs pour représenter des concepts abstraits tel que les noms propres ou la négation. Les représentations diagrammatiques sont généralement utilisées pour ne représenter que des concepts concrets et visualiser des situations notamment spatiales qui dans une représentation linguistique sont plus complexes à appréhender. Néanmoins, les représentations diagrammatiques peuvent entraîner des ambiguïtés et des interprétations erronées liées aux notions de distance, de forme ou de relations cardinales qu'elles représentent.

La figure 3.8 propose un exemple tiré de [Barwise et Etchemendy, 1991] et développé dans [Recanati, 2005], où la représentation diagrammatique est plus appropriée que la représentation linguistique pour déterminer une situation spatiale relative. En effet, la représentation diagrammatique décrite linguistiquement est plus complète que la représentation linguistique qui est suffisante à la réaliser. “*T est à gauche de L*”, “*L est à gauche de C*” et “*T est à gauche de C*” décrivent la représentation diagrammatique. A partir d'une représentation linguistique, il faut ajouter la phrase résultante logique des deux phrases énoncées pour obtenir la même description que la représentation diagrammatique. Les principaux avantages des représentations diagrammatiques sont donc [Kulpa, 1994] :

- la représentation explicite et le recueil immédiat des informations notamment spatiales ;
- le contrôle effectif du processus de raisonnement qui peut être guidé par la proximité ou l'adjacence des entités dans le diagramme ;
- le processus de raisonnement et son résultat sont plus naturels et mieux compréhensibles par l'humain.

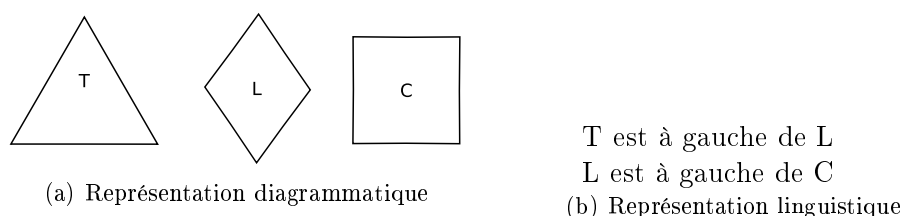


Figure 3.8 — Représentation diagrammatique et linguistique d'une situation spatiale

Le raisonnement diagrammatique manipule les représentations diagrammatiques des données afin d'établir un résultat à partir de ces données. L'exemple de [Barwise et Etchemendy, 1991] proposé dans [Recanati, 2005] permet, via la représentation diagrammatique des situations possibles, d'identifier les cas possibles et les cas impossibles afin de résoudre le problème énoncé (figure 3.9). Dans un premier temps, la résolution linguistique (figure 3.9(b)) du problème posé (figure 3.9(a)) doit illustrer la situation spatiale des chaises et dans un second temps, procéder à la résolution du problème en énumérant toutes les situations envisageables. Avec le raisonnement diagrammatique (figure 3.9(c)), la rangée des cinq chaises est représentée par cinq traits alignés, les personnes assises sur les chaises ont leur nom (A, B, C ou D) écrit au-dessus des traits et la place libre entre A et C est signifiée par “x”. Les symboles utilisés dans la figure 3.9(c) étant définis, les trois cas sont aisément lisibles et analysables. Dans le cas 2, *P3* ne peut pas être satisfaite et dans le cas 3, *P2* ne peut pas être satisfaite. Les personnes se trouvant aux extrémités sont : A et B ou A et D.

Les cas symétriques où A et C sont inversés ne sont pas illustrés et impliquent les mêmes conclusions que les trois cas présentés.

Soit quatre personnes A, B, C, D et une rangée de cinq chaises

P1 : Entre A et C, une chaise doit être libre

P2 : C doit être plus proche du centre que D

P3 : B doit être assis à côté de D

(a) Représentation linguistique du problème

Soit a, b, c, d, e, cinq chaises deux à deux distinctes

Soit A, B, C, D quatre personnes deux à deux distinctes

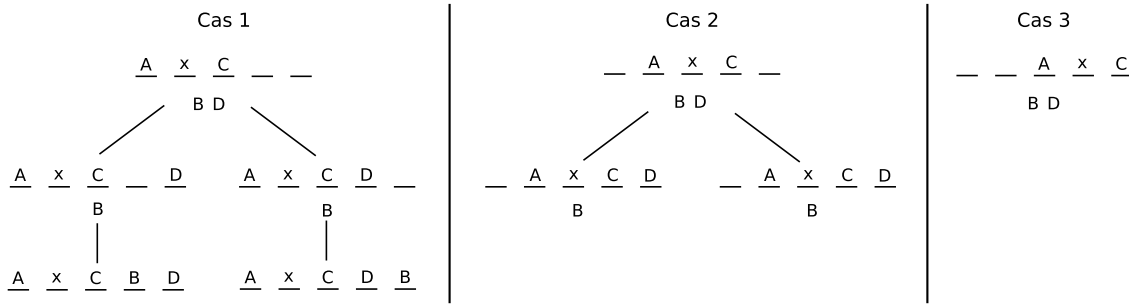
Placement des chaises : a est à gauche de b, b est à gauche de c, ...

Cas 1 : A est assis sur a, C est assis sur c, b est vide, ...

Cas 2 : A est assis sur b, C est assis sur d, c est vide, ... P3 ne peut pas être satisfaite

Cas 3 : A est assis sur c, C est assis sur e, d est vide, ... P2 ne peut pas être satisfaite

(b) Raisonnement linguistique



(c) Raisonnement diagrammatique

Figure 3.9 — Exemple de raisonnement diagrammatique

Les règles du raisonnement diagrammatique ont été formalisées dans [Barwise et Etchemendy, 1991] [Hammer, 1993] [Hammer, 1994] [Shin, 1991] [Wang et Lee, 1993]. Des études et des créations de tables de composition ont été réalisées à partir de raisonnements diagrammatiques dans des contextes d'applications spatiales [Van de Weghe et al., 2005] [Schlieder, 1996].

3.5.2 Construction des tables de composition

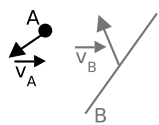
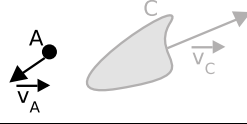
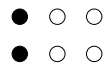
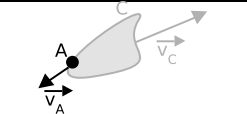
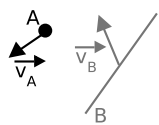
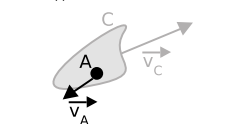
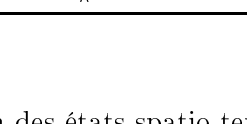
Les tables de composition représentent les états dans lesquels l'objet cible *C* se trouve lorsque l'objet référent *A* est en relation avec l'objet cible *B* et l'objet *B* est en relation avec l'objet cible *C*. Via un raisonnement diagrammatique sur les représentations des deux états spatio-temporels, les états spatio-temporels de l'objet cible *C* dans le référentiel de l'objet *A* sont dérivés.

Pour la construction de la table 3.12, le raisonnement diagrammatique entre chaque état spatio-temporel est énoncé à l'annexe C. Les tableaux 3.9, 3.10 et 3.11 illustrent trois exemples des raisonnements diagrammatiques de la composition de deux états spatio-temporels entraî-

nant un ou plusieurs états spatio-temporels entre les objets A et C . Dans ces tableaux, la première colonne représente l'état de l'objet cible B en relation avec l'objet A et la première ligne représente l'état dans lequel est l'objet cible C en relation avec l'objet B . Dans la dernière colonne, la représentation diagrammatique des états de l'objet C en relation avec l'objet A est récapitulée. Les trois cellules intermédiaires de la seconde ligne représentent les relations existantes entre C et A lorsque la vitesse relativisée varie et la position relative positive reste stable. Les trois cellules de la troisième ligne représentent les relations entre C et A lorsque la vitesse relativisée varie et la position relative est nulle et stable. Dans le cas où l'objet référent A est un point, les trois cellules où la position relative est nulle regroupent les cas où le point est dans le polygone et le cas où le point est à la frontière du polygone.

Dans le tableau 3.9, les relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$ sont composées. La vitesse relativisée v_{AB} est négative et la position relative p_{AB} est positive, B est donc plus rapide que A et B est à l'extérieur de A . De plus, la vitesse relativisée v_{BC} est négative et la position relative p_{BC} est positive, C est donc plus rapide que B , et C est à l'extérieur de B . Avec les représentations diagrammatiques des états spatio-temporels entre les objets A , B et C , la détermination des relations entre A et C est immédiate, C est plus rapide que A et C peut être à l'extérieur ou à la frontière de A , c'est-à-dire A peut être à la frontière ou à l'intérieur de C . L'objet référent A étant un point, seules les configurations "être à l'extérieur" et "être à la frontière" sont possibles et la position relative p_{AC} est positive lorsque A est à l'extérieur de C et nulle lorsque A est à la frontière ou à l'intérieur de C . Les états spatio-temporels possibles entre A et C sont donc la disjonction de $A(v^-p^+)C$ et $A(v^-p^0)C$.

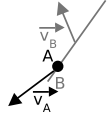
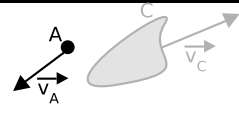
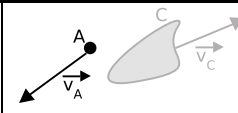
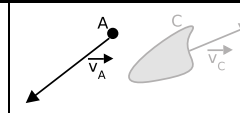
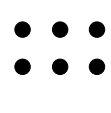
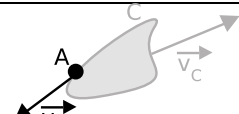
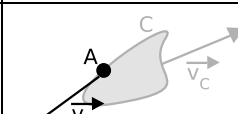
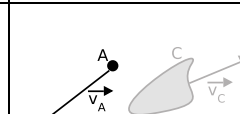
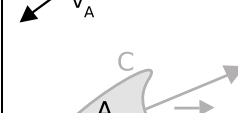
Tableau 3.9 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$

				
				
		$\perp$	$\perp$	
		$\perp$	$\perp$	
				

La composition des états spatio-temporels $A(v^+p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$ (tableau 3.10) ne permet pas de déterminer précisément les états spatio-temporels existants entre les objets A et C . En effet, B est à la frontière de A et C est à la frontière de B (B peut être à la frontière de C ou en partie à l'intérieur de C), la position relative p_{AC} entre les objets A et C peut donc être soit positive, soit nulle ou soit négative. De plus, B est moins rapide que A et C est plus rapide que A , il est alors possible que C soit moins rapide que A , soit plus rapide que A ou ait la même vitesse que A , la vitesse relativisée peut donc être positive, nulle ou négative. Le résultat de cette composition est donc l'ensemble des états spatio-temporels existants entre

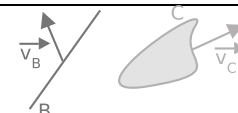
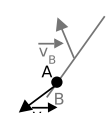
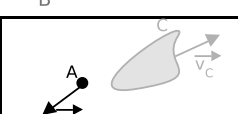
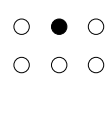
un point et un polygone.

Tableau 3.10 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$

Dans le cas de la composition entre les états spatio-temporels $A(v^0p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$ (tableau 3.11), un seul état spatio-temporel est possible entre les objets A et C . Les vitesses relativisées v_{AB} et v_{BC} sont nulles, et B est à la frontière de A et C est à l'extérieur de B . Le seul état spatio-temporel possible entre A et C est donc défini par la vitesse relativisée v_{AC} nulle (les normes de vecteurs vitesse sont identiques) et la position relative p_{AC} positive.

Tableau 3.11 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$

				
	$\perp$		$\perp$	
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Dans la table 3.12, la première colonne représente les différents états spatio-temporels entre l'objet référent A et l'objet cible B et la première ligne représente les états spatio-temporels entre l'objet B et l'objet C . Chaque cellule de la table au croisement de la première colonne et de la première ligne représente l'ensemble des états spatio-temporels entre l'objet A et l'objet C résultant de la composition des relations entre A et B et entre B et C de la première colonne et de la première ligne (annexe C). Le résultat de toutes les compositions entre deux états spatio-temporels donne trente six cas possibles où sept résultats sont uniques et où vingt et un cas permettent de déterminer si la position relative est positive ou nulle ou

si la vitesse relativisée est positive, nulle ou négative.

Tableau 3.12 — Composition point $\times$ polyligne $\times$ polygone

	$\bullet \circ \circ$ $\circ \circ \circ$	$\circ \bullet \circ$ $\circ \circ \circ$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \circ$	$\circ \circ \circ$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \circ \circ$ $\circ \bullet \circ$	$\circ \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$
$\bullet \circ \circ$ $\circ \circ \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$	$\bullet \bullet \bullet$ $\bullet \bullet \bullet$	$\bullet \bullet \bullet$ $\bullet \bullet \bullet$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$
$\circ \bullet \circ$ $\circ \circ \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$	$\circ \bullet \circ$ $\circ \bullet \circ$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \bullet \circ$ $\circ \bullet \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$
$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \circ$	$\bullet \bullet \bullet$ $\bullet \bullet \bullet$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\bullet \bullet \bullet$ $\bullet \bullet \bullet$
$\circ \circ \circ$ $\circ \circ \bullet$	$\bullet \bullet \bullet$ $\circ \circ \circ$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \circ$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \circ$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\bullet \bullet \bullet$ $\bullet \bullet \bullet$
$\circ \circ \circ$ $\circ \bullet \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\circ \circ \circ$	$\circ \bullet \circ$ $\circ \circ \circ$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \circ$	$\circ \circ \bullet$ $\circ \circ \bullet$	$\circ \bullet \circ$ $\circ \bullet \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$
$\circ \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\circ \circ \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\circ \circ \circ$	$\bullet \bullet \bullet$ $\circ \circ \circ$	$\bullet \bullet \bullet$ $\bullet \bullet \bullet$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$	$\bullet \circ \circ$ $\bullet \circ \circ$

3.5.3 Discussion

L'analyse des tables de composition d'états spatio-temporels nous amène à formuler quelques remarques générales (annexe D).

Des similitudes apparaissent entre les tables de composition de deux objets A et B et un polygone C (par exemple la table 3.15 entre deux points et un polygone) et les tables de composition de deux objets A et B et d'une polyligne C (par exemple la table 3.16 entre deux points et une polyligne). Les relations entre les objets A et C sont identiques que l'objet C soit un polygone ou une polyligne. La position relative entre deux objets représente les relations spatiales “être en partie ou entièrement à l'intérieur” de l'objet référent, “être en partie ou entièrement à la frontière (et pas du tout à l'intérieur)” de l'objet référent ou “être entièrement à l'extérieur” de l'objet référent. Les notions de partiellement et entièrement de la définition de la position relative s'appliquent essentiellement pour les polygones et les polygones. En effet, un point est toujours entièrement contenu à l'intérieur, à la frontière ou à l'extérieur de l'objet référent. Le fait qu'une polyligne et un polygone ne soient pas des objets ponctuels implique que “être partiellement (à la frontière ou à l'intérieur)” s'applique aux deux notions et qu'il existe une similitude des états spatio-temporels entre les objets A et C lorsque C est une polyligne ou un polygone.

La représentation diagrammatique de la composition entre les relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ dans les tables de composition 3.15 et 3.16 permet de vérifier que les relations entre A et C sont identiques lorsque C est un polygone ou une polyligne (tableaux 3.13 et 3.14). Lorsque le point A est à l'extérieur du point B et le point B est à la frontière du polygone ou de la polyligne C , le point A peut être à l'extérieur, à la frontière ou à l'intérieur du polygone, ou à l'extérieur ou à la frontière de la polyligne C . De plus, B est moins rapide que A et C est plus rapide que B , C peut donc être plus rapide, moins rapide que A ou avoir la même norme des vecteurs vitesse que A , et la vitesse relativisée peut être positive, nulle ou négative. Dans les deux cas présentés, les relations résultant de la composition $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ sont

représentés par la disjonction des six états possibles entre un point et un polygone ou une polyligne.

Tableau 3.13 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ (A point, B point et C polygone)

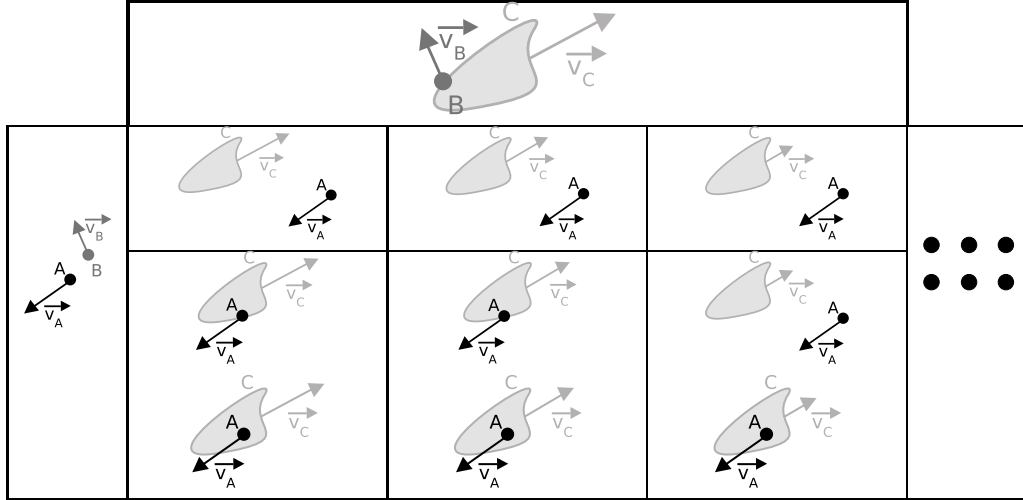
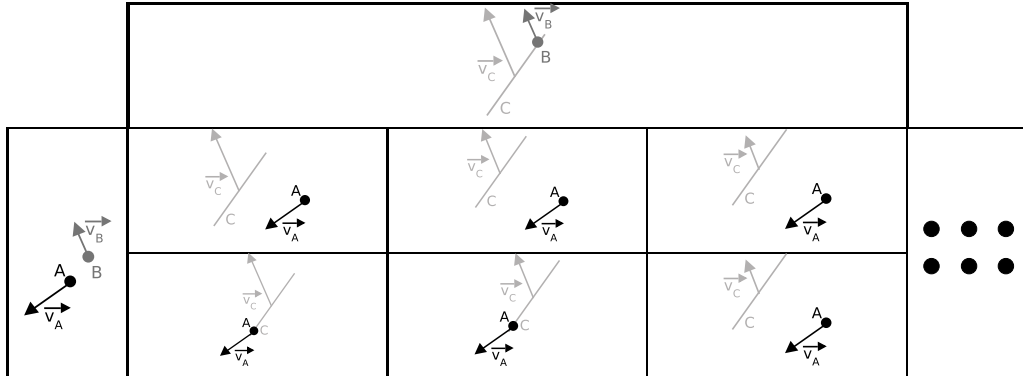


Tableau 3.14 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ (A point, B point et C polyligne)



Le fait qu'un point ne peut être qu'entièrement à l'intérieur, à la frontière ou à l'extérieur d'un objet implique aussi que les états spatio-temporels résultants entre les objets A et C lorsque C est un point (tableau 3.18) sont un sous-ensemble des relations existantes entre les objets A et C lorsque C est un polygone ou une polyligne. La représentation diagrammatique des états spatio-temporels $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ du tableau 3.17, lorsque A , B et C sont des points complète la représentation de la composition de ces états spatio-temporels lorsque A et B sont des points et C un polygone ou C une polyligne (tableaux 3.13 et 3.14). En effet, lorsque le point A est à l'extérieur du point B et que B et C ont la même localisation, A et C ont des localisations différentes et les points A et C étant plus rapides que le point B , la vitesse relativisée entre les deux points peut être positive, nulle ou négative. Les états spatio-temporels entre les points A et C sont représentés par la disjonction des états spatio-

Tableau 3.15 — Composition point $\times$ point $\times$ polygone

Tableau 3.16 — Composition point $\times$ point $\times$ polyligne

temporels où la position relative est positive. Cet ensemble d'états spatio-temporels est un sous-ensemble des états spatio-temporels entre un point A et un polygone ou une polyligne C .

Dans le cas particulier où les trois objets sont identiques (trois polygones, polylignes ou points), les états spatio-temporels résultants de la combinaison des états spatio-temporels entre A et B et entre B et C lorsque A , B et C sont des points, est un sous-ensemble des états spatio-temporels résultants lorsque A , B et C sont des polylignes qui lui même est un sous-ensemble des résultats entre trois polygones (tables D.1, D.14 et D.27).

Les états spatio-temporels résultants de la combinaison de deux états spatio-temporels existants représentent soit un seul état spatio-temporel, soit la disjonction des états spatio-temporels où la position relative est positive, nulle ou négative et la vitesse relativisée n'est pas

Tableau 3.17 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$ (A point, B point et C point)

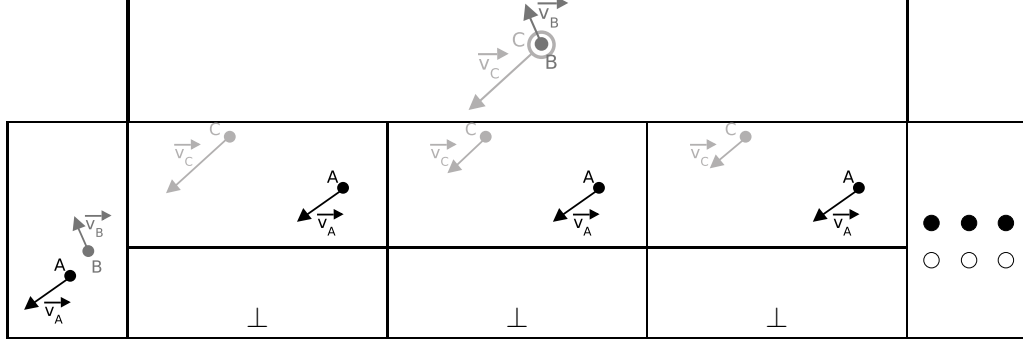


Tableau 3.18 — Composition point $\times$ point $\times$ point

		● ○ ○	○ ● ○	○ ○ ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
		○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ●	○ ● ○	● ○ ○
● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ● ●	● ● ●	● ○ ○	● ○ ○
	○ ○ ○	● ○ ○	○ ● ○	○ ○ ●	○ ○ ●	○ ● ○	● ○ ○
○ ○ ●	● ● ●	○ ○ ●	○ ○ ●	○ ○ ●	○ ○ ●	○ ○ ●	● ● ●
	○ ○ ○	● ● ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
○ ○ ○	● ○ ○	○ ● ○	○ ○ ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
○ ○ ○	● ○ ○	○ ○ ○	● ● ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○

déterminée, ou soit la disjonction des états spatio-temporels où la vitesse relativisée est positive, nulle ou négative et la position relative n'est pas déterminée. Dans le cas particulier de trois tables de composition dont la table 3.19, neuf disjonctions des états spatio-temporels détermine en partie la position relative. La combinaison entre les états spatio-temporels $A(v^+p^0)B$, $A(v^0p^0)B$ et $A(v^-p^0)B$ et les états spatio-temporels $B(v^+p^0)C$, $B(v^0p^0)C$ et $B(v^-p^0)C$ ne détermine pas entièrement la position relative. B est en partie ou entièrement à la frontière de A , et C est entièrement à la frontière de B , le point C peut donc être entièrement à l'extérieur de A où entièrement à la frontière de A . Dans le cas des tables D.20 et D.21, les résultats possibles pour les mêmes compositions d'états spatio-temporels sont soit entièrement ou en partie à l'intérieur, soit entièrement ou en partie à la frontière de A .

3.6 Conclusion

Les définitions quantitatives de la position relative et de la vitesse relativisée permettent de dériver une représentation qualitative des états et des processus dérivés de ces mesures et

Tableau 3.19 — Composition polygone $\times$ polyligne $\times$ point

	• ○ ○ ○ ○ ○	○ • ○ ○ ○ ○	○ ○ • ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ •	○ ○ ○ ○ • ○	○ ○ ○ • ○ ○
• ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• • • • • • • • •	• • • ○ ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○	• • • • • • • • •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○	• • • ○ ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○ ○	• • • • • • • • •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ ○	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ ○	• • • • • • ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ • ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ ○	○ • ○ ○ • ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• • • • • • • • •	• • • • • • ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• • • • • • • • •	• • • • • • • • •	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ •	• • • • • • • • •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	• • • • • • • • •

caractérisables dans le langage naturel. La combinaison des mesures du modèle de trajectoires géographiques favorise l'utilisation d'expressions du langage naturel pour caractériser les états spatio-temporels définis. Les changements d'états décrits par des transitions continues entre ces états sont définies et caractérisées dans le langage naturel. Les expressions décrivant les états et les transitions permettent de suivre les changements de position relative et de vitesse relativisée d'un objet cible du point de vue d'un objet référent. Enfin, l'étude des compositions entre les états spatio-temporels orthogonaux possibles d'un premier objet cible du point de vue d'un objet référent, et les états spatio-temporels d'un second objet cible du point de vue du premier objet cible, permet d'établir l'ensemble des états spatio-temporels possibles du second objet cible du point de vue de l'objet référent.

La caractérisation par des expressions élémentaires du langage naturel des trajectoires géographiques dans la représentation de la position relative et de la vitesse relativisée permet une analyse de ces trajectoires. Avec l'ajout des états résultats d'une composition de deux états spatio-temporels connus, une anticipation des états spatio-temporels et une identification des situations intermédiaires entre deux objets mobiles n'étant pas représentés dans le modèle est possible. Le raisonnement qualitatif permet de décrire et d'anticiper les trajectoires géographiques via la représentation de la position relative et de la vitesse relativisée.

Les approches conventionnelles de représentation des trajectoires géographiques ne décrivent pas directement les concepts de distance et de vitesse qui sont représentés par la

position relative et la vitesse relativisée dans notre modèle. Elles ne permettent donc pas de caractériser ces concepts dans le langage naturel afin d'aider à l'analyse de ces trajectoires. La position relative et de la vitesse relativisée se rapportent à des notions du langage naturel connu et analysable rapidement. Ces mesures sont donc des notions facilement compréhensibles par l'utilisateur, elles ouvrent donc un champ d'expérimentation pertinent pour un développement d'outils de manipulation et de présentation au niveau d'un prototype informatique.

Chapitre 4

VALIDATION DU MODÈLE

4.1 Introduction

Les principes et les possibilités du modèle de représentation et de manipulation de trajectoires sont expérimentés dans un contexte de navigation maritime. Les navires en mouvement constituent les éléments de génération de trajectoires qui sont pris en compte par des architectures et des techniques d'intégration de données que nous présenterons.

Afin de valider notre modèle, nous développons une approche duale de la représentation de trajectoires intégrée au sein d'une interface où la visualisation absolue cartographique est complétée par une visualisation relative. Cette interface permet de visualiser graphiquement les données présentes dans une base de données de trajectoires spatio-temporelles alimentée par des systèmes de géolocalisation maritimes selon la séquence de traitement suivante (figure 4.1) :

- lors de leurs déplacements, les navires transmettent leurs positions à intervalle de temps régulier via les AIS,
- les informations reçues sont traitées afin d'être intégrées dans une base de données de trajectoires spatio-temporelles,
- afin de visualiser les informations relatives, les données sont interpolées afin d'être identifiées à chaque instant,
- la visualisation des données absolues et relatives est réalisée en temps réel ou en temps différé.

La première partie de ce chapitre présente le contexte de la navigation maritime dans lequel s'intègre l'interface développée (section 4.2). Les sections 4.3 et 4.4 présentent respectivement les principes de traitement, d'intégration de données spatio-temporelles de trajectoires, et de visualisation de ces données. La section 4.5 développe l'approche retenue pour la visualisation graphique des trajectoires et des processus sous-jacents, et les principes de conception de l'interface. La section 4.6 introduit les principes de manipulation de l'interface. Une validation expérimentale du modèle est réalisée dans la section 4.7 à partir de l'étude de comportements d'utilisateurs mis en condition de manipulation de notre interface.

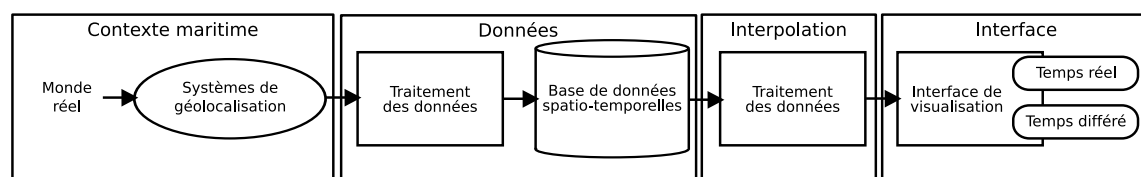


Figure 4.1 — Schéma d'ensemble pour la visualisation de trajectoires maritimes

4.2 Contexte d'étude

4.2.1 Surveillance maritime

La fréquentation des côtes atlantiques françaises par des navires voyageant des pays nordiques vers les pays africains ou méditerranéens, et inversement, impose une surveillance active de ces déplacements en temps-réel afin de gérer au mieux les actions de prévention et de sauvetage. Cette forte fréquentation maritime, notamment dans la Manche et au niveau de la pointe bretonne, a entraîné une mise en place progressive de systèmes de gestion du trafic de plus en plus performants par les autorités françaises et anglaises. Depuis la fin des années 60, ces autorités ont notamment créé des routes maritimes au sein desquelles les navires ont l'obligation de se déplacer [Guibert, 1994]. Les Dispositifs de Séparation de Trafic (DST) sont situés aux endroits où les navires sont les plus nombreux, et où les passages sont étroits ou critiques, par exemple à la pointe bretonne avec le DST de Ouessant, dans la Manche avec les DST des Casquets et du Pas-de-Calais.

L'Organisation Maritime Internationale (OMI) a également exigé une surveillance de ces DST par des autorités qui recueillent et analysent les données, informent les navires et gèrent l'assistance des navires en détresse. Ces autorités sont présentes en France au sein des Centres Régionaux Opérationnels de Surveillance et de Sauvetage (CROSS). Lorsqu'un navire entre dans un DST, il doit alors s'identifier auprès du centre de surveillance via une communication radio. Dans ce compte-rendu radio, les informations transmises sont l'identité du navire, sa position, sa route et ses avaries éventuelles [Guibert, 2001]. Ce compte-rendu n'est cependant pas automatique, il est donc possible qu'un navire entrant dans un DST n'effectue pas cette communication au CROSS et ne donne ainsi aucune information. Les autorités de surveillance n'ont donc pas accès à toutes les informations relatives au navire. Ce constat a donc engendré des mesures complémentaires telles que la mise en place sur les navires d'émetteurs automatiques des positions de type AIS. Les CROSS sont également équipés de moyens de communication et de visualisation de données spatiales tels que les radars qui peuvent identifier les navires et suivre leurs déplacements. Toutes ces mesures ont engendré une diminution des collisions et des échouements des navires.

4.2.2 Outils d'aide à la navigation maritime

Les navires sont de leur côté équipés de radar et de logiciels répondant à la norme Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) (figure 4.2(a)). Des logiciels de cartographie maritime sont développés pour répondre à cette norme ECDIS définie dans la résolution OMI A/817(19). Ils permettent de visualiser les côtes, les zones portuaires, les DST ou encore les hauts fonds via des cartes électroniques maritimes. Les positions actuelles, les vecteurs vitesses, et les trajectoires des navires dans l'environnement du navire porteur du logiciel sont

visualisés dans un référentiel cartographique absolu. Les radars complètent ces informations avec une visualisation relative des positions des navires proches (figure 4.2(b)). Le navire sur lequel le radar est positionné se trouve au centre de la visualisation. L'axe des ordonnées pointe vers l'avant du navire et l'écho des navires proches permet une visualisation de leur position et un calcul de leur vitesse. A partir de cette vision radar, la distance entre les navires apparaît explicitement et la vitesse est visualisée textuellement. L'évolution de la distance entre les navires n'est cependant pas directement représentée, l'utilisateur du radar visualise les changements de positions et donc interprète les changements de distance. De même, la valeur de la vitesse visualisée représente la vitesse instantanée du navire cible, son évolution n'est également pas visualisée.

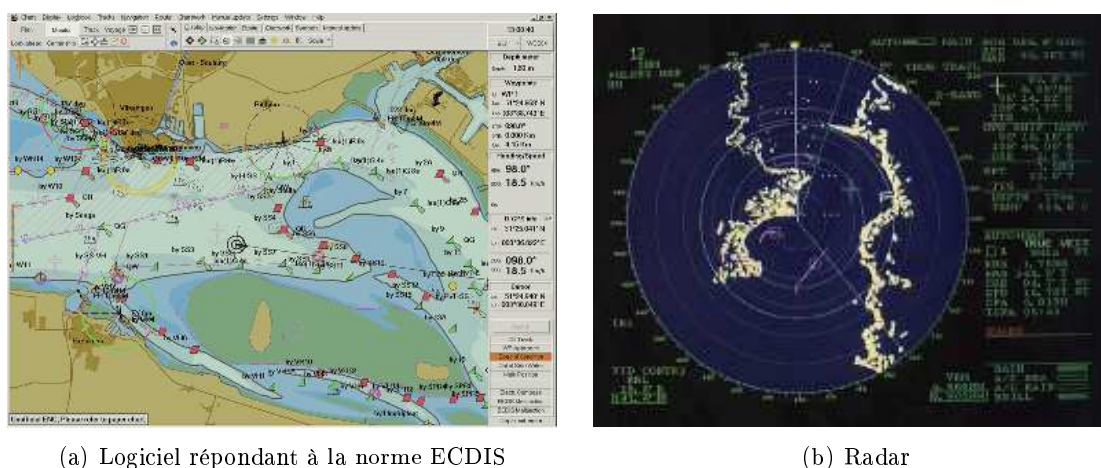


Figure 4.2 — Visualisations ECDIS et radar de données maritimes

4.2.3 Transmission des données maritimes

Des récepteurs Very High Frequency (VHF) sont utilisés pour transmettre et recevoir les informations de positionnement entre les navires et les CROSS. Pour l'aide au positionnement d'un navire dans le cas d'un sauvetage, un système d'identification et de positionnement actif tel que l'AIS doit être mis en place sur les navires. Le chapitre V de la convention SOLAS (Safety Of Life At Sea*) impose que les navires de plus de 300 tonnes, les navires transportant des passagers et les pétroliers aient l'obligation d'être équipés d'un AIS. L'OMI (Organisation Maritime Internationale) prévoit l'installation obligatoire de l'AIS sur les navires de commerce pour la fin de l'année 2007. L'AIS est un système embarqué couplé à une antenne VHF pour émettre et recevoir les informations, à un GPS et son antenne afin de calculer la position, à un compas pour déterminer le cap, et à un loch** pour calculer la vitesse du navire. Le calcul des informations de géolocalisation et de déplacement est effectué puis transmis automatiquement par VHF aux récepteurs autour du navire porteur de l'AIS. Les différentes informations sont transmises dans des messages dédiés aux informations dynamiques comme la position, la vitesse ou le cap, ou aux informations statiques comme la cargaison, le port de départ et d'arrivée. Ces différents messages sont classés en vingt-deux types ayant chacun une fonction

*Traité international visant à définir différentes règles pour la protection des navires marchands.

**Un loch est un instrument permettant de calculer la vitesse à partir de la distance parcourue sur un intervalle de temps.

particulière (annexe E). Ces messages ne sont pas envoyés à la même fréquence : les messages de type 1 relatifs aux informations dynamiques (position, cap, vitesse, ...) sont, par exemple, transmis à des intervalles plus courts que les messages de type 5 liés aux informations statiques (cargaison, nom et dimension du navire) (annexe E).

La mise en place progressive de l'AIS permet de visualiser automatiquement les trajectoires des navires en temps-réel, par exemple, avec le couplage de ce système à un logiciel répondant à la norme ECDIS. Les informations transmises sont généralement visualisées dans une vue absolue cartographique et complétée par une visualisation relative des positions (généralement un radar) (figure 4.2). Ces systèmes donnent aussi une visualisation textuelle et instantanée des valeurs de vitesse et de cap.

4.2.4 Nouveaux outils d'observation et de navigation maritime

Du point de vue technique, l'amélioration de la sécurité maritime bénéficie de la conjonction de plusieurs développements techniques : l'AIS, le GPS, la mise en place de réseaux de communication aériens, la transmission à grande échelle des informations, les différentes visualisations de l'environnement et l'analyse des accidents par la simulation des déplacements.

Depuis 2001, la Marine nationale développe le projet SPATIONAV où les informations de positionnement provenant de radar et d'AIS sont mises en commun. La prise en compte du facteur humain à travers la connaissance des règles de navigation et leur interprétation, c'est-à-dire des informations connues par les acteurs de la surveillance maritime, améliore les situations critiques. Des projets comme le projet eX-TREM du pôle Mer Bretagne ou le projet NavTrack de l'Ecole navale et du Technopôle Brest Iroise développent l'utilisation de réseaux Wifi et Wimax pour les transmissions de données en zone côtière. L'accessibilité à ces réseaux par les navires doit permettre, dans le cas du projet eX-TREM, de transférer des cartes numériques ou encore des vidéosurveillances de navigation maritime. Dans le projet NavTrack, l'Ecole navale et le Technopôle Brest Iroise ont développé, dans le cadre du suivi en temps-réel de compétitions nautiques, un système de transmission d'informations et de géolocalisation des navires par l'utilisation de GPS (figure 4.3(a)) [Petit et al., 2006].

Pour l'aide à la navigation, une visualisation en trois dimensions des hauts fonds et des côtes est développée à l'Université de Glamorgan [Stroh et Schuldt, 2006]. Cette visualisation aide à l'évitement des échouements par la visualisation immédiate des différents niveaux des fonds marins (figure 4.3(b)). Enfin, une représentation des règles de navigation dans la simulation de trajectoires lors d'un accident maritime permet de visualiser et comprendre les erreurs lors des manoeuvres d'évitement (figure 4.3(c)) [Fournier, 2005].

Ces nouveaux outils répondent à plusieurs objectifs : améliorer les systèmes de vision centralisée d'une région maritime et de son trafic, ou rechercher de nouveaux modes de présentation et de visualisation des données de navigation maritime pour les travaux expérimentaux menés par les laboratoires de recherche. Notre démarche, de ce point de vue, rentre dans le cadre de ces derniers développements expérimentaux.

4.3 Intégration de données de trajectoires maritimes

Les supports expérimentaux et techniques de notre prototype ont été en partie réalisés dans le cadre de plusieurs projets d'élèves ingénieurs effectués en partenariat avec l'Université de La Rochelle [Baumert et Schermesser, 2006].

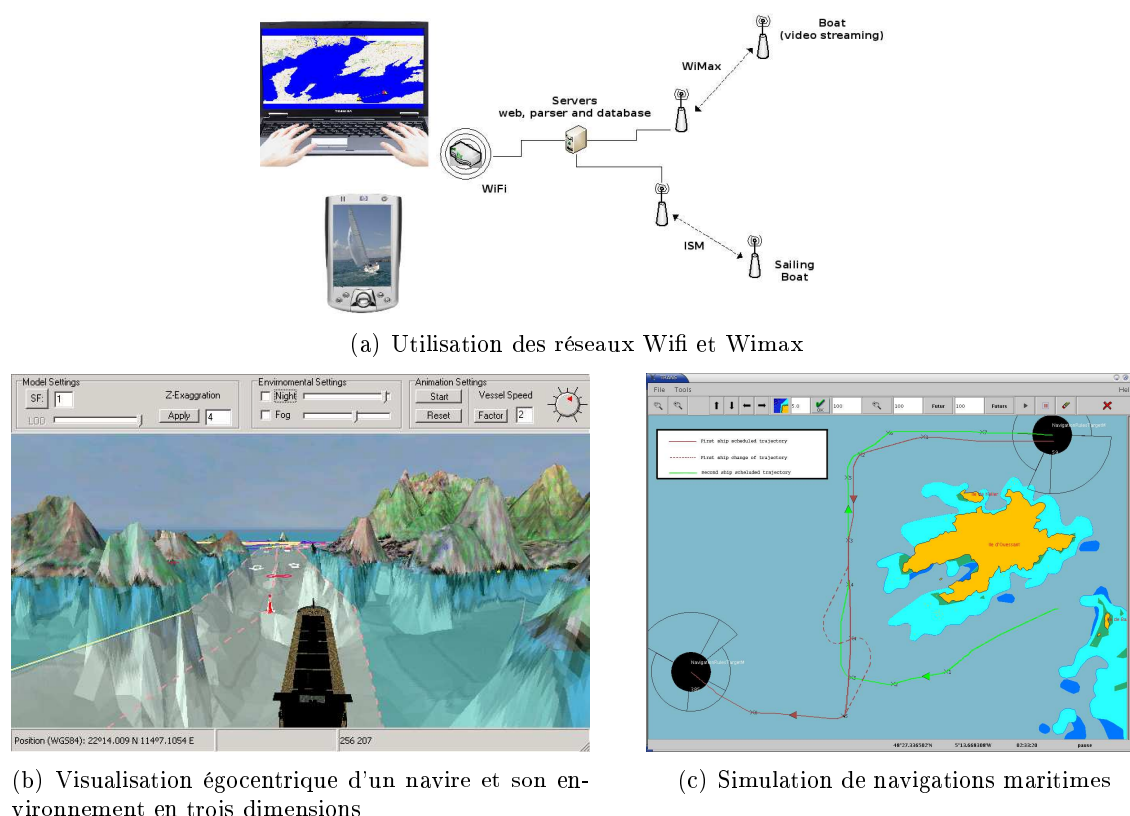


Figure 4.3 — Nouveaux outils d'aide à la navigation maritime

Afin de fournir à notre prototype des données de trajectoires maritimes en entrée, deux récepteurs AIS ont été mis en place dans les ports de La Rochelle et du Technôpole Brest Iroise. Les données maritimes réelles reçues et stockées conservent l'historique des positions des navires dans les zones maritimes de ces deux ports. Les positions de navires calculées à partir de GPS sont intégrées dans le système AIS qui les transmet avec les informations comme la vitesse et le cap dans un message de type 1, 2, ou 3 (annexe E) via les ondes VHF. Les récepteurs AIS sont connectés à des ordinateurs qui traitent les données et les insèrent dans un ensemble de tables spatio-temporelles.

L'ensemble des entités spatio-temporelles prennent actuellement en compte les messages de type 1 pour les données dynamiques et de type 5 pour les données de route des différents navires qui sont les messages les plus régulièrement transmis (annexe E). Les données stockées représentent les informations liées au navire, à la route du navire, au déplacement du navire. Ces données sont stockées dans différentes entités relationnelles selon le schéma conceptuel présenté dans la figure 4.4 : l'entité relationnelle *Ship* qui stocke les informations sur le navire, l'entité *AdditionnalData* stocke les informations sur le voyage, et l'entité *PositionTable* représente les informations sur le déplacement du navire. Les données de cette dernière entité sont celles qui sont utilisées dans le modèle : la position relative est calculée avec les longitudes et les latitudes des navires, et la vitesse relativisée est calculée à partir des caps et des vitesses des mêmes navires.

Les données reçues par l'AIS sont transmises en code ASCII via son port COM. Ces messages sont traités pour que les données soient stockées dans des tables spatio-temporelles

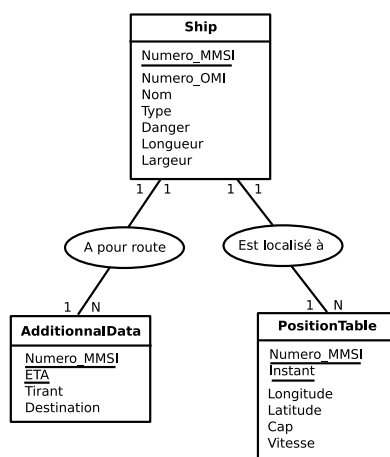


Figure 4.4 — Schéma conceptuel simplifié des données de navigation maritime

correspondant aux informations transmises. Chaque nouveau message est précédé d'un ensemble de symboles permettant de connaître le début d'un message. Par exemple "*!AIVDM*" ou "*!AIVDO*" est décomposé comme le premier message de la figure 4.5, sous la forme suivante :

```

!AIVDM,
[nombre de trames émanant du même message], 1
[position de la trame], 1
[fréquence de travail], B
[corps du message], 137uCF0vh1wcQqhKciSbt4=iHHQs
[nombre de bites de bourrage]*[checksum] 0*65

```

Le corps du message est traduit en bits puis décomposé en plusieurs ensembles de bits suivant le type de message.

```

!AIVDM,1,1,,B,137uCF0vh1wcQqhKciSbt4=iHHQs,0*65
!AIVDM,1,1,,B,144i?p001BwcAKHKbi1S=2Qh00RV,0*07
!AIVDO,1,1,,1000nUhP00Obl:PK'4e7Uwwj0000,0*3E
!AIVDO,1,1,,1000nUhP00Obl:PK'4e7TOw10000,0*01
!AIVDM,1,1,,A,402:0q1uHEfb0O'oavKg?q100H00,0*05
!AIVDM,1,1,,A,D02:0q2<Tvfp7iN9H0,4*2B
!AIVDM,1,1,,A,F02:0q22N2P3D73EB6'>6bT20000,0*44
!AIVDO,1,1,,1000nUhP00Obl:PK'4e8iwwn0000,0*09
!AIVDM,1,1,,A,138I<P000eOcW7JKcduQFA4205j',0*0C
!AIVDO,1,1,,1000nUhP00Obl:PK'4eGKgv00000,0*1B
!AIVDM,1,1,,A,139NOF0027OVQElKQnee?b'20<0E,0*3C
!AIVDM,1,1,,B,14TH2D0P00Oclh'KRBNP0?wj05j',0*3A
!AIVDO,1,1,,1000nUhP00Obl:PK'4eGkvw20000,0*29

```

Figure 4.5 — Exemple de messages reçus par un AIS récepteur

4.4 Interpolation des données

Les navires ne pouvant pas tous envoyer les informations dynamiques simultanément, les positions de tous les navires ne sont pas connues au même instant. La visualisation absolue des positions sur une carte est possible, mais la visualisation de la position relative et de la vitesse relativisée ne sont envisageables que pour des positions absolues valides au même instant. Afin de connaître la position d'un navire à chaque instant, celle-ci doit être interpolée.

Nous considérons qu'une courbe matérialise une trajectoire passant par des positions connues, les positions intermédiaires doivent être calculées. Une telle courbe peut être décrite comme une fonction sous forme cartésienne :

$$y = a * x + b \quad (4.1)$$

Elle peut aussi être décrite sous une forme paramétrique :

$$x = \alpha * t + \beta \text{ et } y = \gamma * t + \theta \quad (4.2)$$

où l'intervalle de temps de calcul est généralement ramené à l'intervalle unitaire $[0, 1]$. Dans la mesure où l'interpolation doit permettre de définir des positions à différents instants, la forme paramétrique des fonctions est celle qui est retenue. Sous forme paramétrique, une fonction est définie pour chaque mesure. Dans le cas des trajectoires des navires, quatre fonctions sont décrites pour la longitude, pour la latitude, pour le cap et pour la vitesse.

Dans le cas des données réelles, la fréquence des données transmises est donnée suivant les conditions de déplacement du navire (tableau 4.1). Lorsqu'un navire n'est pas à quai, la fréquence maximale d'envoi des informations dynamiques est de 12 s, et cette fréquence diminue lorsque la vitesse augmente, et elle est plus grande lorsqu'il y a un changement de cap [Union Internationale des Télécommunications, 1998].

Tableau 4.1 — Fréquence d'émission des informations de trajectoire
[Union Internationale des Télécommunications, 1998]

Condition de déplacement	Fréquence d'émission
A quai ou au mouillage	3 min
0 – 14 noeuds	12 s
0 – 14 noeuds en changeant de route	4 s
14 – 23 noeuds	6 s
14 – 23 noeuds en changeant de route	2 s
> 23 noeuds	3 s
> 23 noeuds en changeant de route	2 s

Pour la transmission d'un message par AIS, un navire réserve à l'avance un créneau de temps pour le prochain envoi de son message. Ce créneau de temps est d'une durée de 26,6ms, une minute étant constituée de 2250 créneaux de temps [Union Internationale des Télécommunications, 1998]. Il est possible que l'envoi d'un message utilise plus d'un créneau de temps, mais dans ce cas le navire ne peut pas obtenir plus

de cinq créneaux de temps consécutifs. En 2006, le nombre de navires détectés et identifiés* dans les zones à fort trafic de la Manche et de la Mer du Nord est d'environ 200 navires par jour dans les voies montantes et descendantes du DST des Casquets et d'environ 160 navires par jour dans les voies montantes du DST du Pas de Calais [Préfecture Maritime, 2007]. Au cap Gris-nez**, environ 70 navires possédant un AIS agissent simultanément [Becquet, 2005]. Si chaque navire en mouvement prend les cinq créneaux de temps qui peuvent lui être alloués et que le navire qui émet son message en premier envoie un message après le message du soixante-dixième navire, le temps écoulé entre les deux envois du premier navire est de moins de 10 s.

La distance parcourue entre deux envois conditionne l'interpolation des données qui peut être utilisée. La vitesse des navires à grande vitesse (NGV) est supérieure à 30 *noeuds* (55,56 km/h). Dans le cas où la vitesse d'un navire est de 35 *noeuds*, il peut donc parcourir environ 180 m, sans changement de cap et de vitesse, entre les deux envois de message.

Nous considérons donc qu'une interpolation linéaire entre deux positions est suffisante sur une distance maximale de 180 m pour des navires. De plus, les changements de cap et de vitesse des navires peuvent être considérés comme petits sur un intervalle de temps de 10 s, une interpolation linéaire entre deux données est donc suffisante. Les nouvelles données interpolées de longitude, de latitude, de cap et de vitesse entre deux données existantes sont donc définies par une fonction de la forme :

$$x(t) = (1 - t) * x_0 + t * x_1, \text{ avec } t \in [0, 1] \quad (4.3)$$

4.5 Principes et objectifs de l'interface de visualisation

Au sein du modèle conceptuel de trajectoires géographiques, les changements de position relative sont mis en évidence. De même, l'évolution de la vitesse relativisée d'un objet cible dans le référentiel d'un objet référent est prise en compte. Nous proposons donc d'utiliser une visualisation graphique de l'évolution de la position relative et de la vitesse relativisée dans une interface graphique. Un environnement de présentation est développé afin d'effectuer un premier test de validation du modèle auprès d'utilisateurs sur des cas d'école. Pour la représentation et la visualisation des cas d'école, il faut simuler des trajectoires non équivoques. Ces données sont calculées à partir d'une position, d'un cap et d'une vitesse de départ, et d'un cap et d'une vitesse d'arrivée. Une interpolation linéaire du cap et de la vitesse est définie à chaque instant. La position est calculée à partir de la position précédente, la vitesse et le cap qui sont interpolés. Les différentes données sont connues à chaque instant, il n'est donc pas nécessaire d'appliquer une fonction d'interpolation pour les positions.

La visualisation graphique de la position relative et de la vitesse relativisée dans une interface graphique va nous permettre de montrer la complémentarité des visualisations relatives et absolues. Elle doit aussi faciliter la visualisation des processus définis dans le chapitre précédent.

La visualisation absolue des trajectoires des objets mobiles situe ces objets dans leur environnement géographique, ainsi que les orientations des déplacements de ces objets, par exemple vers le nord ou l'ouest. La visualisation relative des trajectoires géographiques construite à l'aide de notre modèle permet de visualiser directement la position relative entre deux points et la vitesse relativisée. Dans le cas du calcul de la position relative entre deux

* Ces navires peuvent ou non posséder un AIS.

** CROSS surveillant le DST du Pas de Calais.

navires dont la position est composée d'une longitude et d'une latitude, la distance curviligne* entre ces points est utilisée. Dans cette interface, la fenêtre de gauche présente la visualisation absolue et cartographique des trajectoires, et la fenêtre de droite présente un graphique orthogonal dans lequel la représentation de la position relative et la vitesse relativisée sont visualisées lorsqu'un objet mobile référent est choisi (figure 4.6).

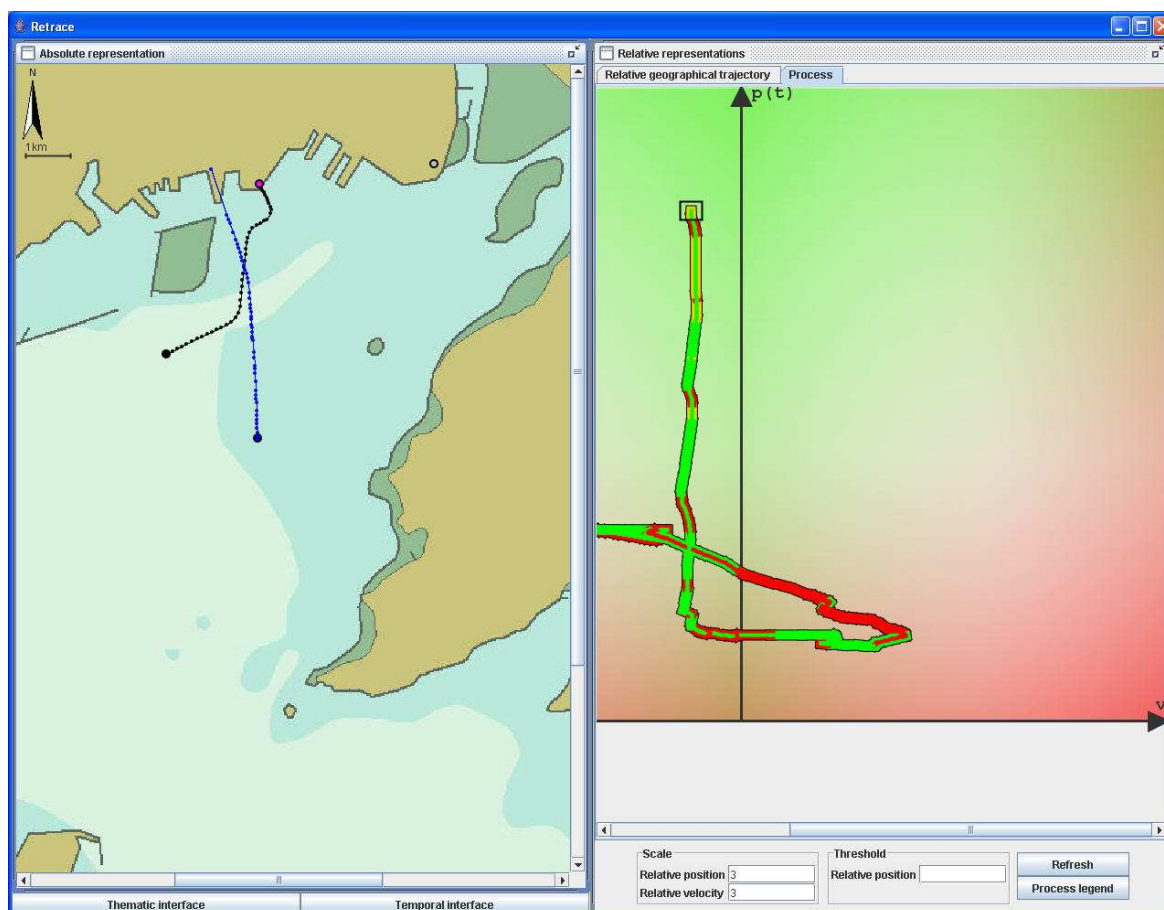


Figure 4.6 — Interface graphique des visualisations absolues et relatives

La visualisation relative dans l'interface présentée donne une lecture implicite des différents processus présentés dans le chapitre précédent (figure 4.6). Leur visualisation graphique s'appuie sur les trajectoires utilisant des couleurs communément utilisées pour signifier un danger : rouge pour très dangereux, orange pour dangereux et vert pour pas dangereux. La représentation de la vitesse relativisée par les deux symboles lignes sur l'extérieur de la trajectoire relative est :

- rouge, lorsque la vitesse relativisée s'éloigne de la valeur nulle,
- orange, lorsque la vitesse relativisée est stable,
- vert, lorsque la vitesse relativisée se rapproche de la valeur nulle.

*La distance curviligne d entre deux points dont les coordonnées sont (lo_1, la_1) et (lo_2, la_2) est calculée par l'équation : $d = R \times \arccos(\sin(la_1) \times \sin(la_2) + \cos(la_1) \times \cos(la_2) \times \cos(lo_2 - lo_1))$, avec R le rayon de la Terre en mètres.

La représentation de la position relative par le symbole ligne à l'intérieur de la trajectoire relative est :

- rouge, lorsque la position relative se rapproche de la valeur nulle,
- orange, lorsque la position relative est stable,
- vert, lorsque la position relative s'éloigne de la valeur nulle.

Le tableau 4.2 représente la correspondance entre les combinaisons des couleurs et les processus lorsque l'objet référent est plus rapide que l'objet cible, et le tableau 4.3 lorsque l'objet référent est moins rapide que l'objet cible.

Les figures 4.7, 4.8 et 4.9 visualisent les configurations exprimées en langage naturel dans le tableau 4.2. Dans chacune de ces figures, la visualisation de la représentation absolue est à gauche, et la visualisation de la position relative et de la vitesse relativisée est à droite. Dans cette dernière visualisation, la vitesse relativisée est située sur l'axe des abscisses et la position relative est située sur l'axe des ordonnées. La trajectoire relative représente l'évolution des deux mesures, sa couleur intérieure représente l'évolution du processus de la position relative et les couleurs extérieures représentent l'évolution du processus de la vitesse relativisée. Le cadre noir sur la trajectoire relative représente les toutes dernières mesures visualisées, le reste de la trajectoire représente les mesures passées. Lorsque la vitesse relativisée est positive et s'éloigne de l'axe des ordonnées, la couleur extérieure de la trajectoire est rouge (figures 4.9(a), 4.9(b) et 4.9(c)). Lorsque la position relative se rapproche de l'axe des abscisses, la couleur intérieure de la trajectoire est rouge (figure 4.7(c), 4.8(c) et 4.9(c)).

Cette visualisation doit aider à évaluer plus intuitivement la dangerosité des trajectoires relatives. L'interface va donc permettre de présenter des trajectoires à des utilisateurs qui détermineront les trajectoires les plus dangereuses.

4.6 Manipulation de l'interface

L'interface homme-machine permet de visualiser en temps différé les données présentes dans la base de données avec une représentation absolue et une représentation relative. Avec une visualisation en temps différé, les situations particulières amenant à des accidents peuvent être analysées et décrites afin de comprendre les comportements et les actions qui ont menés à cet accident (ex : collision ou échouement). De telles visualisations sont utilisables pour l'apprentissage à la navigation en aidant à solutionner des situations critiques simples ou complexes. Dans le cas d'une visualisation en temps-réel des trajectoires*, les objectifs sont différents : ils permettent d'évaluer des situations et éventuellement de définir des actions à mener afin d'éviter des situations critiques et ainsi prévenir des accidents.

Lors de l'initialisation de l'interface, l'utilisateur choisit la base de données géoréférencée correspondant aux trajectoires qu'il veut visualiser. Après la connexion à cette base, la liste des navires dont les positions sont stockées est visualisée, et l'intervalle de temps de la visualisation des trajectoires est défini. Le temps de la visualisation est différé, le début et la fin de l'intervalle de temps sont connus lors de la connexion à la base de données. Les positions relatives et les vitesses relativisées pour chaque navire sont calculées à chaque instant**. La carte utilisée pour la représentation absolue est une image choisie parmi l'ensemble des images créées par l'utilisateur. Pour créer l'image d'une carte, l'utilisateur enregistre l'image dans un répertoire et crée un fichier dans lequel le chemin de l'image et son géoréférencement sont

*La visualisation temps-réelle des trajectoires n'est pas encore implémentée.

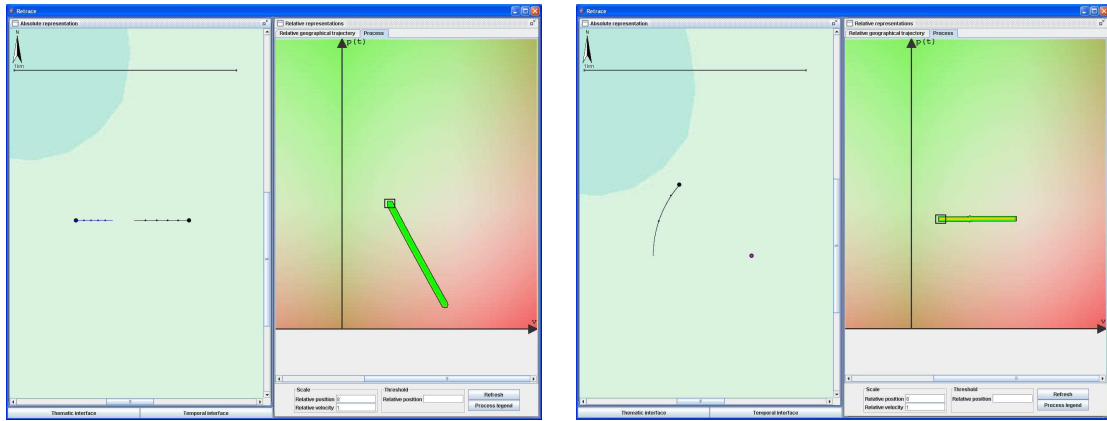
**Dans le prototype, l'intervalle de référence entre deux instants est la seconde.

Tableau 4.2 — Représentation graphique, évolution et processus, lorsque l'objet référent est plus rapide que l'objet cible

Représentation graphique	Evolution	Processus
	La position relative s'éloigne de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'approche de la valeur nulle (figure 4.7(a))	L'objet cible s'éloigne de l'objet référent, et l'objet cible accélère ou l'objet référent décélère
	La position relative ne change pas et la vitesse relativisée s'approche de la valeur nulle (figure 4.7(b))	La distance entre les objets est stable, et l'objet cible accélère ou l'objet référent décélère
	La position relative s'approche de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'approche de la valeur nulle (figure 4.7(c))	L'objet cible se rapproche de l'objet référent, et l'objet cible accélère ou l'objet référent décélère
	La position relative s'éloigne de la valeur nulle et la vitesse relativisée ne change pas (figure 4.8(a))	L'objet cible s'éloigne de l'objet référent, et les vitesses restent stables
	La position relative ne change pas et la vitesse relativisée ne change pas (figure 4.8(b))	La distance entre les objets est stable, et les vitesses sont stables
	La position relative s'approche de la valeur nulle et la vitesse relativisée ne change pas (figure 4.8(c))	L'objet cible se rapproche de l'objet référent, et les vitesses sont stables
	La position relative s'éloigne de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'éloigne de la valeur nulle (figure 4.9(a))	L'objet cible s'éloigne de l'objet référent, et l'objet cible décélère ou l'objet référent accélère
	La position relative ne change pas et la vitesse relativisée s'éloigne de la valeur nulle (figure 4.9(b))	La distance entre les objets est stable, et l'objet cible décélère ou l'objet référent accélère
	La position relative s'approche de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'éloigne de la valeur nulle (figure 4.9(c))	L'objet cible se rapproche de l'objet référent, et l'objet cible décélère ou l'objet référent accélère

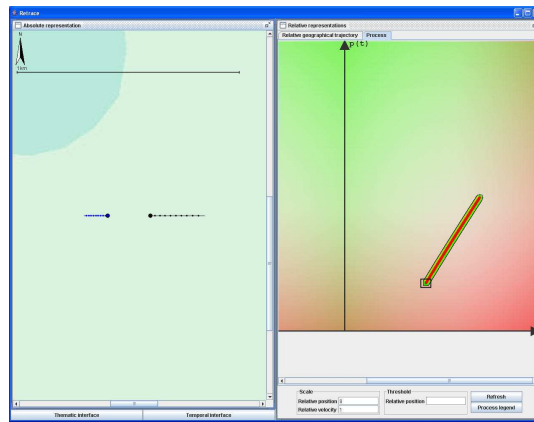
Tableau 4.3 — Représentation graphique, évolution et processus, lorsque l'objet référent est moins rapide que l'objet cible

Représentation graphique	Evolution	Processus
	La position relative s'éloigne de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'approche de la valeur nulle	L'objet cible s'éloigne de l'objet référent, et l'objet cible décélère ou l'objet référent accélère
	La position relative ne change pas et la vitesse relativisée s'approche de la valeur nulle	La distance entre les objets est stable, et l'objet cible décélère ou l'objet référent accélère
	La position relative s'approche de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'approche de la valeur nulle	L'objet cible se rapproche de l'objet référent, et l'objet cible décélère ou l'objet référent accélère
	La position relative s'éloigne de la valeur nulle et la vitesse relativisée ne change pas	L'objet cible s'éloigne de l'objet référent, et les vitesses restent stables
	La position relative ne change pas et la vitesse relativisée ne change pas	La distance entre les objets est stable, et les vitesses sont stables
	La position relative s'approche de la valeur nulle et la vitesse relativisée ne change pas	L'objet cible se rapproche de l'objet référent, et les vitesses sont stables
	La position relative s'éloigne de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'éloigne de la valeur nulle	L'objet cible s'éloigne de l'objet référent, et l'objet cible accélère ou l'objet référent décélère
	La position relative ne change pas et la vitesse relativisée s'éloigne de la valeur nulle	La distance entre les objets est stable, et l'objet cible accélère ou l'objet référent décélère
	La position relative s'approche de la valeur nulle et la vitesse relativisée s'éloigne de la valeur nulle	L'objet cible se rapproche de l'objet référent, et l'objet cible accélère ou l'objet référent décélère



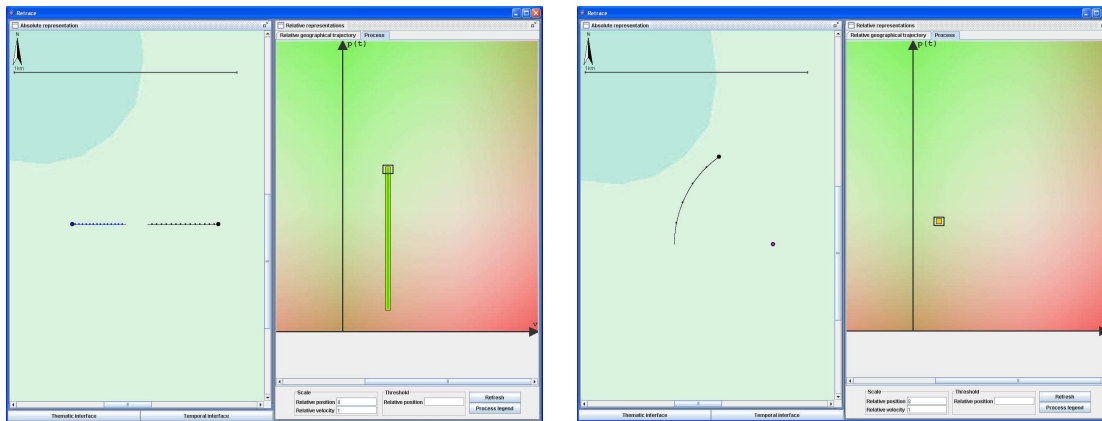
(a) Trajectoire où la position relative augmente

(b) Trajectoire où la position relative est stable



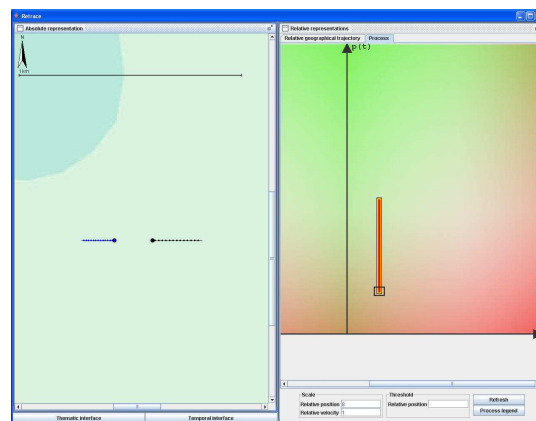
(c) Trajectoire où la position relative diminue

Figure 4.7 — Trajectoires où la vitesse relativisée diminue et les positions relatives sont variables



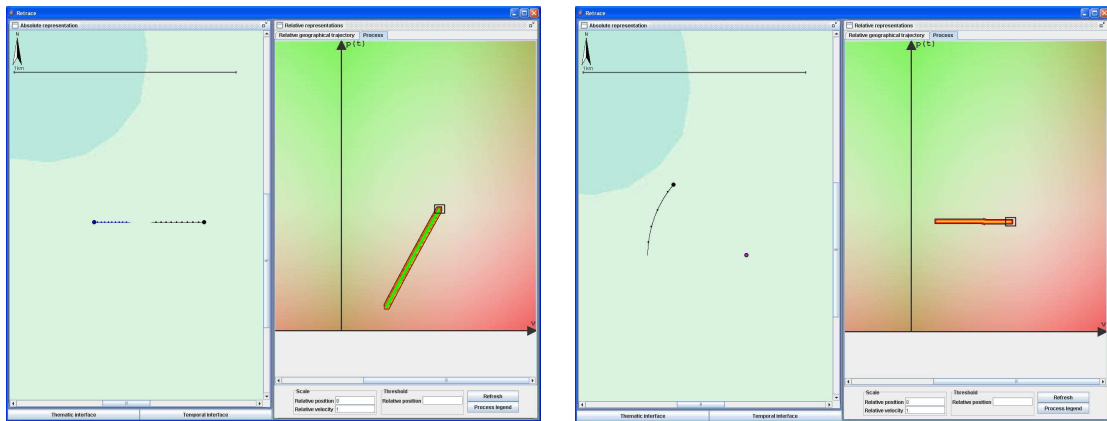
(a) Trajectoire où la position relative augmente

(b) Trajectoire où la position relative est stable



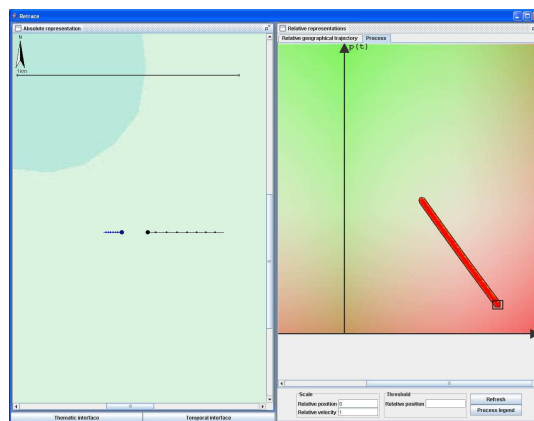
(c) Trajectoire où la position relative diminue

Figure 4.8 — Trajectoires où la vitesse relativisée est stable et les positions relatives sont variables



(a) Trajectoire où la position relative augmente

(b) Trajectoire où la position relative est stable



(c) Trajectoire où la position relative diminue

Figure 4.9 — Trajectoires où la vitesse relativisée augmente et les positions relatives sont variables

explicités. La connexion à la base de données ouvre deux boîtes de dialogue. La première représente les informations thématiques et la seconde les données temporelles.

Dans l'interface thématique, l'image de la carte utilisée pour la représentation absolue est visualisée dans son ensemble avec un encadrement de la zone visualisée dans la fenêtre de visualisation absolue. La liste des noms ou des identifiants des navires est visualisée dans cette boîte de dialogue pour que l'utilisateur puisse choisir le navire référent et les navires cibles. Dans la figure 4.10, le navire référent est par exemple le navire nommé "*Enez Eussa 3*" et les navires cibles sont nommés "*Bindy*" et "*Chassiron*". A chaque navire est associée une couleur* qui est identique lors de la visualisation des trajectoires dans les représentations absolues et relatives. Dans la fenêtre de visualisation absolue, la couleur du navire référent est noire.



Figure 4.10 — Interface thématique

Dans l'interface temporelle, le temps est différé et traité par un ensemble de boutons (figure 4.11). Les trajectoires passées peuvent donc être visualisées plusieurs fois. L'intervalle de temps sur lequel les données sont stockées pouvant être grand, il a donc été décidé que le temps de simulation soit beaucoup plus rapide que le temps de la base de données (ex : dix fois plus rapide). Les interactions entre les trajectoires des navires sont alors plus rapidement visibles et analysables. Lorsqu'une situation particulière est choisie comme une situation à analyser, il est possible de modifier l'intervalle de temps de visualisation. Par défaut, le début de l'intervalle de temps correspond à l'instant de la première position d'un des navires, et la fin de l'intervalle correspond à l'instant de la dernière position d'un des navires (identique ou non au premier navire). Dans le cas, d'une situation précise, l'intervalle de temps peut représenter l'intervalle de temps d'existence du navire choisi comme référent dans cette situation.

Afin de visualiser un maximum d'informations dans les fenêtres de représentation absolue et relative, les boîtes de dialogue "*Interface thématique*" et "*Interface temporelle*" sont ouvertes à la demande de l'utilisateur et sont accessibles via des boutons placés sous la visualisation absolue.

Les trajectoires dans la visualisation absolue représentent les positions (longitude et latitude) des navires dans l'environnement cartographique défini par la carte choisie par l'utilisateur (figure 4.12). Ces trajectoires sont représentées par une succession de lignes et de points. Les positions sont représentées toutes les secondes mais seules les positions de la base de données sont représentées par des points**. La trajectoire du navire référent sélectionné dans la boîte de dialogue "*Interface thématique*" est de couleur noire.

La visualisation relative est composée d'une partie de visualisation graphique avec deux

*Les différentes couleurs proposées sont bleu, magenta, orange, cyan et gris clair.

**Les points représentent les données existantes et non les données simulées.

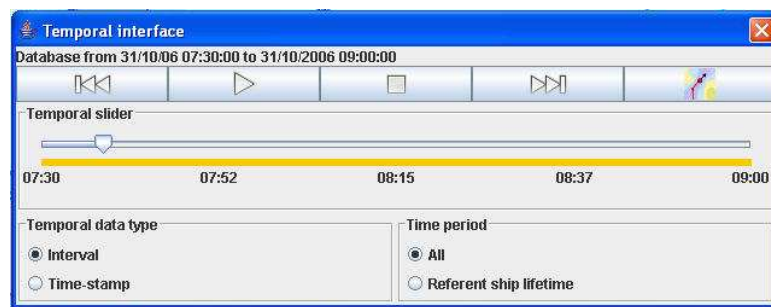


Figure 4.11 — Interface temporelle

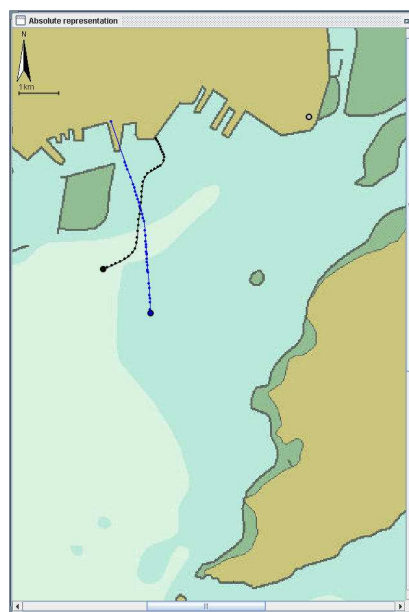


Figure 4.12 — Visualisation absolue des trajectoires

onglets et d'un ensemble d'options la modifiant. Le premier onglet nommé "*Représentation des trajectoires relatives*" de la partie graphique permet de visualiser la vitesse relativisée en abscisse et la position relative en ordonnée de tous les navires à proximité du navire référent qui sont dans la liste des navires cibles de la boîte de dialogue "*Interface thématique*" (figure 4.13(a)). La trajectoire est construite toutes les secondes, avec une suite de points et de lignes où les points représentent les informations des navires cibles sélectionnés. Les couleurs des trajectoires sont liées aux couleurs des navires cibles. Dans la figure 4.13(a), les trajectoires relatives des navires nommés "*Bindy*" et "*Chassiron*" sont visualisées.

Le second onglet nommé "*Processus*" est valide lorsque dans la liste principale des navires de la boîte de dialogue "*Interface thématique*" le navire sélectionné est différent du navire référent. Les processus décrits dans la section précédente sont visualisés sur une image de fond où les zones les plus dangereuses sont visualisées par des zones rouges et les zones les moins dangereuses sont visualisées par des zones vertes (figure 4.13(b)). Ces zones de couleurs sont le résultat de la combinaison entre deux dégradés :

- le premier représente les zones dangereuses de la position relative. La position relative étant moins dangereuse lorsque sa valeur est grande, le dégradé vertical est défini du vert vers le rouge, de la plus grande valeur à la plus petite valeur de la position relative.
- le second représente les zones dangereuses de la vitesse relativisée. Un premier dégradé du rouge au vert est visualisé sur la partie graphique représentant la vitesse relativisée négative et un dégradé du vert au rouge est visualisé sur la partie graphique représentant la vitesse relativisée positive. La vitesse relativisée étant moins dangereuse lorsqu'elle est nulle, deux zones de danger sont définies : lorsque la vitesse relativisée est positive et élevée, et lorsqu'elle est négative et petite.

La combinaison des couleurs permet de définir des zones peu dangereuses en vert : lorsque la position relative est grande et la vitesse relativisée positive et petite, et lorsque la position relative est grande et la vitesse relativisée négative et grande. Les zones les plus dangereuses (en rouge) sont les zones où la position relative est petite et où la vitesse relativisée est positive et grande ou négative et petite. La trajectoire de l'objet cible est identique à la trajectoire du même objet dans le premier onglet afin de lier les deux visualisations.

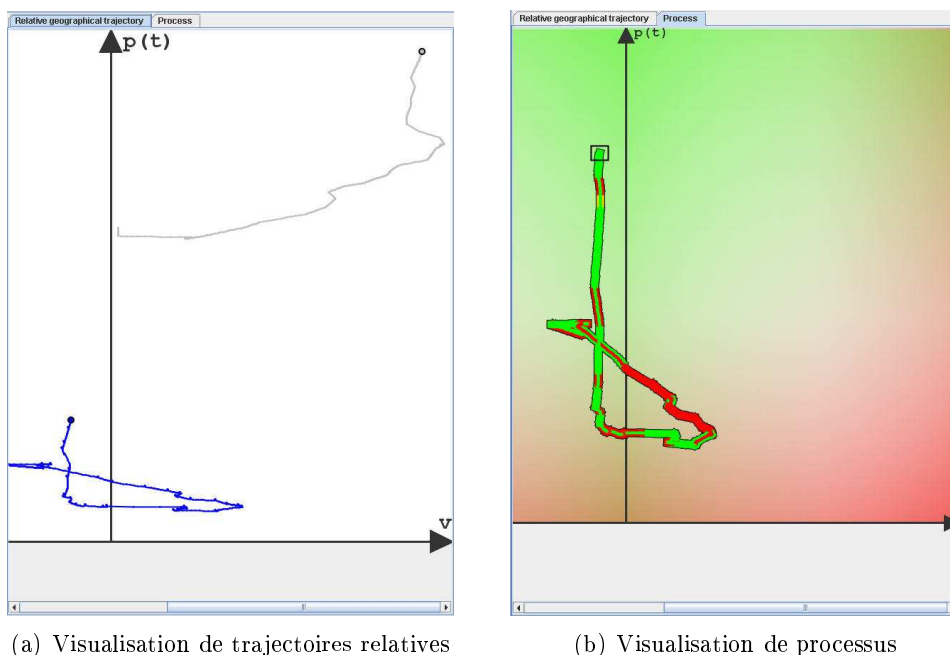


Figure 4.13 — Visualisation relative de trajectoires

4.7 Validation expérimentale

Les objectifs de la première validation expérimentale sont multiples, il s'agit d'évaluer la perception de l'évolution de la position relative et de la vitesse relativisée, d'apprécier la facilité des utilisateurs à déterminer la situation la plus dangereuse parmi différentes situations, et de montrer la complémentarité des représentations absolues et relatives.

Dans les différentes configurations présentées, il est demandé aux utilisateurs de choisir

la configuration qui leur paraît être la plus dangereuse* parmi sept configurations proposées. Chacune des configurations est comparée deux à deux aux six autres configurations. Les utilisateurs choisissent la configuration la plus dangereuse parmi les cas *A* et *B* présentés. Lorsqu'ils n'arrivent pas à le faire, deux solutions se présentent : soit les deux configurations sont dangereuses et les utilisateurs choisissent la réponse "*Je ne sais pas*", soit aucune des configurations n'est dangereuse et les utilisateurs choisissent la réponse "*Ni A ni B*" (annexe H). Les configurations sont visualisées dans une première série de diapositives avec la représentation absolue et dans une seconde série de diapositives avec la représentation relative (annexes F et G).

Parmi les configurations choisies, une situation n'est pas dangereuse, les deux navires se sont croisés et s'éloignent. Une seconde configuration représente des navires qui ont un cap identique et qui s'éloignent. Dans les cinq autres configurations, les navires se rapprochent avec des caps et des vitesses différents. Il existe donc parmi toutes ces configurations, une configuration qui est plus dangereuse que les autres, bien qu'elles soient toutes dangereuses :

- la première configuration représente deux navires s'éloignant et se déplaçant à la même latitude, le navire référent (navire noir) accélère (figure 4.14)
- dans la seconde configuration, les navires se suivent et le navire référent accélère, la distance entre eux augmente (figure 4.15)
- dans la figure 4.16, les navires se rapprochent et le navire référent accélère
- la quatrième configuration représente deux navires qui se rapprochent, le navire référent accélère (figure 4.17)
- dans la cinquième situation, les navires se rapprochent et le navire référent décélère (figure 4.18)
- dans la sixième configuration, les navires se rapprochent et le navire référent accélère (figure 4.19)
- la dernière configuration représente deux navires qui se rapprochent et le navire référent décélère (figure 4.20).

Lors du test, un ensemble d'indications est fourni aux utilisateurs. Les trajectoires des navires proviennent de données simulées et sont représentées par une suite de points et de segments où l'intervalle temporel entre deux points est identique (2 minutes)**. L'intervalle de temps de la visualisation des trajectoires des deux navires est identique (28 minutes) et les utilisateurs se placent dans le navire noir (navire référent), qui accélère ou décélère suivant les situations. Dans le cas de la série avec les visualisations relatives, une description des processus est ajoutée aux explications fournies aux utilisateurs : la couleur intérieure de la trajectoire est rouge lorsque la distance entre les navires diminue, et verte lorsque la distance entre les navires augmente ; la couleur extérieure de la trajectoire est rouge lorsque la vitesse relative du navire rose augmente, et verte lorsqu'elle diminue. Dans le cas particulier de ce test, les notions de position relative et de vitesse relativisée sont respectivement nommées distance et vitesse relative : la position relative entre deux points est toujours positive, donc elle est équivalente à la distance entre ces points, et la vitesse relativisée entre les deux navires est toujours positive, le navire cible est toujours moins rapide que le navire référent. La vitesse relativisée peut donc être perçue comme une vitesse relative munie d'un coefficient d'homothétie (plus la vitesse relative est grande, plus elle sera éloignée de l'axe des ordonnées).

*Seules les trajectoires des navires sont prises en compte dans la dangerosité de la configuration. L'environnement immédiat des trajectoires n'est pas pris en compte.

**Cette visualisation est différente de la visualisation des données réelles. Ce changement est effectué pour le test afin de mettre en évidence la vitesse dans la représentation absolue.

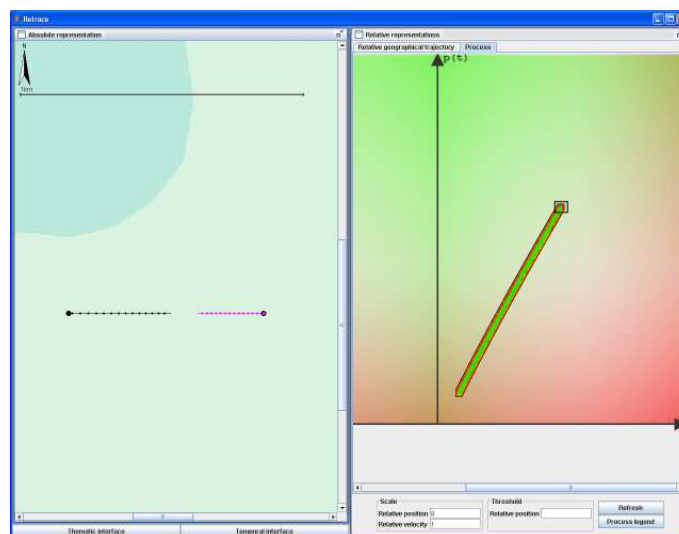


Figure 4.14 — Représentation absolue et relative de la configuration 1

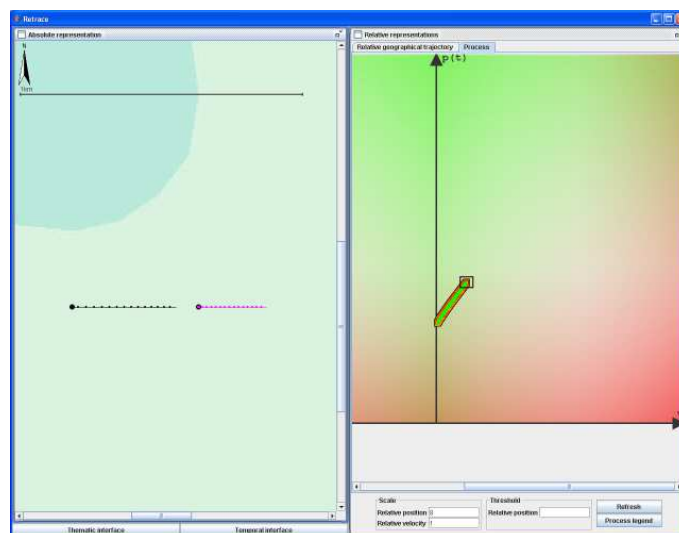


Figure 4.15 — Représentation absolue et relative de la configuration 2

Dix-huit personnes font partie du panel des utilisateurs et sont divisées en trois groupes de six personnes : le premier regroupant cinq hommes et une femme, enseignants et chercheurs dans le domaine des SIG nommé groupe 1 ; le second groupe est composé de cinq hommes et une femme, ingénieurs et techniciens nommé groupe 2 ; et le troisième groupe est constitué de six hommes de la Marine nationale et nommé groupe 3. L'âge des utilisateurs se situe entre 23 et 54 ans. Le choix de ces utilisateurs se base sur le constat que les enseignants-chercheurs utilisent de par leur activité des concepts spatiaux et spatio-temporels, les marins connaissent les règles de navigation et naviguent, et les ingénieurs et techniciens n'ont pas de familiarités particulières avec les concepts spatiaux et la navigation. Un tel panel nous permet de confronter notre modèle à différents niveaux d'expertise et de connaissance du domaine de

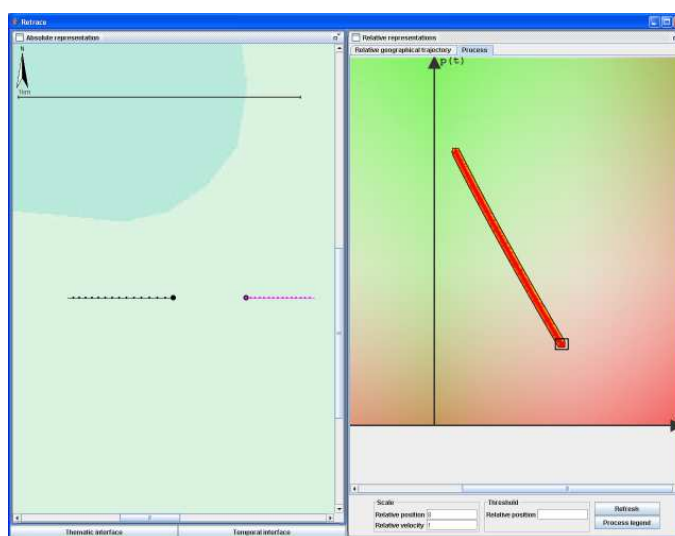


Figure 4.16 — Représentation absolue et relative de la configuration 3

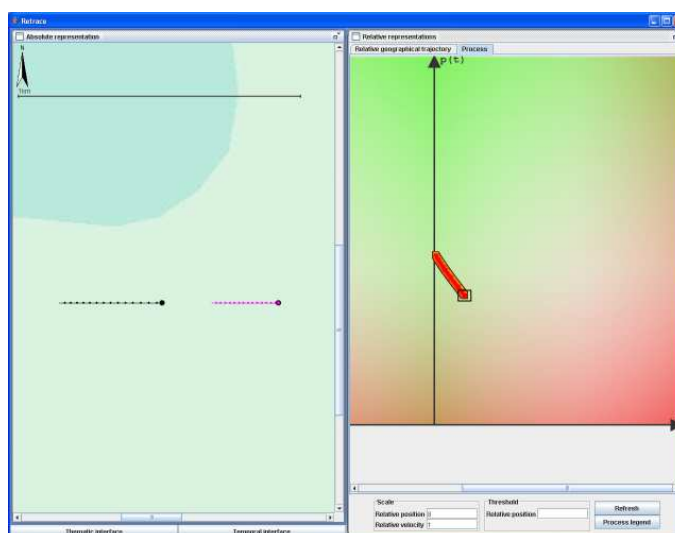


Figure 4.17 — Représentation absolue et relative de la configuration 4

connaissance et d'application.

Les résultats de la série de comparaisons de représentations absolues montrent que dans environ 80% des comparaisons, une configuration a été choisie et donc dans environ 10% des comparaisons, deux configurations considérées comme dangereuses ne sont pas différenciées (tableau 4.4). Pour la série de comparaisons des configurations visualisées avec la représentation relative environ 6% des configurations dangereuses n'aboutissent pas à un choix de la configuration la plus dangereuse (tableau 4.5) et donc environ 90% des comparaisons amènent à un choix. Notons que moins de comparaisons entre les configurations vues par la représentation relative sont définies comme une comparaison entre deux configurations non-dangereuses. Lors des comparaisons entre les représentations absolues, environ 19% amènent à des indé-

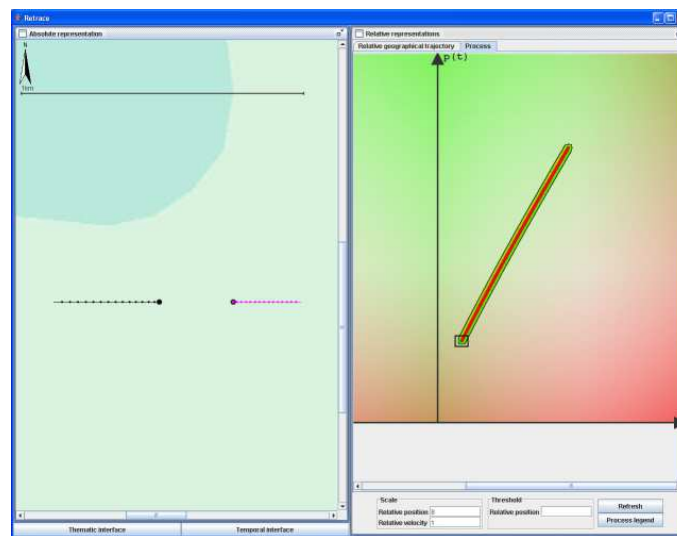


Figure 4.18 — Représentation absolue et relative de la configuration 5

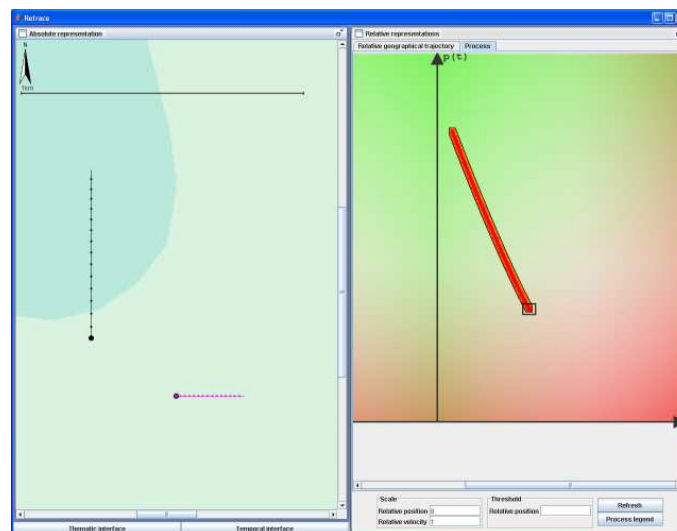


Figure 4.19 — Représentation absolue et relative de la configuration 6

Tableau 4.4 — Répartition des réponses par groupe d'utilisateurs pour le test avec la représentation absolue

Groupe	Choix	“Je ne sais pas”	“Pas de danger”
1	77,78	11,90	10,31
2	84,92	7,14	7,94
3	79,36	12,70	7,94
Total	80,69	10,58	8,73

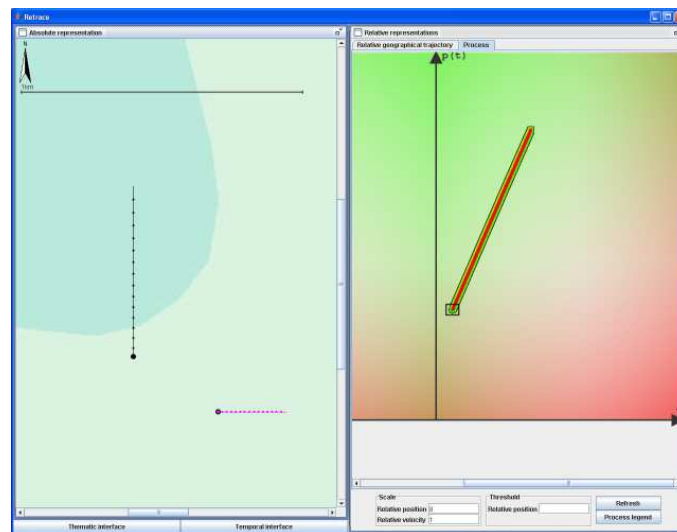


Figure 4.20 — Représentation absolue et relative de la configuration 7

Tableau 4.5 — Répartition des réponses par groupe d'utilisateurs pour le test avec la représentation relative

Groupe	Choix	"Je ne sais pas"	"Pas de danger"
1	88,89	7,14	3,17
2	91,27	3,97	4,76
3	89,68	4,76	5,56
Total	89,94	5,56	4,50

cisions* et lors des comparaisons entre les représentations relatives, seules environ 10% des réponses sont des indécisions.

En considérant que les configurations les plus dangereuses sont celles où la vitesse relative augmente et où la distance diminue, les configurations peuvent être classées de la plus dangereuse à la moins dangereuse (tableau 4.6). Lors du classement des configurations ne prenant en compte que la représentation absolue, la vitesse, la distance et le cap des navires sont pris en compte. La configuration 3 est donc la plus dangereuse et les configurations 6 et 7 ne sont pas très dangereuses, les navires n'étant pas en route de collision. De plus, dans la configuration 7, le navire référent décélère, il passera donc plus proche du navire cible que dans la configuration 6. Le classement des configurations dans la représentation relative prend en compte la vitesse relative et la distance mais ne permet pas une visualisation du cap des navires. Ce classement est donc différent du classement de la représentation absolue. Dans la représentation relative, les configurations les plus dangereuses sont visualisées par une trajectoire descendante vers la droite (totalement rouge) et ayant le point final de la trajectoire le plus en bas à droite dans le graphique.

Tableau 4.6 — Classement des situations de la plus dangereuse à la moins dangereuse

Représentation	+	-
Absolute	S3 > S5 > S4 > S7 > S6 > S2 > S1	
Relative	S3 > S6 > S4 > S5 > S7 > S2 > S1	

Le nombre de comparaisons par série et par groupe est de 126 (21 comparaisons pour 6 personnes). Le nombre d'indécisions entre les situations des représentations absolues est plus grand que le nombre d'indécisions entre les situations des représentations relatives (tableaux 4.7 et 4.8). La comparaison entre le résultat témoin (tableau 4.6) et les résultats des utilisateurs entraîne un nombre de différences qui est plus élevé pour la représentation absolue que pour la représentation relative (tableaux 4.7 et 4.8). Le nombre de différences avec le résultat témoin pour la représentation absolue des utilisateurs du groupe 3 est dû aux connaissances des marins de la difficulté à manoeuvrer des navires imposants. Ils définissent, par exemple, les situations 6 et 7 plus dangereuses que les situations 3 et 5, la manoeuvre d'évitement dans les deux premières situations étant plus délicate que dans les deux autres situations où un changement de cap à tribord par chacun des navires est facilement faisable.

Tableau 4.7 — Représentation absolue : Différences et indécisions

Groupes	Indécisions	Différences	Total
1	28	11	39
2	19	12	31
3	26	19	45
Total	73	42	115

*Les indécisions sont le cumul des choix "Je ne sais pas" et "Pas de danger".

Tableau 4.8 — Représentation relative : Différences et indécisions

Groupes	Indécisions	Différences	Total
1	14	4	18
2	11	9	20
3	13	5	18
Total	38	18	56

En dénombrant les différences et les indécisions pour chaque comparaison de la représentation relative, nous pouvons remarquer que la comparaison entre la situation 1 et la situation 2 génère environ un tiers des différences avec le résultat témoin des utilisateurs et environ un cinquième des indécisions des utilisateurs sur le total des différences et des indécisions (tableau 4.9). Le nombre d'indécisions est le résultat d'une interprétation où les deux situations ne sont pas dangereuses et seules trois personnes ont une réponse qui correspond au résultat témoin. Ce cas particulier met en évidence l'importance que portent les utilisateurs aux notions de distance et de vitesse. En effet, ces indécisions sont liées à l'augmentation de la distance, les situations ne sont donc pas dangereuses, et où les différences avec le résultat témoin sont liées à la comparaison de la valeur de la distance à la fin de l'intervalle de temps de visualisation. Dans la première situation, la distance est plus grande que dans la deuxième situation, les navires sont donc plus éloignés, et ainsi la situation est moins dangereuse. Dans le résultat témoin, la première situation est définie comme plus dangereuse que la seconde situation parce que la vitesse relativisée est plus grande et lors d'un changement de cap, la distance entre les navires peut rapidement diminuer. Cette comparaison met donc en évidence que la perception des dangers est différente pour chaque utilisateur lorsque les situations sont peu dangereuses.

A la suite du test, une justification des réponses par les utilisateurs permet d'interpréter les différences avec le résultat témoin et les indécisions pour la représentation absolue :

- pour les différences, par l'obligation d'un apprentissage de cette représentation. Les utilisateurs doivent visualiser des exemples de configurations dangereuses ou non et apprendre à les reconnaître
- pour les indécisions, par une prise en compte de la couleur des trajectoires et pas des valeurs quantitatives. Dans le cas de la diapositive 19 de l'annexe G, la configuration 5 est plus dangereuse que la configuration 7, la position relative est plus petite et la vitesse relativisée est plus grande pour la configuration 5 ; en évaluant la dangerosité des configurations seulement avec les couleurs, la distinction n'est pas déterminée
- pour les indécisions, par une appréhension identique du danger d'une grande vitesse et du danger de distance faible
- pour les indécisions et les différences, par une appréhension du danger d'une distance faible sans la prise en compte de la vitesse.

D'après les résultats des utilisateurs, la configuration la plus dangereuse parmi les configurations visualisées par la représentation relative, est la configuration 3 (tableau 4.10). Dans les groupes 1 et 3, la configuration 3 est toujours définie comme l'une des configurations les plus dangereuses et dans le groupe 2, un utilisateur définit la configuration 4 comme la plus

Tableau 4.9 — Représentation relative : Différences et indécisions par comparaison

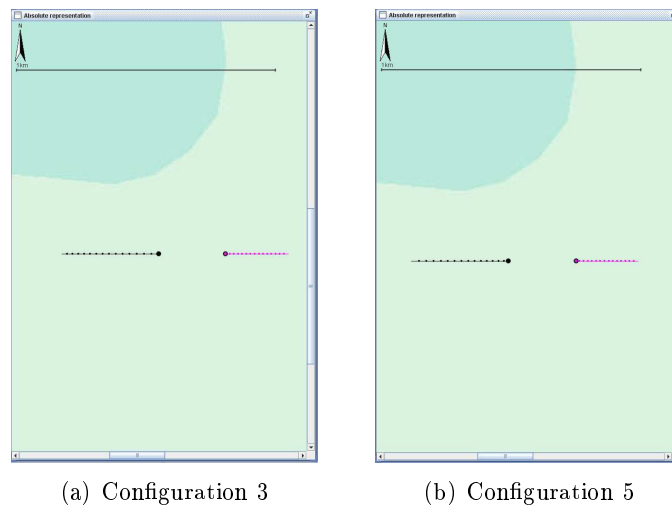
Diapositive	Cas A-Cas B	Différences				Indécisions				Total différences et indécisions
		Groupes				Groupes				
		1	2	3	Total	1	2	3	Total	
1	3-7	0	0	1	1	0	0	0	0	4
2	1-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2-5	0	1	0	1	0	2	1	3	4
4	1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1-2	1	3	3	7	3	3	2	8	15
7	6-7	0	0	0	0	1	0	0	1	1
8	2-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	3-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2-4	0	1	0	1	0	0	0	0	1
11	1-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1-7	0	0	1	1	0	1	1	2	3
13	3-6	0	1	0	1	1	0	2	3	4
14	4-5	1	1	0	2	2	1	0	3	5
15	3-4	0	1	0	1	1	1	1	3	4
16	4-7	1	0	0	1	1	1	0	2	3
17	4-6	0	1	0	1	1	0	2	3	4
18	1-5	0	0	0	0	0	0	1	1	1
19	5-7	1	0	0	1	2	0	2	4	5
20	5-6	0	0	0	0	1	1	0	2	2
21	2-7	0	0	0	0	1	1	1	3	3

dangereuse. Dans le groupe 2, aucune indécision n'est définie et dans les groupes 1 et 3, des indécisions entre plusieurs configurations existent mais sont peu nombreuses.

Dans le cas de la diapositive 9, où les configurations 3 et 5 sont comparées, le nombre de différences avec le résultat témoin et les indécisions est plus élevé pour la représentation absolue que pour la représentation relative (tableaux 4.9 et 4.11). Les visualisations avec la représentation absolue des deux configurations sont très proches, les navires ont une latitude identique, la distance diminue et les caps sont identiques (figure 4.21). La seule différence entre les deux configurations est la distance entre les différents points sur la trajectoire du navire référent. Cette différence est mise en évidence lors de la comparaison entre les visualisations des deux situations avec la représentation relative (figure 4.22). Le test effectué montre que

Tableau 4.10 — Représentation relative : Choix des cas les plus dangereux

Cas	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Total
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	6	5	6	17
4	1	1	1	3
5	0	0	0	0
6	1	0	2	3
7	0	0	0	0

**Figure 4.21** — Comparaison de la configuration 3 et de la configuration 5 visualisées avec la représentation absolue

les indécisions et les différences avec le résultat témoin de la représentation relative sont moins nombreuses que pour la représentation absolue. Ce constat nous permet de supposer que la représentation de la position relative et celle de la vitesse relativisée sont facilement appréhendables après explications et un apprentissage rapide. Il met aussi en évidence que pour des situations où la représentation absolue est limitée dans la représentation de la vitesse, la représentation relative complète cette lacune. De plus, avec la représentation relative, il est possible de définir la situation la plus dangereuse plus facilement, puisque sur dix-huit utilisateurs, dix-sept ont une réponse identique.

4.8 Discussion

Le premier objectif du développement de ce prototype consistait à déterminer la complémentarité des représentations relatives et absolues. La représentation absolue des positions

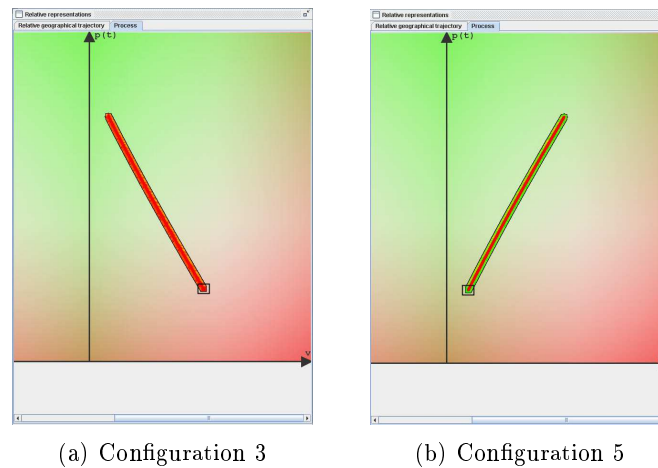


Figure 4.22 — Comparaison de la configuration 3 et de la configuration 5 visualisées avec la représentation relative

des navires ne permettait pas de représenter directement l'évolution de la position relative et de la vitesse relativisée de ces navires. Notre étude montre que la représentation relative permet de compléter les informations perçues à travers une représentation absolue. Du point de vue sémantique, il s'agissait aussi de visualiser graphiquement les processus qualifiant les trajectoires identifiés dans notre modèle. Les principes de visualisation retenus pour définir les changements de la position relative et de la vitesse relativisée facilitent l'appréhension des différents processus et de leurs conséquences possibles.

Mis en oeuvre dans le contexte de la sécurité maritime, le prototype développé donne un premier test de validation de son potentiel auprès d'un panel représentatif d'utilisateurs. A travers la comparaison de différentes configurations de deux navires, les utilisateurs caractérisent les situations qui leur paraissent les plus dangereuses. Le nombre élevé de choix et le faible nombre d'indécisions pour la représentation relative résultant de ces comparaisons nous montre que les objectifs du prototype sont atteints.

Les choix effectués par les utilisateurs lors de la comparaison des configurations visualisées dans la représentation relative mettent également en évidence la facilité de perception des utilisateurs des accélérations et des décélérations ainsi que des éloignements et des rapprochements des navires. Les processus intuitifs aux humains liés aux distances et aux vitesses sont donc bien visualisés dans la représentation relative. Les résultats des tests montrent aussi que les utilisateurs ont une appréhension différente des dangers liés à la position relative et à la vitesse relativisée. Des utilisateurs considèrent en effet une petite position relative et une faible vitesse relativisée plus dangereuse qu'une position relative un peu plus grande et une vitesse relativisée plus grande.

Des tests plus larges notamment dans des conditions réelles doivent aussi être élaborés afin de continuer à affiner l'évaluation des capacités du modèle et de sa visualisation. La visualisation de configurations plus complexes : plus de deux navires dans la configuration, et plus de changements dans les déplacements sont à proposer aux utilisateurs après un apprentissage de la représentation relative. Un test sur les représentations avec une visualisation dynamique et en temps-réel des configurations devrait permettre d'appréhender l'apport de la représentation relative. Une comparaison des configurations où les représentations relatives et absolues

Tableau 4.11 — Représentation absolue : Différences et indécisions par comparaison

Diapositive	Cas A-Cas B	Différences				Indécisions				Total
		Groupes				Groupes				différences et indécisions
		1	2	3	Total	1	2	3	Total	
1	3-7	0	0	3	3	1	2	0	3	6
2	1-6	0	0	0	0	2	0	1	3	3
3	2-5	0	0	1	1	0	0	0	0	1
4	1-4	0	0	0	0	2	1	0	3	3
5	2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1-2	0	0	0	0	3	3	6	12	12
7	6-7	0	2	0	2	6	4	4	14	16
8	2-6	0	1	0	1	3	2	0	5	6
9	3-5	2	1	0	3	3	3	5	11	14
10	2-4	2	1	0	3	0	2	2	4	7
11	1-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1-7	0	0	0	0	2	1	0	3	3
13	3-6	0	1	2	3	2	0	1	3	6
14	4-5	0	0	2	2	0	0	1	1	3
15	3-4	0	0	1	1	0	0	2	2	3
16	4-7	3	3	3	9	0	0	1	1	10
17	4-6	3	2	2	7	1	0	1	2	9
18	1-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	5-7	0	0	2	2	1	0	1	2	4
20	5-6	0	0	2	2	0	0	1	1	3
21	2-7	1	1	1	3	1	1	0	2	5

sont visualisées simultanément peut compléter le test effectué et appuyer les complémentarités respectives de ces deux approches.

CONCLUSION

Les déplacements terrestres, aériens et maritimes ne cessent d'évoluer et de s'accroître en qualité et en quantité. Le trafic engendré par ces déplacements génère des encombrements de plus en plus nombreux des voies de transport, créant ainsi des problèmes nouveaux dans le domaine de la sécurité. Afin de répondre à ces nouveaux risques, de nombreuses avancées techniques ont permis de développer de nouveaux moyens de gestion et de surveillance des déplacements liés aux moyens de transport, en particulier dans les zones à risque. L'apparition du GPS a notamment entraîné le développement rapide de systèmes de géolocalisation qui permettent la transmission des informations liées aux déplacements telles que les positions, les vitesses ou les directions d'un objet mobile.

Ces progrès dans la prise en compte de la connaissance en temps-réel des informations sur les déplacements de ces objets mobiles s'accompagne du développement des SIG qui favorisent, pour leur part, la gestion et la manipulation de ces données pour notamment faciliter la surveillance des zones à risque. Les recherches en cours dans ce dernier domaine se concentrent sur trois aspects : la modélisation conceptuelle avec le développement de nouvelles représentations de données spatio-temporelles, la modélisation logique avec l'utilisation de langage de requêtes de manipulation de ces données et la modélisation physique avec le développement de structures de stockage et d'accès aux données spatio-temporelles. L'objectif de ces différents modèles consiste à prendre en compte les informations relatives aux déplacements des objets, et notamment les trajectoires afin de potentiellement les traiter et les analyser.

En retenant les fondements issus de la cognition spatiale et de la géographie naïve, l'utilisation de plusieurs représentations spatiales et de modes de visualisation de données spatio-temporelles apparaît comme une solution préférable à une représentation unique et cartographique des informations de trajectoires. Ces différents points de vue permettent en effet de mieux comprendre et appréhender ces informations sémantiquement complexes, facilitant ainsi leur perception et leur analyse. Dans le cas des trajectoires des objets mobiles, et notamment dans le contexte maritime, si différentes représentations cartographiques sont actuellement utilisées, elles sont essentiellement basées sur une vision absolue, ou partiellement relative, qui ne permettent pas une compréhension fine des processus induits par la dynamique du système étudié. Avec une représentation absolue, l'environnement géographique de la situation représentée est statique, ou partiellement dynamique, et peu adapté à une compréhension des processus de trajectoires. Avec une représentation relative des données, les interactions entre les objets sont mieux mises en évidence, et cette représentation complète ainsi la vision conventionnelle et statique d'un système géographique.

Contribution

Cette thèse introduit un modèle de trajectoires dont l'objectif est de compléter les représentations absolues et relatives existantes, en intégrant une représentation plus ciblée de trajectoires perçues à partir d'un point de vue égocentrique. Le choix des informations de référence se base sur la perception que les êtres humains ont de la distance et de la vitesse lors de leurs déplacements.

Le modèle proposé représente les objets mobiles à partir des primitives géométriques utilisées pour leur modélisation au sein des SIG, c'est-à-dire des points, des polygones et des polygones qui peuvent être convexes ou concaves. Chacun de ces objets est défini, comme dans la topologie usuelle, par un extérieur, une frontière et dans le cas du polygone par un intérieur. La représentation étant relative, un objet référent est identifié comme l'origine de la représentation, et les données modélisées de l'objet cible en relation avec l'objet référent sont définies. Le modèle distingue si un objet cible est tout ou partie à l'intérieur de l'objet référent, tout ou partie à la frontière (et en partie à l'extérieur) de l'objet référent ou complètement à l'extérieur de l'objet référent. Les relations spatiales entre un objet cible et l'objet référent sont représentées par trois relations topologiques : la disjonction, le toucher et l'intersection entre les objets. L'intersection est de fait définie seulement lorsqu'au moins l'un des objets est représenté par un polygone.

A partir de ces principes, nous introduisons une mesure de position relative qui représente la distance entre deux objets en distinguant ces trois relations topologiques. Elle correspond à la distance minimale entre les deux objets lorsqu'ils sont disjoints, et elle est nulle lorsque les deux objets se touchent. Lorsque les deux objets s'intersectent, elle est négative et représente la distance minimale entre l'extérieur de l'objet référent et le point appartenant à l'intersection des deux objets le plus éloigné de l'extérieur de l'objet référent.

De son côté, la vitesse relativisée est calculée par le produit de la vitesse relative de l'objet cible dans le référentiel de l'objet référent et la différence entre les vitesses des deux objets. Elle est positive, lorsque l'objet référent est plus rapide que l'objet cible, elle est nulle lorsque les vitesses des deux objets sont identiques. La vitesse relativisée est négative lorsque l'objet référent est moins rapide que l'objet cible.

Ces deux mesures sont représentées dans un espace en deux dimensions afin de faire émerger des trajectoires géographiques définissant les processus couramment perçus par les êtres humains. Ces processus de trajectoires sont caractérisés en langage naturel en utilisant les notions d'accélération et de décélération, tout en distinguant les objets cibles plus rapides des objets cibles moins rapides que l'objet référent. Leur combinaison avec les notions de rapprochement et d'éloignement de la frontière des objets, tout en distinguant les relations topologiques entre les objets, apporte une complémentarité à la description des trajectoires géographiques.

Un prototype informatique a été développé avec pour objectif de visualiser la représentation développée et de la tester auprès d'un panel d'utilisateurs représentatif. Ce prototype permet de visualiser les trajectoires d'objets mobiles avec une représentation absolue cartographique, et simultanément et dynamiquement avec la représentation relative proposée. Des représentations absolues et partiellement relatives des trajectoires d'objets mobiles sont actuellement utilisées dans le contexte maritime, les marins ont donc une certaine habitude à manipuler des représentations abstraites et numériques des trajectoires des navires, ce qui facilite la compréhension du potentiel de notre approche. Ces utilisateurs se complètent d'autres groupes avec des niveaux de connaissance variés dans la manipulation de données géogra-

phiques. Nous appliquons ensuite notre représentation au contexte maritime afin de la tester auprès d'un panel d'utilisateurs moins habitués à des représentations de trajectoires. Cette confrontation avec différents types utilisateur montre que les informations de la représentation relative complètent relativement bien les informations de la représentation absolue, dans la mesure où les situations conflictuelles et dangereuses sont mieux identifiées par notre approche. Les résultats de cette expérience montrent aussi que les processus de trajectoires présentés sont relativement bien perçus et compris par les utilisateurs dans leur ensemble.

Extensions de notre approche

Du point de vue du modèle

Le modèle actuellement développé est extensible du point de vue des primitives géométriques utilisées, du nombre de ses dimensions spatiales, et des contraintes inhérentes à l'environnement représenté. Tout d'abord, dans la modélisation actuelle des trajectoires, tous les points formant un polygone ou une polyligne sont considérés avec un vecteur vitesse identique. Les objets se déplacent exclusivement par translation et n'effectuent pas de rotation, ni de déformation. Ces objets sont définis sans trou et connexe. La prise en compte de ces différentes particularités géométriques permettrait de représenter des objets se déformant et des objets complexes. Une intégration de ces propriétés apporterait une nouvelle complexité au modèle, et probablement une nouvelle étude des propriétés de notre modèle.

Pour l'utilisation de la position relative et de la vitesse relativisée dans le contexte aérien, la troisième dimension devrait être intégrée au modèle existant. Les avions seraient alors représentés par des points, les frontières par des surfaces et les zones de surveillance ou proches des aéroports par des volumes.

La représentation de trajectoires peut aussi être utilisée pour une application terrestre. Les déplacements des voitures se faisant dans un espace à deux dimensions, mais cette fois très contraint, le modèle existant devrait alors intégrer les contraintes de réseau et la notion d'obstacle. Dans l'exemple d'une autoroute, une voiture se rapprochant à grande vitesse du côté opposé au terre-plein central n'est pas dangereuse. Un tel contexte et de telles contraintes apportent une nouvelle complexité dont la confrontation avec notre modèle ouvre des perspectives de recherche.

Du point de vue des visualisations

La visualisation graphique actuelle de la position relative et de la vitesse relativisée présentée donne une première approche d'une appréhension égocentrique des trajectoires. L'utilisation d'un graphique avec des axes perpendiculaires pour visualiser les données est proche de la représentation absolue, donc proche de visualisations connues et appréhendables par les utilisateurs. Il est néanmoins possible de développer d'autres types de visualisations des données afin de définir celle qui sera la plus appropriée à un modèle et à un domaine d'application considérés. Il peut être envisagé de définir une représentation où la visualisation ne serait plus présentée sur un graphique avec deux axes mais sur un cercle. L'objet référent serait alors placé sur le centre du cercle. En prenant un cercle trigonométrique, la vitesse relativisée positive serait représentée sur le demi-cercle $(0, \pi)$ et la vitesse relativisée négative sur le demi-cercle $(0, -\pi)$. La position relative positive serait représentée sur le demi-cercle $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ et la position relative négative sur le demi-cercle $(\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2})$. La position relative serait repré-

sentée par un point plus ou moins éloigné du centre du cercle sur le rayon du cercle passant par la valeur de la vitesse relativisée. Une telle visualisation mérite une étude approfondie, notamment d'un point de vue cognitif.

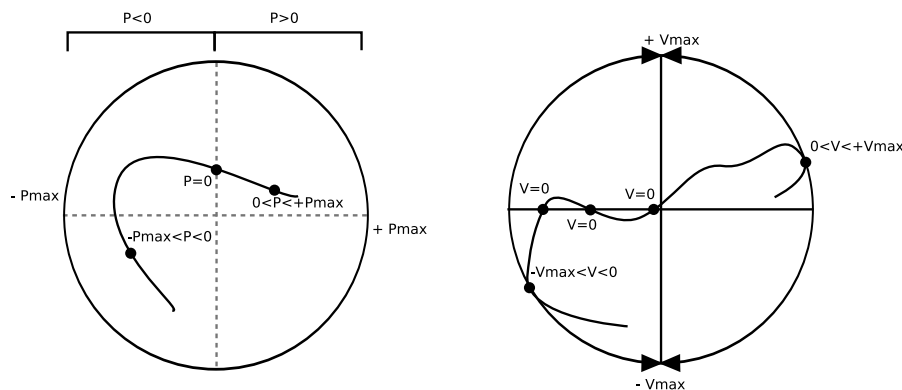


Figure 4.23 — Visualisation de trajectoires à partir d'un cercle

D'après les résultats des tests de notre expérimentation, l'utilisation de couleurs de fond pour la visualisation des dangers est bien perçue par les utilisateurs. Le passage d'une situation non dangereuse à une situation s'effectue avec une transition à l'aide de dégradés de couleurs. L'utilisation de zones bien définies avec des séparations visualisées par des courbes peut être une autre solution de visualisation des zones de dangerosité moins souple mais plus précise du point de vue de l'application.

En ce qui concerne la visualisation des trajectoires relatives des différents objets cibles autour de l'objet référent, les trajectoires peuvent être nombreuses lorsque les positions relatives sont proches de la valeur nulle. Dans ce cas, la perception des trajectoires peut être difficile. Une solution à envisager pour ce problème consiste à modifier l'échelle de la position relative afin de ne visualiser que les objets les plus proches. Une seconde solution consiste à "effacer" les trajectoires des objets cibles qui ne sont plus dans la zone visualisée depuis un intervalle de temps défini par l'utilisateur. Les trajectoires des objets cibles proches de l'objet référent qui se sont depuis éloignés de celui-ci ne seraient pas conservées.

Du point de vue du prototype

L'extension du prototype pour une prise en compte des données en temps-réel est envisageable à partir de la mise à jour en temps-réel de la base de données. Nous pouvons mentionner la possibilité d'ajouter une option lors de la connexion à la base de données pour choisir une visualisation des déplacements en temps réel ou en temps différé des objets. Cette solution implique néanmoins un traitement "à la volée" des données pour le calcul de la position relative et de la vitesse relativisée. Les données entre l'instant de la dernière position connue et l'instant courant doivent dans ce cas être simulées afin de bénéficier d'une visualisation continue. Dans le contexte maritime, le nombre de navires ayant un AIS étant encore faible, l'interpolation des positions, des caps et des vitesses peuvent encore être linéaires.

Le nombre de navires utilisant un AIS va assurément augmenter dans les prochaines années, il est donc envisageable que l'intervalle de temps entre les transmissions de données augmente. Les navires auront ainsi parcouru une plus grande distance entre deux positions

transmises. L'interpolation des positions ne pourra plus être linéaire et devra prendre en compte le vecteur vitesse.

L'orientation des objets mobiles n'est pas mise en évidence dans la représentation de la position relative et la vitesse relativisée. Deux objets cibles ayant des vecteurs vitesse opposés et une norme identique sont représentés avec les mêmes coordonnées relatives. Ce cas particulier montre bien que la représentation absolue des positions et des orientations complète la représentation relative développée. Pour visualiser l'orientation dans la représentation relative, il est possible de visualiser une trajectoire via une icône représentant l'angle entre les vecteurs vitesse des deux objets.

Afin de compléter les informations représentées et visualisées dans l'interface, il est possible d'ajouter des visualisations actuelles comme le radar déjà utilisé par les marins et qui permet notamment de visualiser relativement les orientations et les distances, ainsi que les Time to Closest Point of Approach (TCPA) et Distance at Closest Point of Approach (DCPA). Le TCPA et le DCPA permettent respectivement de connaître l'instant et la distance à laquelle deux navires seront le plus proche l'un de l'autre si aucun changement de vitesse et de cap n'est effectué. De plus, l'intégration dans un logiciel répondant à la norme ECDIS de la représentation relative peut être une étape permettant aux différents utilisateurs d'utiliser la complémentarité des différentes représentations.

Enfin, l'ajout dans la base de données et dans l'interface de visualisation des représentations des polygones et des polygones permettrait de représenter des routes et des zones de surveillance. Pour des représentations d'objets statiques, ces routes peuvent représenter des DST où les navires ont l'obligation de passer et les zones peuvent représenter des zones portuaires. Dans le cas de la représentation d'objets mobiles, les zones peuvent représenter des zones de surveillance de patrouilleurs maritimes ou encore des zones d'exclusions autour des navires.

L'expérimentation effectuée doit être complétée par d'autres tests au niveau de l'interface. La visualisation dynamique des informations entraîne en effet une nouvelle perception des données. Les accélérations et les décélérations des navires sont visualisées dans la représentation absolue et la représentation relative par des déplacements plus ou moins rapides des navires. De même, la perception de la complémentarité des représentations doit être développée par des tests où les utilisateurs visualiseraient une situation dans la représentation absolue, puis visualiseraient simultanément la même situation dans cette représentation et dans la représentation relative.

Des évaluations liées aux extensions proposées sont envisageables :

- différentes visualisations des zones de danger seraient proposées aux utilisateurs pour définir l'appréhension du danger à travers les différentes visualisations, et afin de choisir la plus intuitive,
- différentes visualisations seraient soumises à des tests afin de déterminer les plus intuitives par les utilisateurs sur des cas d'école, puis après un apprentissage sur des situations complexes à analyser
- l'ajout des informations tels que le TCPA et le DCPA rendrait nécessaire un test sur l'impact de ces informations pour la représentation absolue et la représentation relative,
- l'ajout d'objets représentés par des polygones et des polygones, amenant la visualisation de routes et de zones de surveillance, permettrait de développer un test auprès des centres de surveillances

Ces différents tests doivent être envisagés à partir d'une perception dynamique et complémentaire des représentations absolues et relatives.

Bilan

Le modèle développé dans cette thèse a été traité et validé dans un contexte maritime. L'utilisation de ce modèle dans d'autres domaines d'application tels que la représentation des trajectoires des moyens de transports aériens, ou encore la représentation des déplacements des piétons dans des milieux non-contraints en milieux urbains ou naturels sont envisageables. En effet, ces différents types de navigation proches de la navigation maritime apportent de nouvelles particularités qui rendent leur étude favorable à une nouvelle recherche.

Cette thèse constitue également une contribution aux recherches en cours dans le domaine spatio-temporel et des SIG, et celles menées pour l'aide à l'analyse et à la prise de décisions dans le cas de situations sensibles et critiques. L'amélioration de la perception des trajectoires par des humains doit être aussi associée aux recherches orientées vers la définition de nouveaux modèles cognitifs et de nouvelles interfaces homme-machine. Le développement de représentations de trajectoires d'objets mobiles est également étroitement lié aux moyens de communication des informations entre ces objets mobiles, et au développement de techniques de modélisation et de simulation comme les systèmes multi-agents. Dans le cas d'une modélisation d'objets mobiles par des agents, la perception des différentes informations liées aux déplacements par différentes représentations peut ainsi aider les agents à décider d'un comportement mieux défini à la situation perçue. Au final, la modélisation de trajectoires géographiques pose encore de multiples problèmes de modélisation, de représentation et de visualisation qui doivent être abordés par les sciences informatiques, mais avec un regard le plus large possible quant aux fondements méthodologiques et aux techniques utilisés.

Annexe A

TRANSITIONS CONTINUES

Tableau A.1 — Transitions continues lorsque A est une polyligne

	$A(p^+)B$ $\downarrow$ $A(p^0)B$	$A(p^0)B$ $\downarrow$ $A(p^+)B$	$A(p^+)B$ $\downarrow$ $A(p^+)B$	$A(p^0)B$ $\downarrow$ $A(p^0)B$
$A(v^+)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$		$\perp$		
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^+)B$	$\perp$			
$A(v^-)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$		$\perp$		
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^-)B$	$\perp$			
$A(v^+)B$ $\downarrow$ $A(v^+)B$			$A(v^+p^0)B$	$A(v^+p^0)B$
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$			$A(v^+p^+)B$	$A(v^0p^0)B$
$A(v^-)B$ $\downarrow$ $A(v^-)B$			$A(v^-p^+)B$	$A(v^-p^0)B$

Tableau A.2 — Transitions continues lorsque A est un point

	$A(p^+)B$ $\downarrow$ $A(p^0)B$	$A(p^0)B$ $\downarrow$ $A(p^+)B$	$A(p^+)B$ $\downarrow$ $A(p^+)B$	$A(p^0)B$ $\downarrow$ $A(p^0)B$
$A(v^+)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$		$\perp$		
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^+)B$	$\perp$			
$A(v^-)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$		$\perp$		
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^-)B$	$\perp$			
$A(v^+)B$ $\downarrow$ $A(v^+)B$			$A(v^+p^0)B$	$\perp$
$A(v^0)B$ $\downarrow$ $A(v^0)B$			$A(v^+p^+)B$	$A(v^0p^0)B$
$A(v^-)B$ $\downarrow$ $A(v^-)B$			$A(v^-p^+)B$	$\perp$

Annexe B

EXEMPLE DE DESCRIPTION DES CHANGEMENTS DANS UNE SITUATION

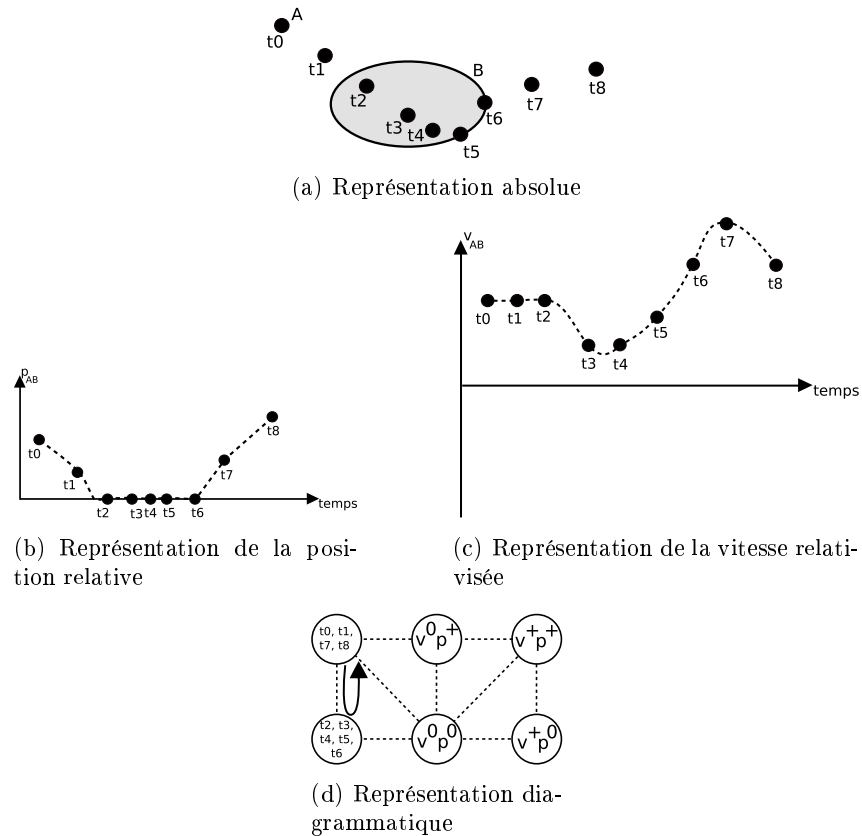


Figure B.1 — Situation : le point référent se déplace et croise un polygone immobile

t_0	}	état :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_0 \rightarrow t_1$			
t_1			
$t_1 \rightarrow t_2$		transition :	B se déplace de l'extérieur à la frontière de A, et B est moins rapide que A
t_2	}	état :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A
$t_2 \rightarrow t_3$			
t_3			
$t_3 \rightarrow t_4$			
t_4			
$t_4 \rightarrow t_5$			
t_5			
$t_5 \rightarrow t_6$			
t_6		transition :	B se déplace de la frontière à l'extérieur A et B est moins rapide que A
$t_6 \rightarrow t_7$			
t_7	}	état :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_7 \rightarrow t_8$			
t_8			

Description B.1 — Caractérisation des changements de la situation de la figure 3.5

t_0	état :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_0 \rightarrow t_1$	changement :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A B se rapproche de la frontière de A et la vitesse relativisée reste stable
t_1	état :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_1 \rightarrow t_2$	transition :	B se déplace de l'extérieur à la frontière de A et B est moins rapide que A
t_2	état :	B est à la frontière de A et B est moins rapide que A
$t_2 \rightarrow t_3$	} changement :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A la position relative reste stable et A décélère
t_3		
$t_3 \rightarrow t_4$		
t_4	état :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A
$t_4 \rightarrow t_5$	} changement :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A la position relative reste stable et A accélère
t_5		
$t_5 \rightarrow t_6$		
t_6	état :	B est à la frontière de A, et B est moins rapide que A
$t_6 \rightarrow t_7$	transition :	B se déplace de la frontière à l'extérieur A et B est moins rapide que A
t_7	état :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_7 \rightarrow t_8$	changement :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A B se rapproche de la frontière de A et la vitesse relativisée reste stable
t_8	état :	B est <i>disjoint</i> de A, et B est moins rapide que A

Description B.2 — Caractérisation des changements qualitatifs et quantitatifs de la situation de la figure 3.5

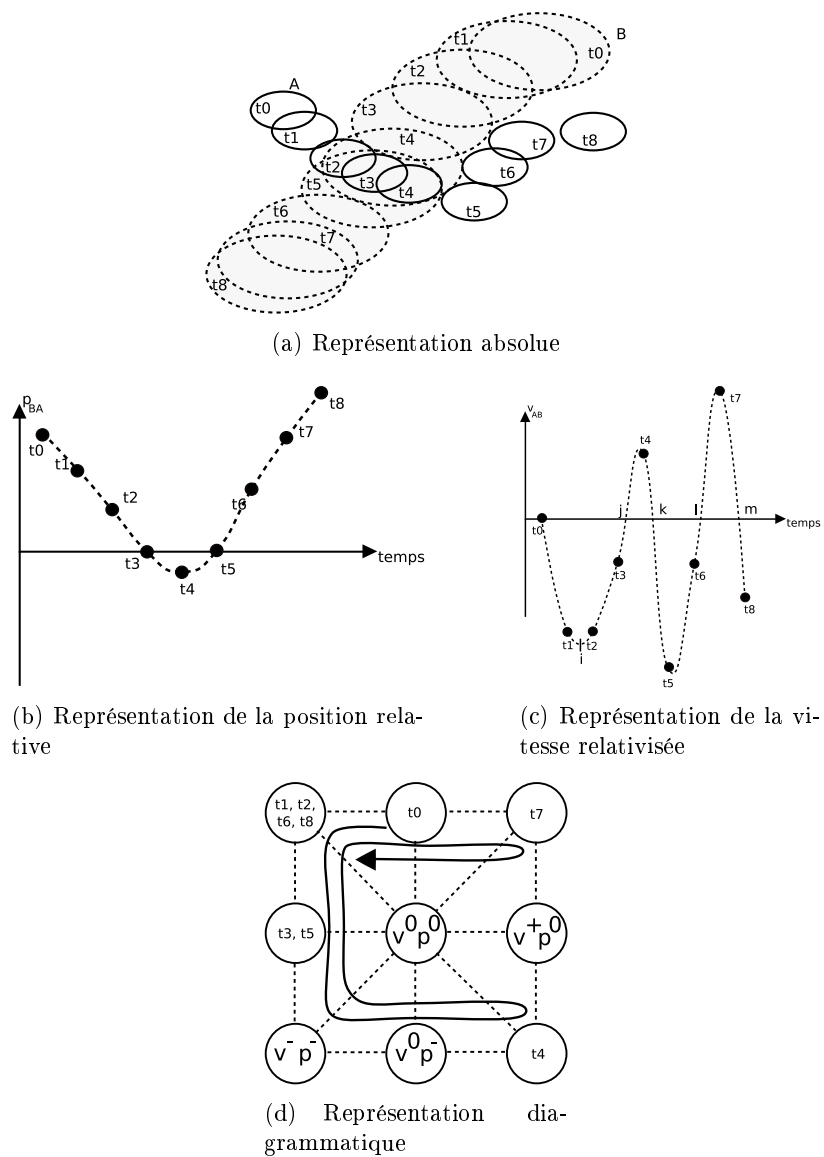


Figure B.2 — Situation : deux polygones (A objet référent) mobiles se croisent

t_0	état :	B est à l'extérieur de A, et B a la même vitesse que A
$t_0 \rightarrow t_1$	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B accélère plus que A
t_1	} état :	B est à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A
$t_1 \rightarrow t_2$		
t_2		
$t_2 \rightarrow t_3$	transition :	B se déplace de l'extérieur à la frontière de A, et B est plus rapide que A
t_3	état :	B est à la frontière de A, et B est plus rapide que A
$t_3 \rightarrow t_4$	transition :	B se déplace de la frontière à l'intérieur de A, et B est plus rapide que A
	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B décélère ou A accélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B décélère ou A accélère à partir d'une vitesse identique
t_4	état :	B est à l'intérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_4 \rightarrow t_5$	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B accélère ou A décélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B accélère ou A décélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B se déplace de l'intérieur à la frontière de A, et B est plus rapide que A
t_5	état :	B est à la frontière de A, et B est plus rapide que A
$t_5 \rightarrow t_6$	transition :	B se déplace de la frontière à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A
t_6	état :	B est à la frontière A, et B est plus rapide que A
$t_6 \rightarrow t_7$	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B décélère ou A accélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B décélère ou A accélère à partir d'une vitesse identique
t_7	état :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_7 \rightarrow t_8$	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B accélère ou A décélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B accélère ou A décélère à partir d'une vitesse identique
t_8	état :	B est à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A

Description B.3 — Caractérisation des changements de la situation de la figure 3.6

t_0	état :	B est à l'extérieur de A, et B a la même vitesse que A
$t_0 \rightarrow t_1$	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B accélère plus que A
t_1	état :	B est à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A
$t_1 \rightarrow t_2$	changement :	B est à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A B se rapproche de A et la vitesse relativisée reste stable
t_2	état :	B est à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A
$t_2 \rightarrow t_3$	transition :	B se déplace de l'extérieur à la frontière de A, et B est plus rapide que A
t_3	état :	B est à la frontière de A, et B est plus rapide que A
$t_3 \rightarrow t_4$	transition :	B se déplace de la frontière à l'intérieur de A, et B est plus rapide que A
	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B décélère ou A accélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B décélère ou A accélère à partir d'une vitesse identique
t_4	état :	B est à l'intérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_4 \rightarrow t_5$	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B accélère ou A décélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'intérieur de A, et B accélère ou A décélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B se déplace de l'intérieur à la frontière de A, et B est plus rapide que A
t_5	état :	B est à la frontière de A, et B est plus rapide que A
$t_5 \rightarrow t_6$	transition :	B se déplace de la frontière à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A
t_6	état :	B est à la frontière A, et B est plus rapide que A
$t_6 \rightarrow t_7$	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B décélère ou A accélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B décélère ou A accélère à partir d'une vitesse identique
t_7	état :	B est à l'extérieur de A, et B est moins rapide que A
$t_7 \rightarrow t_8$	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B accélère ou A décélère pour atteindre une vitesse identique
	transition :	B reste à l'extérieur de A, et B accélère ou A décélère à partir d'une vitesse identique
t_8	état :	B est à l'extérieur de A, et B est plus rapide que A

Description B.4 — Caractérisation des changements qualitatifs et quantitatifs de la situation de la figure 3.6

Annexe C

CONSTRUCTION D'UNE TABLE DE COMPOSITION

Tableau C.1 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$

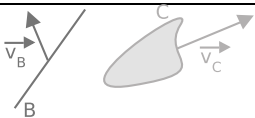
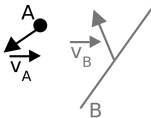
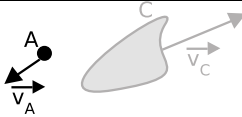
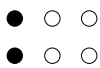
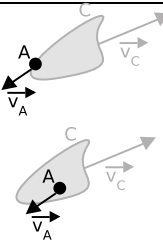
				
		$\perp$	$\perp$	
		$\perp$	$\perp$	

Tableau C.2 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^0p^+)C$

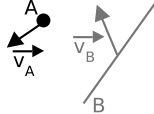
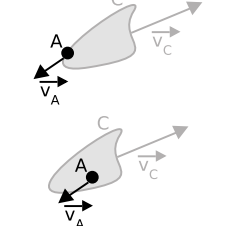
				
		$\perp$	$\perp$	
		$\perp$	$\perp$	

Tableau C.3 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^+p^+)C$

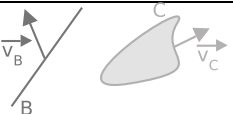
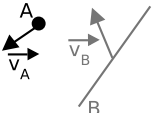
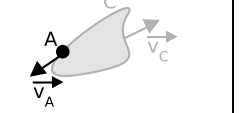
				
				
				

Tableau C.4 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^+p^0)C$

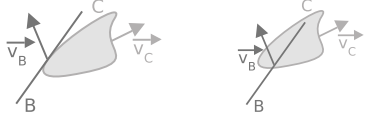
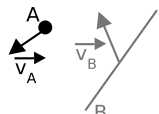
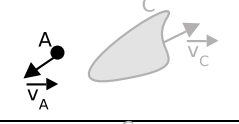
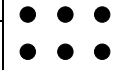
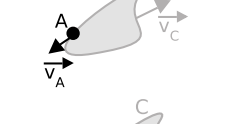
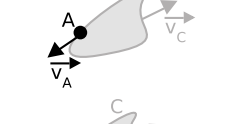
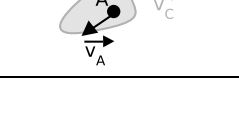
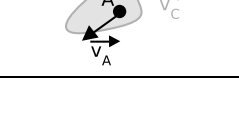
				
				
				
				
				

Tableau C.5 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^0p^0)C$

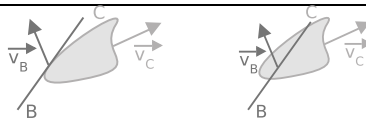
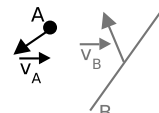
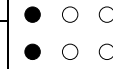
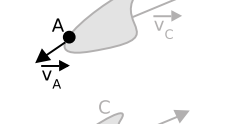
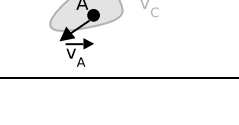
				
				
		$\perp$	$\perp$	
		$\perp$	$\perp$	

Tableau C.6 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$

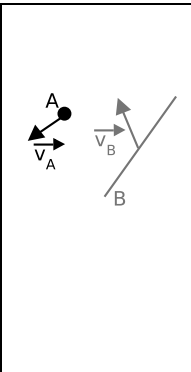
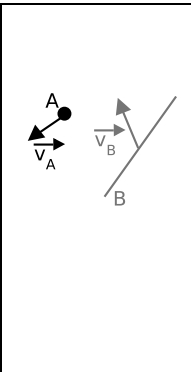
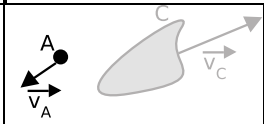
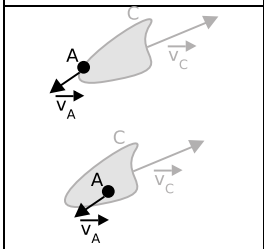
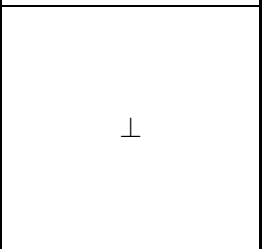
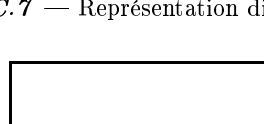
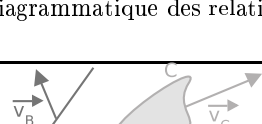
							
			$\perp$		$\perp$		
			$\perp$		$\perp$		

Tableau C.7 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^+)B$ et $B(v^-p^+)C$

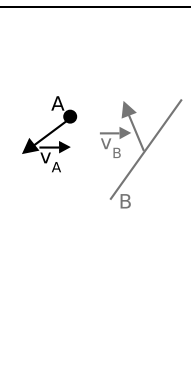
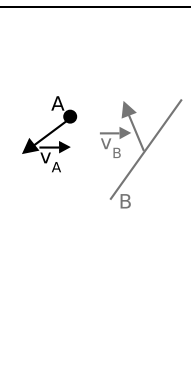
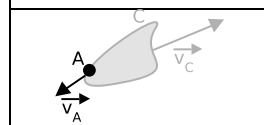
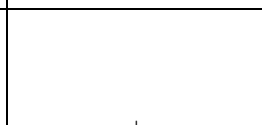
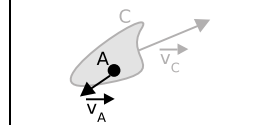
							
			$\perp$		$\perp$		
			$\perp$		$\perp$		

Tableau C.8 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^+)B$ et $B(v^0 p^+)C$

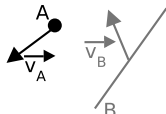
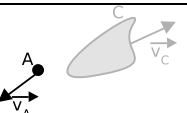
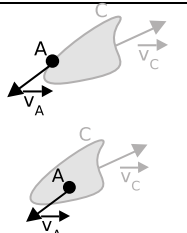
				
	$\perp$		$\perp$	○ ● ○ ○ ● ○
	$\perp$		$\perp$	

Tableau C.9 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^+)B$ et $B(v^+ p^+)C$

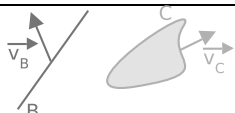
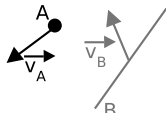
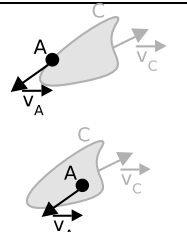
				
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ● ○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$		

Tableau C.10 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^+)B$ et $B(v^+ p^0)C$

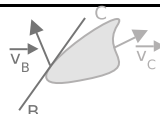
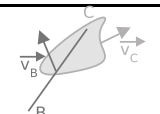
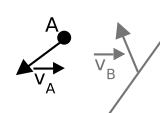
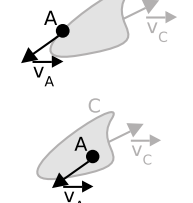
	 			
	$\perp$	$\perp$		
	$\perp$	$\perp$		

Tableau C.11 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^+)B$ et $B(v^0 p^0)C$

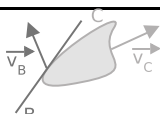
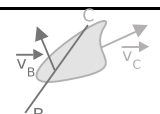
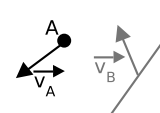
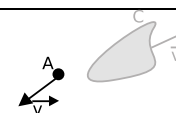
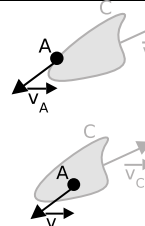
				
	$\perp$		$\perp$	
	$\perp$		$\perp$	

Tableau C.12 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^+)B$ et $B(v^- p^0)C$

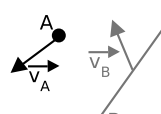
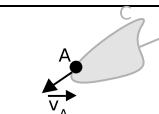
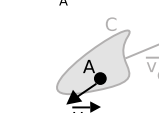
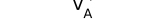
																								
					$\perp$					$\perp$					● ○ ○									
					$\perp$					$\perp$					● ○ ○									

Tableau C.14 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^0p^+)C$

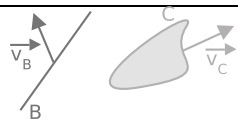
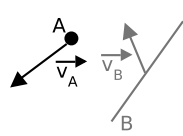
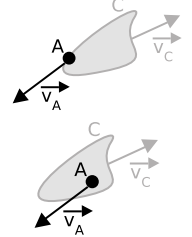
				
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●

Tableau C.15 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^+p^+)C$

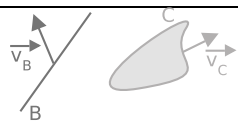
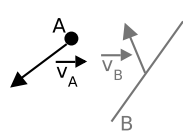
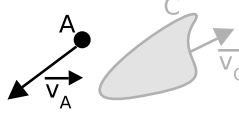
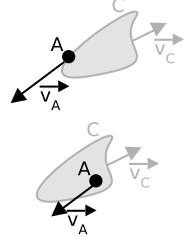
				
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●

Tableau C.16 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^+p^0)C$

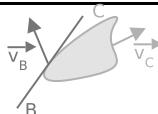
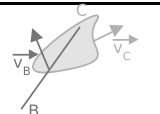
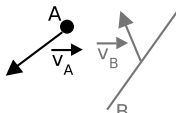
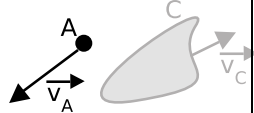
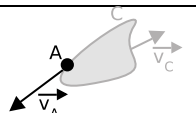
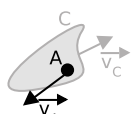
	 			
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ● ○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$	 	

Tableau C.17 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^0p^0)C$

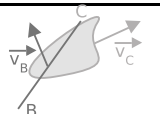
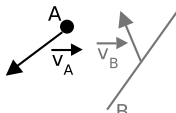
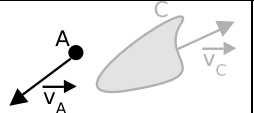
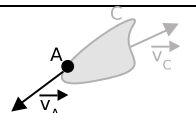
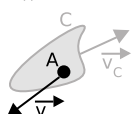
	 			
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ● ○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$	 	

Tableau C.18 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^+)B$ et $B(v^-p^0)C$

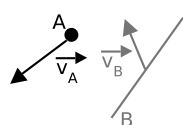
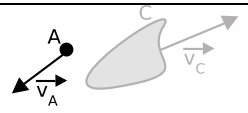
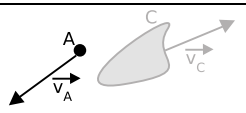
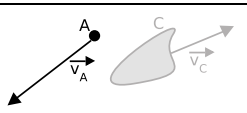
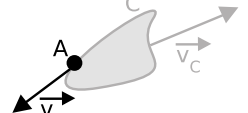
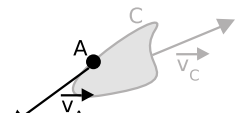
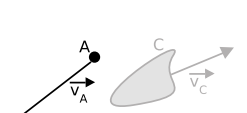
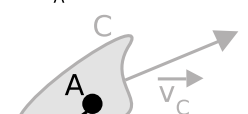
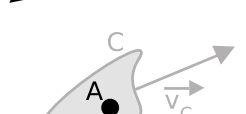
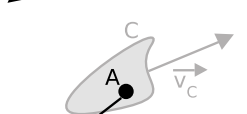
				
				
				
				

Tableau C.19 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^-p^+)C$

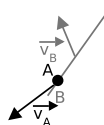
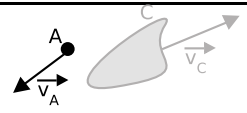
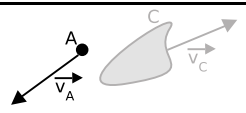
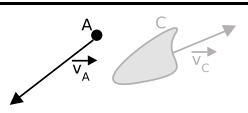
				
				
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.20 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$

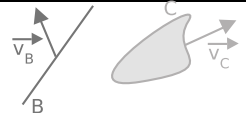
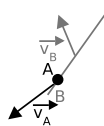
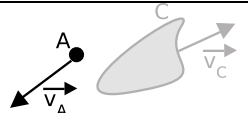
				
	$\perp$	$\perp$		
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.21 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^+p^+)C$

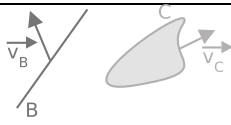
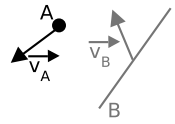
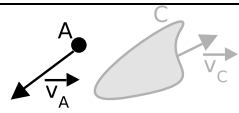
				
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	○ ○ ○

Tableau C.22 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^+p^0)C$

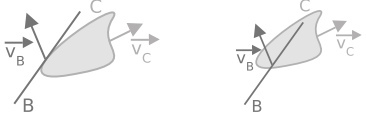
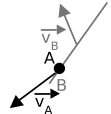
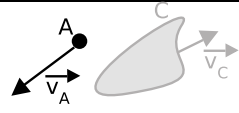
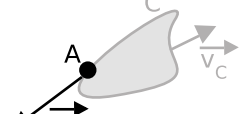
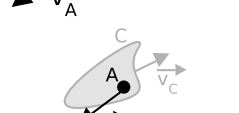
				
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$		

Tableau C.23 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^0p^0)C$

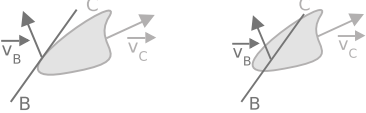
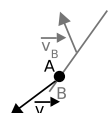
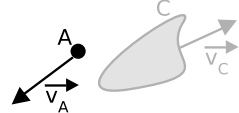
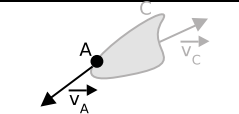
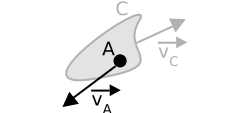
				
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$		○ ○ ●
	$\perp$	$\perp$		

Tableau C.24 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^+p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$

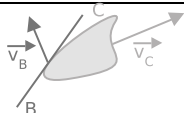
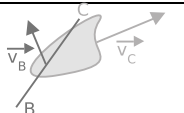
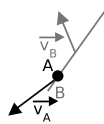
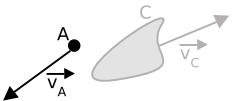
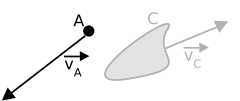
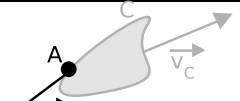
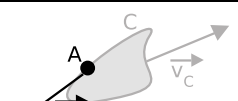
	 			
				
				
				

Tableau C.25 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^-p^+)C$

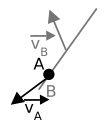
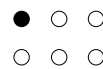
				
				
		$\perp$	$\perp$	
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.26 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$

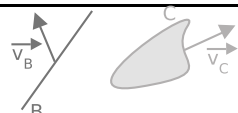
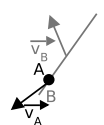
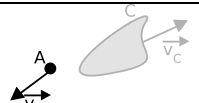
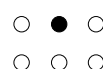
				
	$\perp$		$\perp$	
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.27 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^0)B$ et $B(v^+ p^+)C$

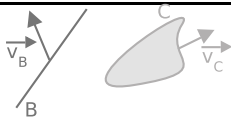
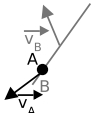
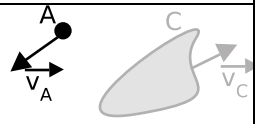
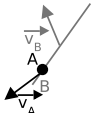
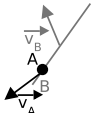
				
				
	$\perp$	$\perp$		
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.28 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^0)B$ et $B(v^+ p^0)C$

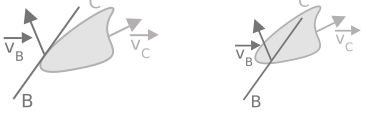
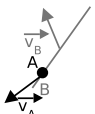
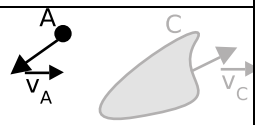
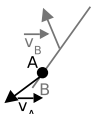
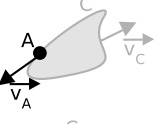
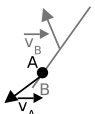
				
				
	$\perp$	$\perp$		
	$\perp$	$\perp$		

Tableau C.29 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^0)B$ et $B(v^0 p^0)C$

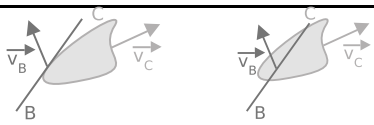
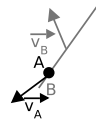
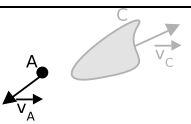
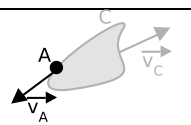
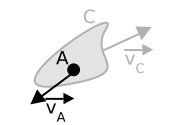
				
	$\perp$		$\perp$	○ ● ○ ○ ● ○
	$\perp$	 	$\perp$	

Tableau C.30 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^0 p^0)B$ et $B(v^- p^0)C$

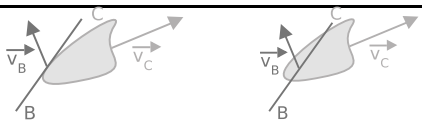
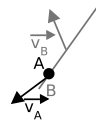
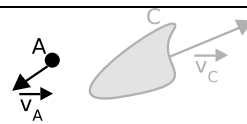
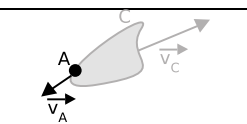
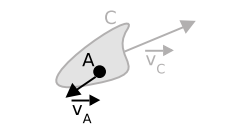
				
		$\perp$	$\perp$	● ○ ○ ● ○ ○
		$\perp$	$\perp$	
				

Tableau C.31 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^- p^0)B$ et $B(v^- p^+)C$

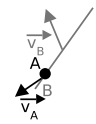
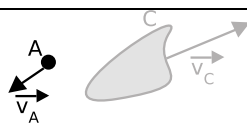
				
		$\perp$	$\perp$	● ○ ○ ○ ○ ○
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.32 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^0p^+)C$

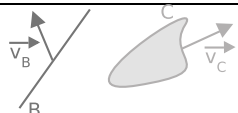
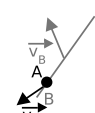
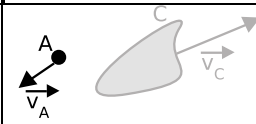
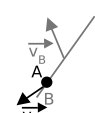
				
				
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.33 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^+p^+)C$

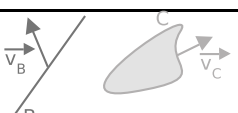
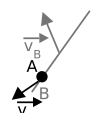
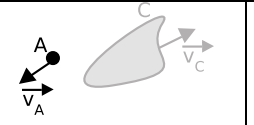
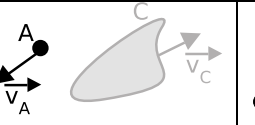
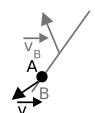
				
				
	$\perp$	$\perp$	$\perp$	

Tableau C.34 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^+p^0)C$

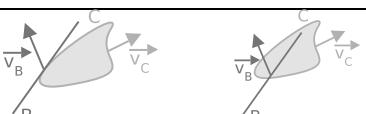
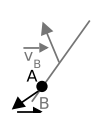
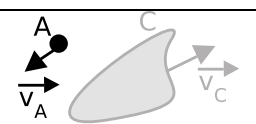
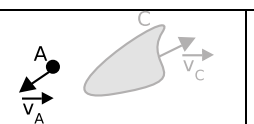
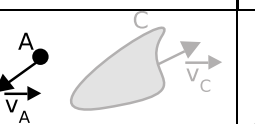
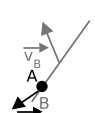
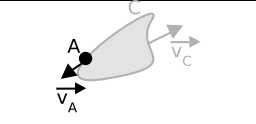
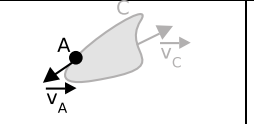
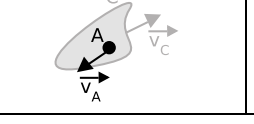
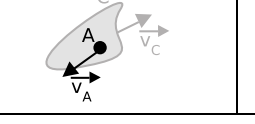
				
				
				
				

Tableau C.35 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^0p^0)C$

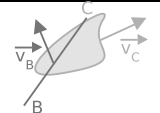
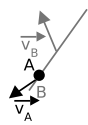
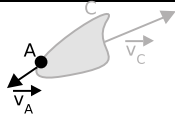
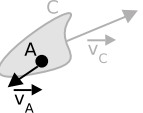
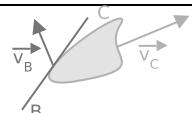
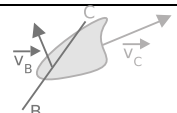
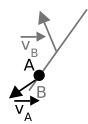
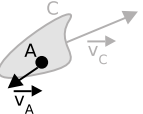
						
			$\perp$		$\perp$	☒ ☐ ☐
	 		$\perp$		$\perp$	☒ ☐ ☐

Tableau C.36 — Représentation diagrammatique des relations $A(v^-p^0)B$ et $B(v^-p^0)C$

						
			$\perp$		$\perp$	☒ ☐ ☐
			$\perp$		$\perp$	☒ ☐ ☐
						

Annexe D

TABLES DE COMPOSITIONS

Tableau D.1 — Composition point $\times$ point $\times$ point

	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ● ● ●
○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ● ● ●	○ ○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○ ● ○ ○

	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ● ● ●
○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ● ● ●	○ ○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○ ● ○ ○

Tableau D.4 — Composition point $\times$ polyligne $\times$ point

	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○

Tableau D.5 — Composition point $\times$ polyligne $\times$ polyligne

	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○

[illegible]

Tableau D.8 — Composition point× polygone× polyligne

	• ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ • ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ •
• ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• • • • • •	• • • • • •	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• • • • • •
○ • ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ •	○ • ○ ○ • ○	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ •
○ ○ • ○ ○ ○	• • • • • •	○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ •	• • • • • •	• • • • • •	○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ •
○ ○ ○ ○ • ○	• ○ ○ ○ ○ ○	○ • ○ ○ ○ ○	○ ○ • ○ ○ ○	○ ○ • ○ ○ •	○ • ○ ○ • ○	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ •
○ ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ ○ ○ ○	• • • ○ ○ ○	• • • • • •	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○	• • • • • •

Tableau D.9 — Composition point×polygone× polygone

Tableau D.10 — Composition polyligne× point× point

Tableau D.15 — Composition polyligne× polyligne× polygone

	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○

Tableau D.16 — Composition polyligne× polygone× point

	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○

Tableau D.17 — Composition polyligne× polygone× polyligne

	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●

Tableau D.18 — Composition polyligne× polygone× polygone

	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●
● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●
○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ●
○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ●

Tableau D.19 — Composition `polygone` $\times$ `point` $\times$ `point`

[illegible]

Tableau D.20 — Composition $\text{polygone} \times \text{point} \times \text{polyligne}$

	• ○ ○ ○ ○ ○	○ • ○ ○ ○ ○	○ ○ • ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ •	○ ○ ○ ○ • ○	○ ○ ○ • ○ ○
• ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• • • • • • • • •	• • • • • • • • •	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○
○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○
○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○ ○	• • • • • • • • •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	• • • • • • • • •
○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○ ○	• • • • • • • • •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ ○ • • • • • •
○ ○ ○ ○ • ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ ○ ○ • ○ ○ • ○	○ ○ ○ • ○ ○ • ○ ○
○ ○ ○ • ○ ○ ○ ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• • • • • • • • •	○ ○ ○ • • • • • •	○ ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	○ ○ ○ • ○ ○ • ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	• • • • • • • • •	○ ○ ○ ○ ○ ○ • • •	○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○	• ○ ○ • ○ ○ • ○ ○	○ • ○ ○ • ○ ○ • ○	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ • ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ •	• • • • • • • • •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ • ○ ○ • ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ •	○ ○ ○ ○ ○ ○ • • •

Tableau D.21 — Composition $\text{polygone} \times \text{point} \times \text{polygone}$

	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ○ ● ● ● ● ● ●
○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ○ ● ● ● ● ● ●	○ ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ● ●

Tableau D.22 — Composition polygone $\times$ polyligne $\times$ point

	● ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ○ ○ ● ○	○ ○ ○ ● ○ ○
● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ○	● ● ● ● ● ● ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ● ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ○ ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ● ● ● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ● ● ● ●	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ● ○	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ● ○ ○ ● ○ ○ ● ○	● ○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○
○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ●	● ● ● ● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	○ ○ ● ○ ○ ● ○ ○ ●	● ● ● ● ● ● ● ● ●

Tableau D.23 — Composition $\text{polygone} \times \text{polyligne} \times \text{polyligne}$

[illegible]

Tableau D.25 — Composition $\text{polygone} \times \text{polygone} \times \text{point}$

[illegible]

Tableau D.27 — Composition polygone $\times$ polygone $\times$ polygone

[illegible]

Annexe E

TYPES DES MESSAGES AIS

Tableau E.1 — Fréquence d'émission des informations

Type	Nom	Description
1	Compte rendu de position	Compte rendu de position programmé
2	Compte rendu de position	Compte rendu de position programmé attribué
3	Compte rendu de position	Compte rendu de position spécial, réponse à une interrogation
4	Compte rendu station de base	Position, UTC, date et numéro d'intervalle de temps considéré de la station de base
5	Données statiques et concernant le voyage	Compte rendu de données statiques programmé et de données de voyage concernant le navire
6	Message binaire adressé	Données binaires pour les communications à adressage sélectif
7	Accusé de réception binaire	Accusé de réception des données binaires à adressage sélectif reçues
8	Message radiodiffusé binaire	Données binaires pour communications radiodiffusées
9	Compte rendu d'aéronef standard participant à des opérations de recherche et de sauvetage	Copte rendu de position pour des stations embarquées participant à des opérations de recherche et de sauvetage uniquement

Suite page suivante . . .

... suite de la page précédente

Type	Nom	Description
10	Demande UTC date	Demande UTC Date
11	Réponse UTC date	Heure UTC au moment considéré et date si possible
12	message à adressage sélectif relatif à la sécurité	Données relatives à la sécurité pour communication à adressage sélectif
13	Accusé de réception relatif à la sécurité	Accusé de réception du message relatif à la sécurité reçu à adressage sélectif
14	message radiodiffusé relatif à la sécurité	Données relatives à la sécurité pour communication radiodiffusée
15	Interrogation	Demande d'un type de message déterminé
16	Commande mode attribution	attribution d'un comportement de compte rendu déterminé par une autorité compétente utilisant une station de base
17	message binaire radiodiffusé DGNSS	Correction DGNSS apportées par une station de base
18	Compte rendu de position standard d'un équipement de classe B	Compte rendu de position standard d'un équipement mobile de navire de classe B à utiliser à la place des messages 1, 2, 3
19	Compte rendu de position élargi d'un équipement de classe B	Compte rendu de position élargi pour un équipement mobile de navire de classe B : contient d'autres informations statiques
20	Message de gestion de la liaison de données	Réservation d'intervalle de temps pour la ou les stations de base
21	Compte rendu pour les aides à la navigation	Compte rendu de position et de situation pour les aides à la navigation
22	Gestion des voies	Gestion des voies et des modes de l'émetteur récepteur par une station de base

Tableau E.2 — Informations du message de type 1

Nombre de bits	Description
6	Type du message
2	Indicateur de répétition
30	Numéro MMSI
4	Statut de navigation
8	Vitesse angulaire de virage
10	Vitesse de fond
1	Précision de la position
28	Longitude
27	Latitude
12	Route de fond
9	Cap vrai
6	Horodatage
4	Réservé pour des applications régionales
1	Réservé
1	Fanion RAIM : surveille l'intégrité du récepteur
19	Etat de la communication

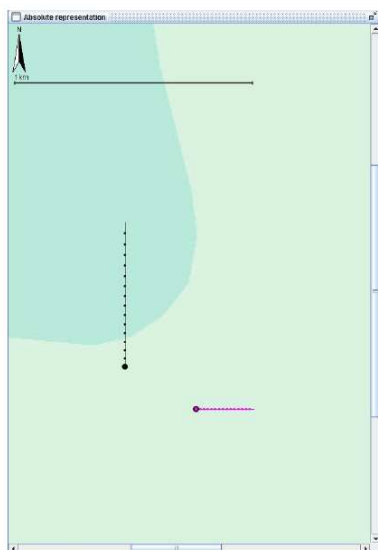
Tableau E.3 — Informations du message de type 5

Nombre de bits	Description
6	Type du message
2	Indicateur de répétition
30	Numéro MMSI
2	Version de l'AIS
30	Numéro OMI
42	Indicatif
120	Nom
8	Type de navire et type de cargaison
30	Dimension
4	Dispositif électronique de positionnement
20	Temps estimé pour arriver
8	Horodatage
120	Réservé pour des applications régionales
4	Réservé
1	Fanion RAIM : surveille l'intégrité du récepteur
19	Etat de la communication

Annexe F

COMPARAISONS DES CONFIGURATIONS DANS LA REPRÉSENTATION ABSOLUE

Explications



Vous vous trouvez dans le navire représenté par un point noir

L'intervalle de temps de la visualisation est identique pour les deux navires

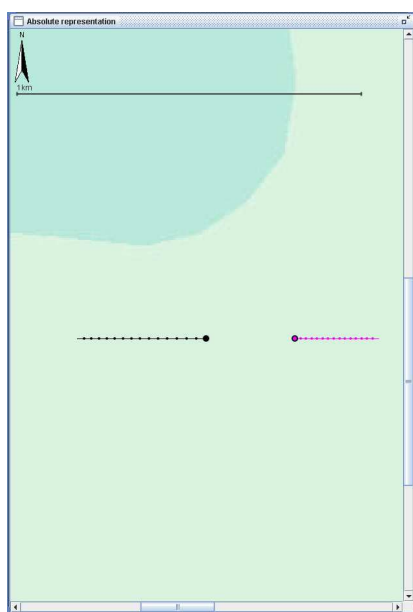
L'intervalle de temps entre deux points est identique pour les deux navires

La suite de traits et de petits points représente la trajectoire effectuée par le navire

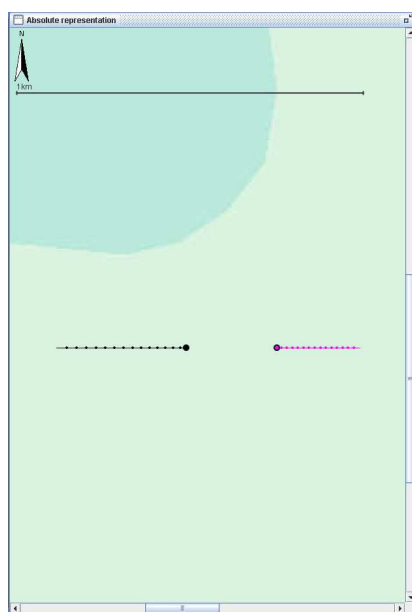
Le point le plus gros représente la position actuelle du navire

**Dans les diapos suivantes,
parmi deux situations différentes
proposées, vous devez
déterminer : la situation la plus
dangereuse lorsque cela est
possible**

Figure F.1 — Explications

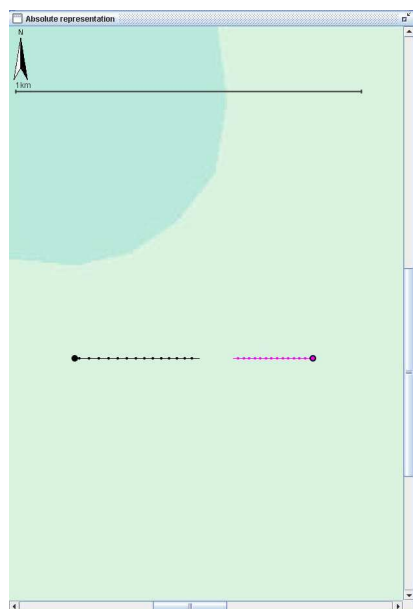


Cas A

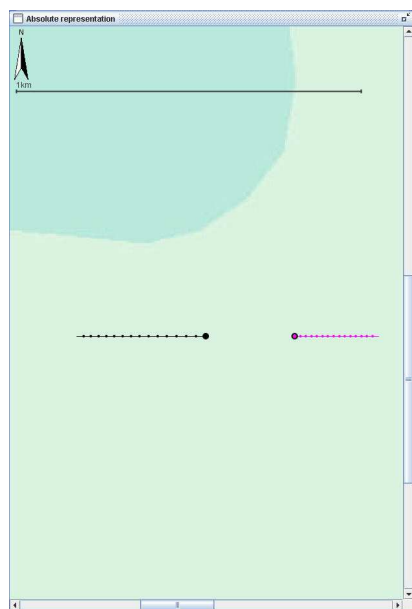


Cas B

Diapositive F.1 — Comparaison des configurations 3 et 7

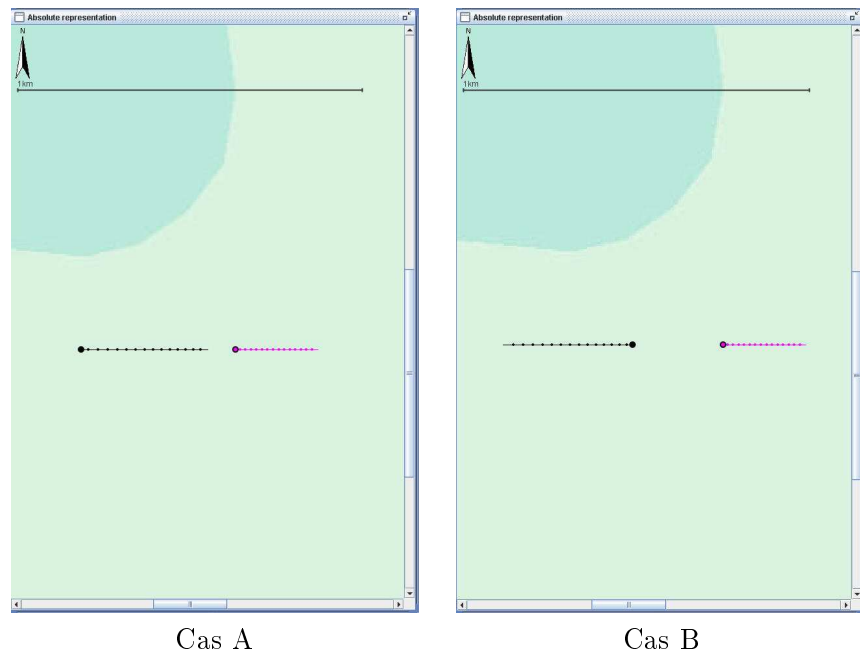


Cas A

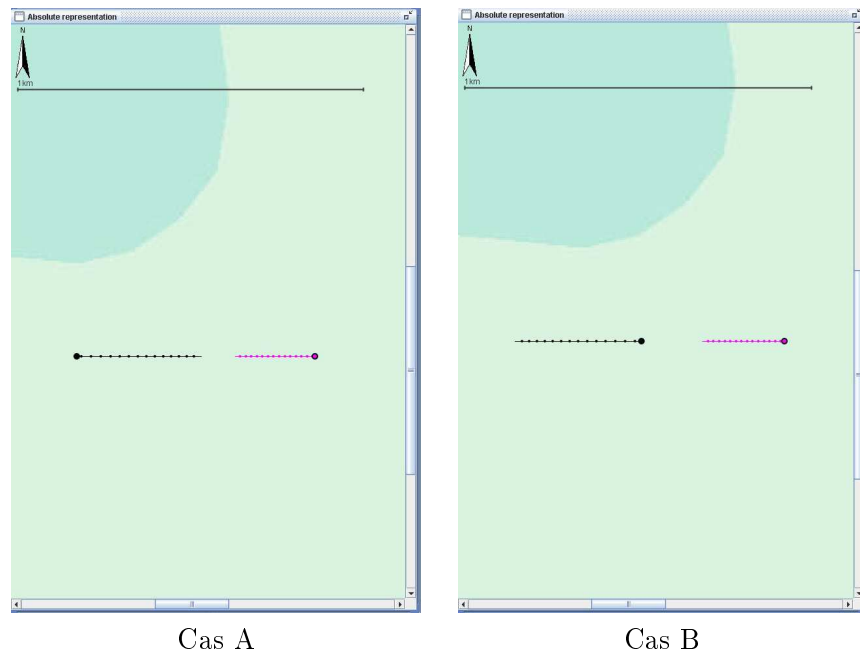


Cas B

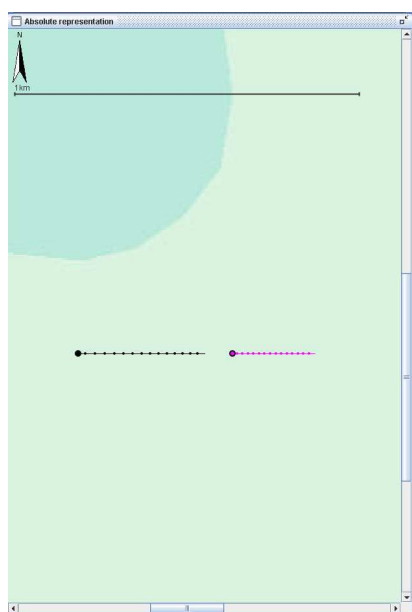
Diapositive F.2 — Comparaison des configurations 1 et 6



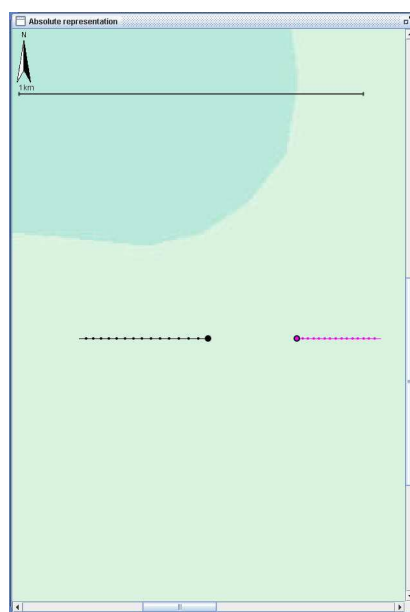
Diapositive F.3 — Comparaison des configurations 2 et 5



Diapositive F.4 — Comparaison des configurations 1 et 4

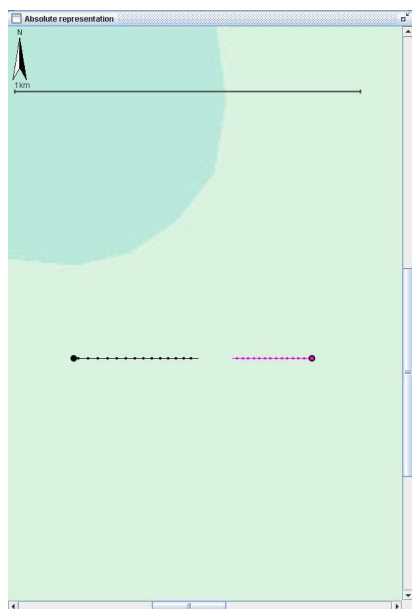


Cas A

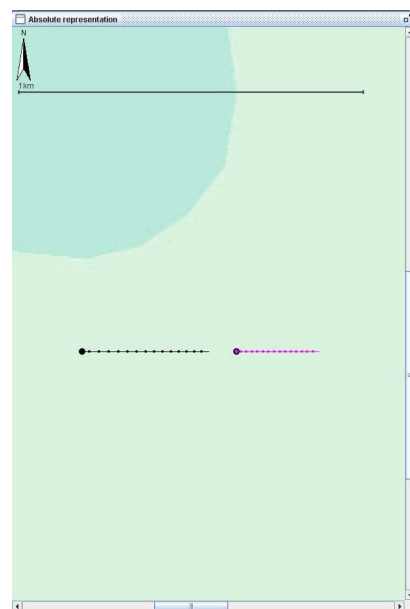


Cas B

Diapositive F.5 — Comparaison des configurations 2 et 3

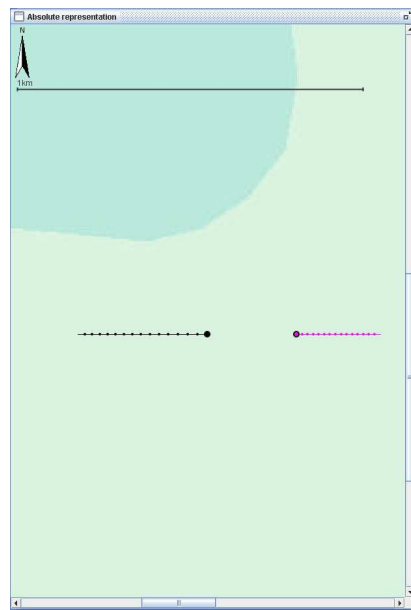


Cas A

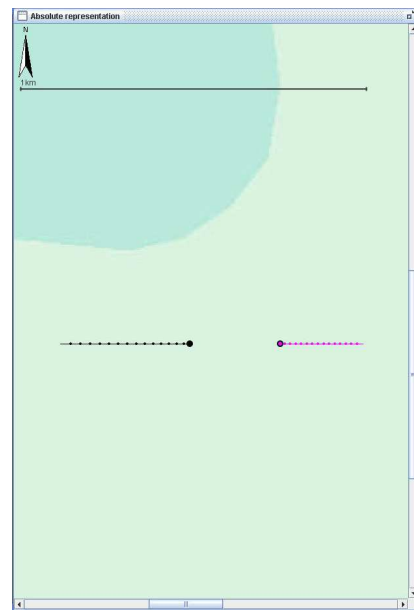


Cas B

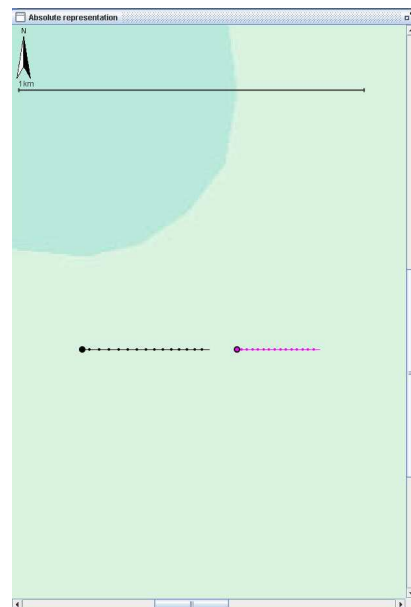
Diapositive F.6 — Comparaison des configurations 1 et 2



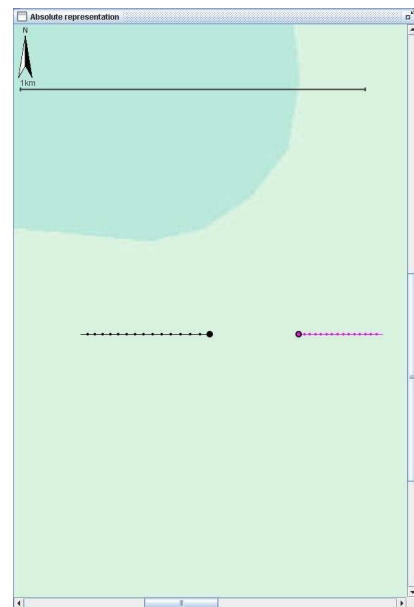
Cas A



Cas B

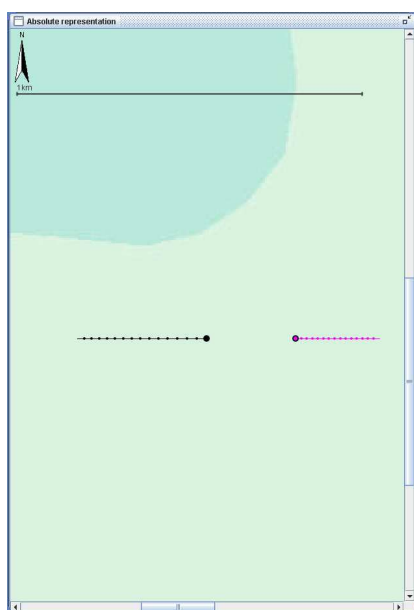
Diapositive F.7 — Comparaison des configurations 6 et 7

Cas A

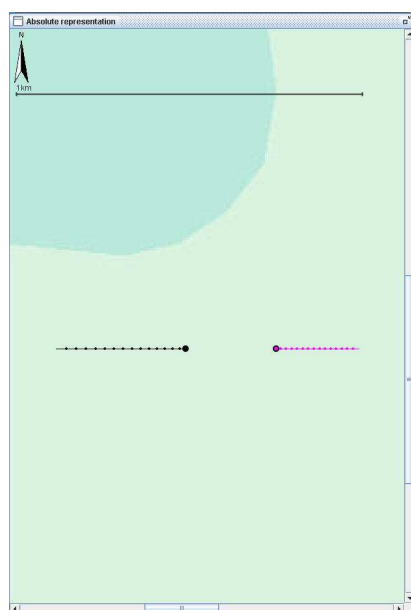


Cas B

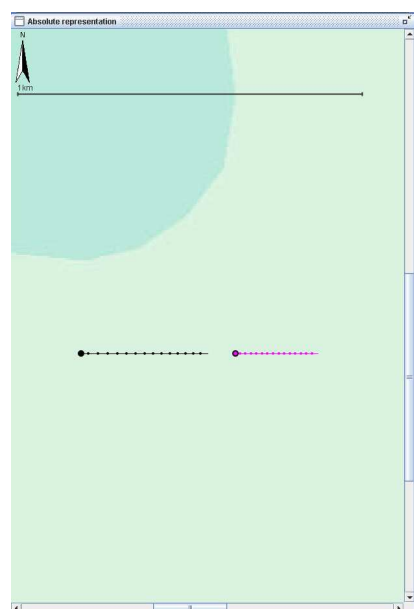
Diapositive F.8 — Comparaison des configurations 2 et 6



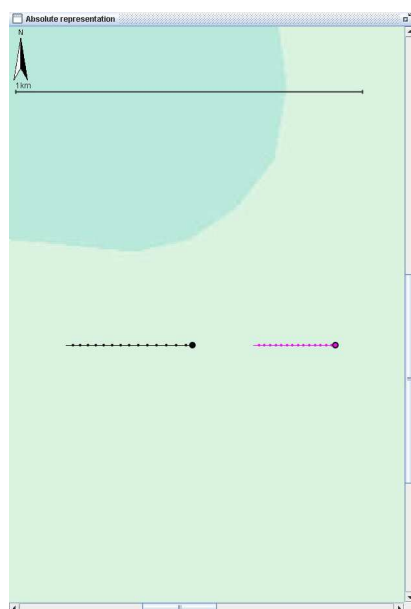
Cas A



Cas B

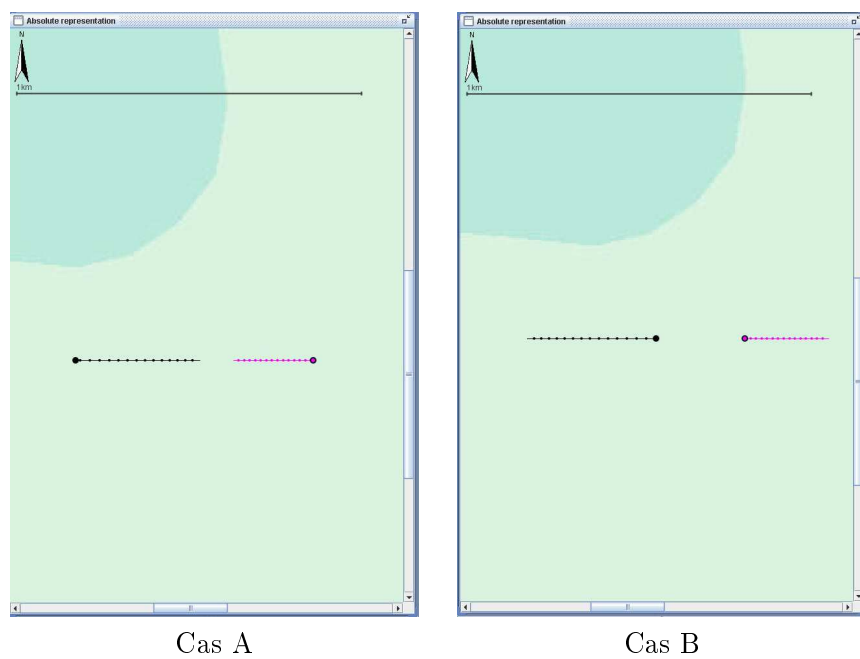
Diapositive F.9 — Comparaison des configurations 3 et 5

Cas A

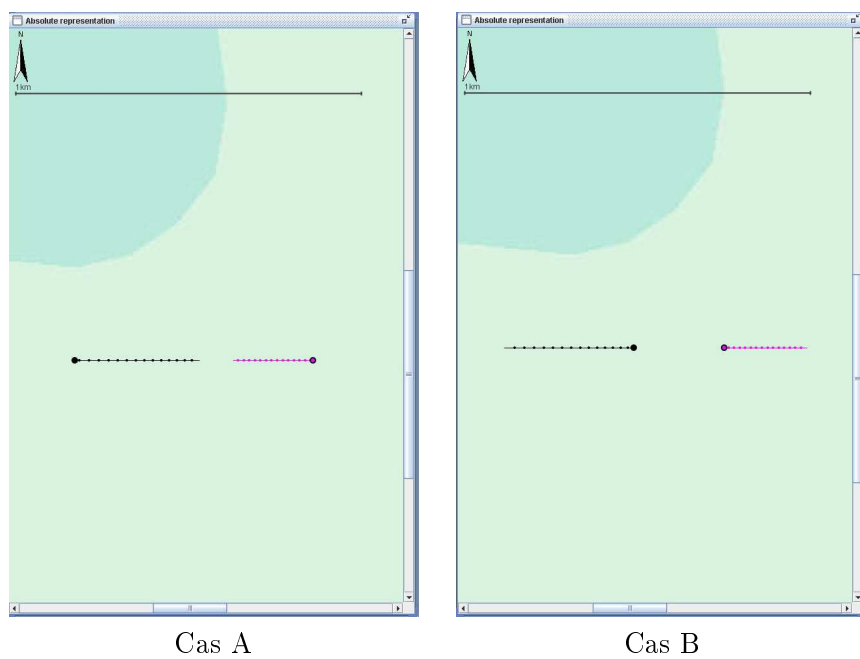


Cas B

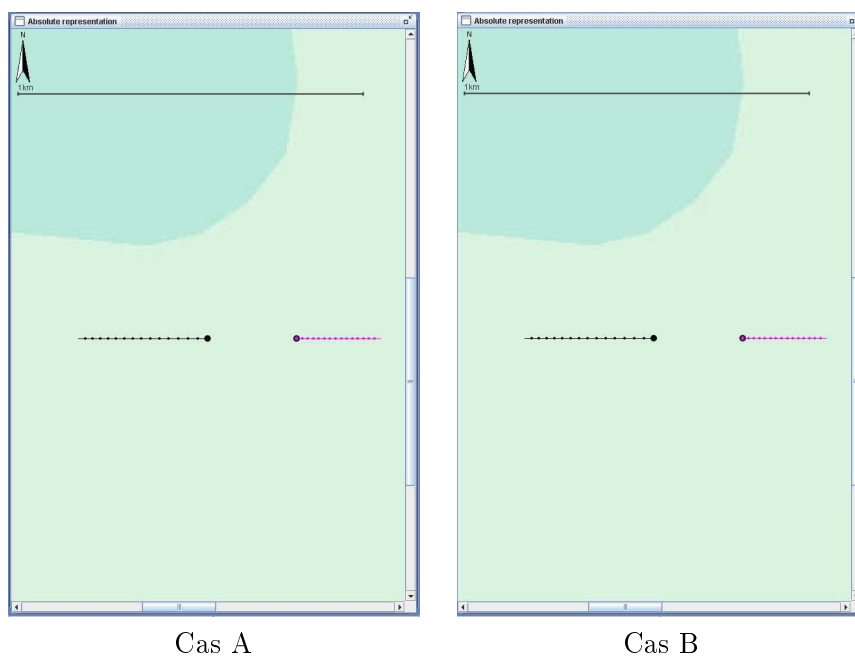
Diapositive F.10 — Comparaison des configurations 2 et 4



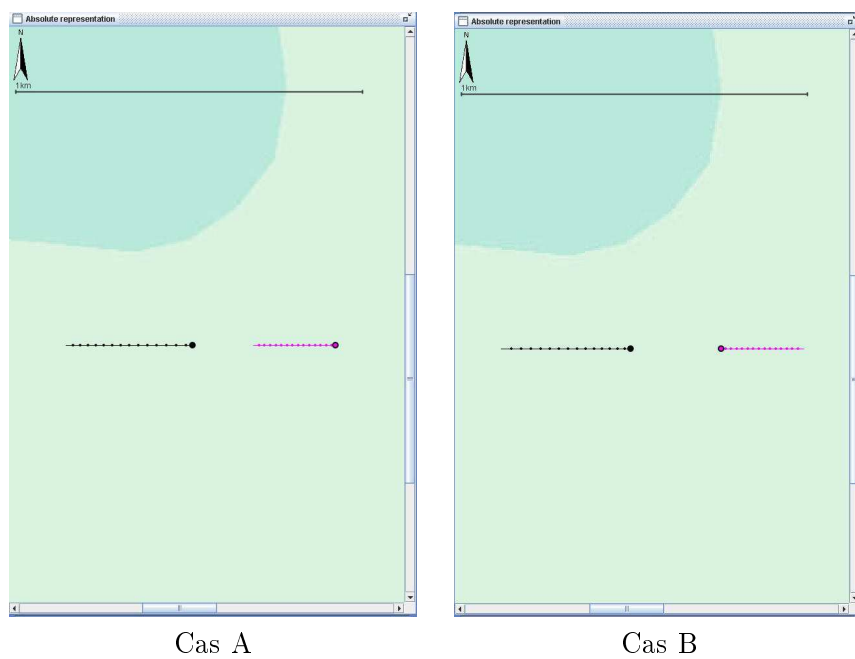
Diapositive F.11 — Comparaison des configurations 1 et 3



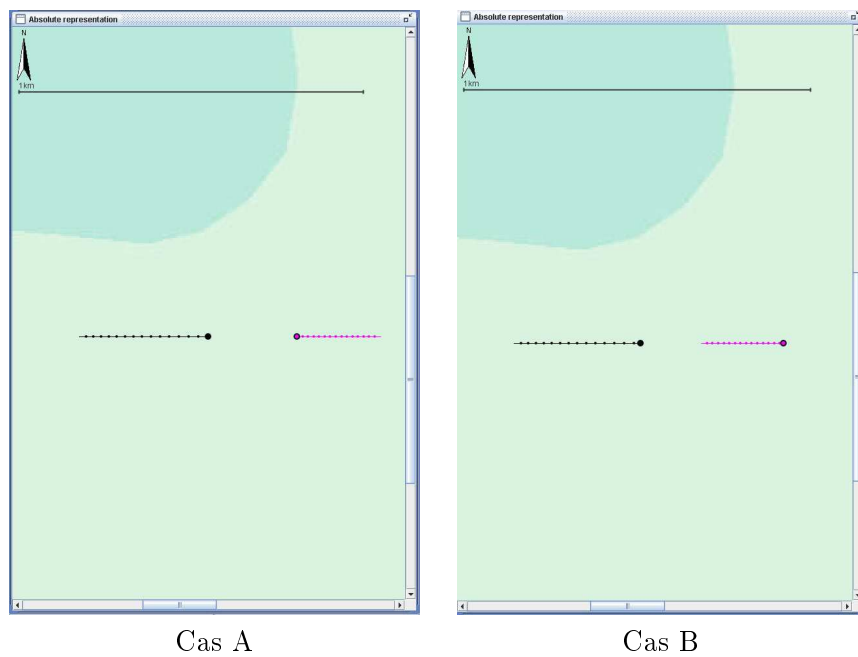
Diapositive F.12 — Comparaison des configurations 1 et 7



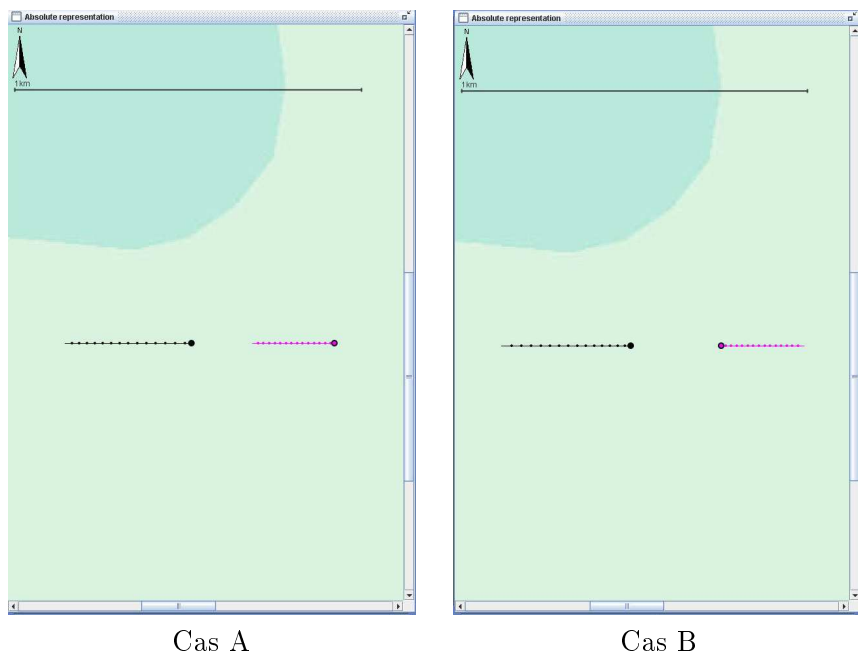
Diapositive F.13 — Comparaison des configurations 3 et 6



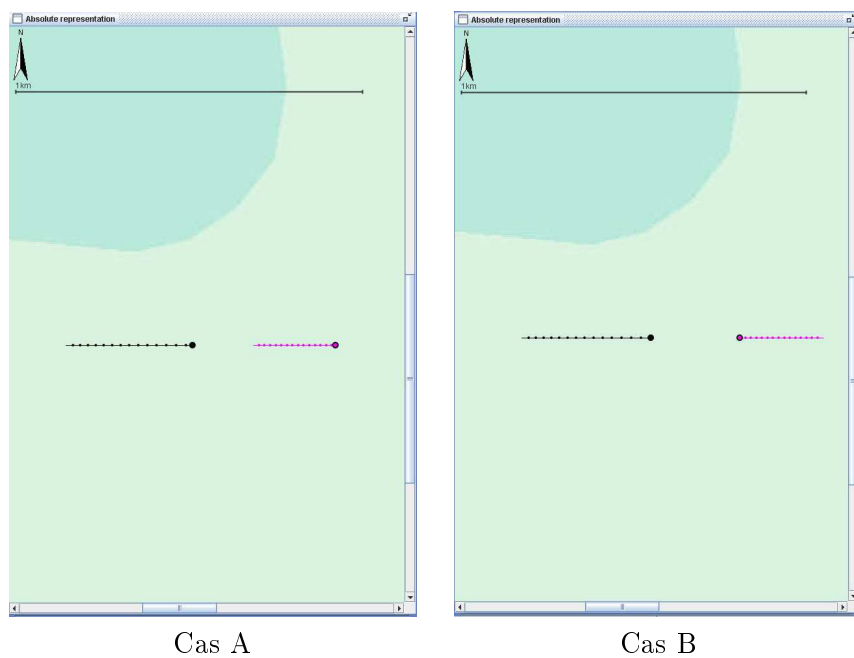
Diapositive F.14 — Comparaison des configurations 4 et 5



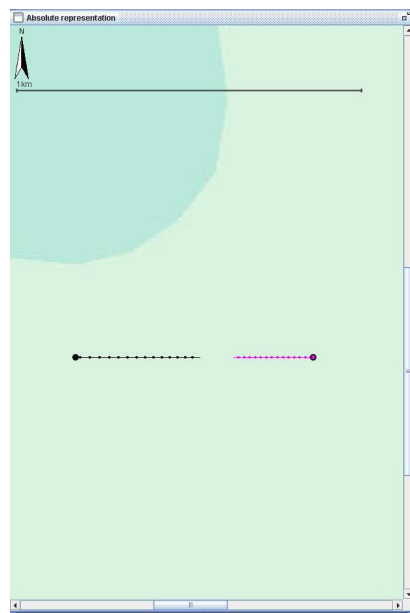
Diapositive F.15 — Comparaison des configurations 3 et 4



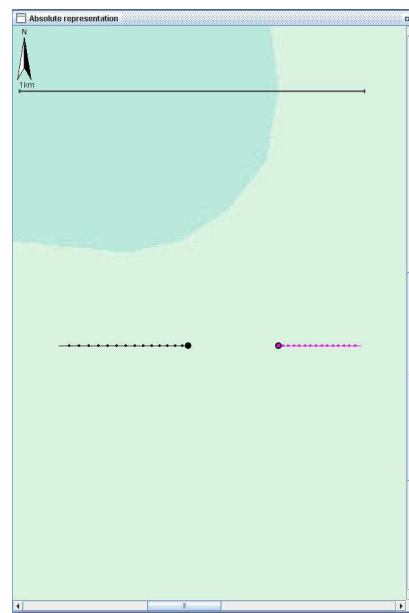
Diapositive F.16 — Comparaison des configurations 4 et 7



Diapositive F.17 — Comparaison des configurations 4 et 6

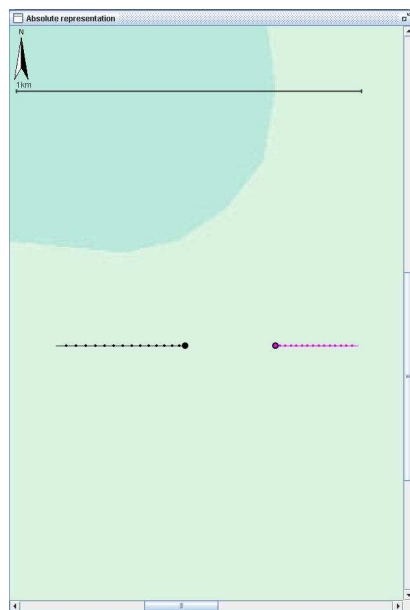


Cas A

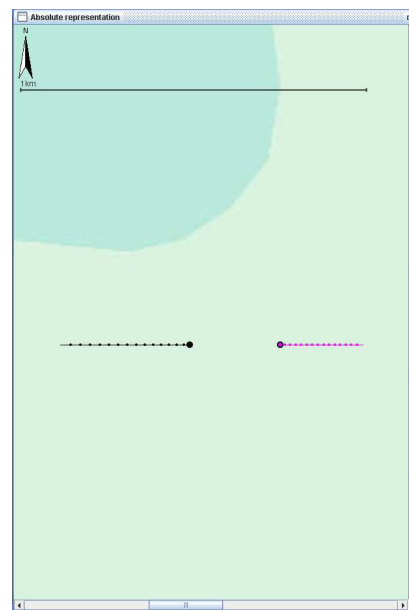


Cas B

Diapositive F.18 — Comparaison des configurations 1 et 5

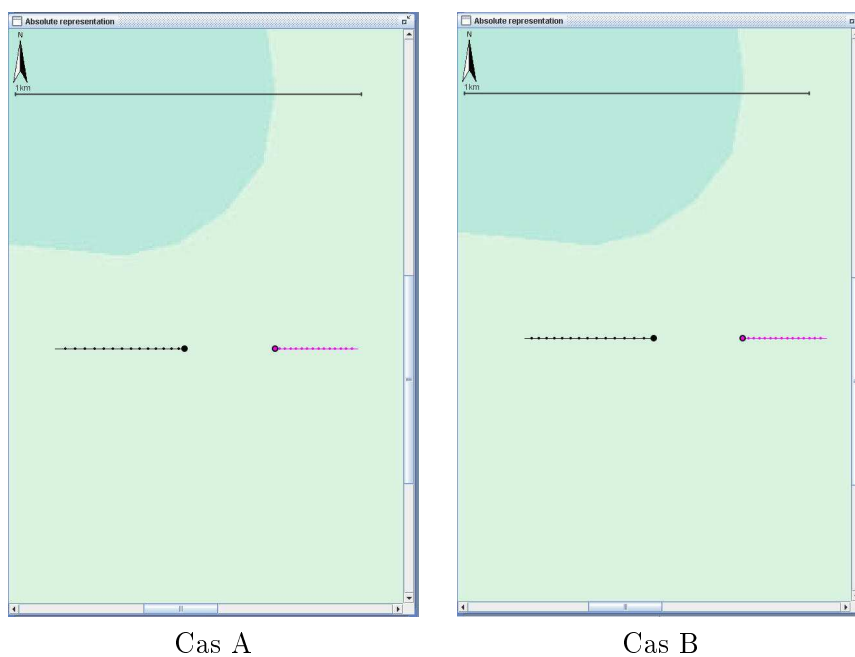
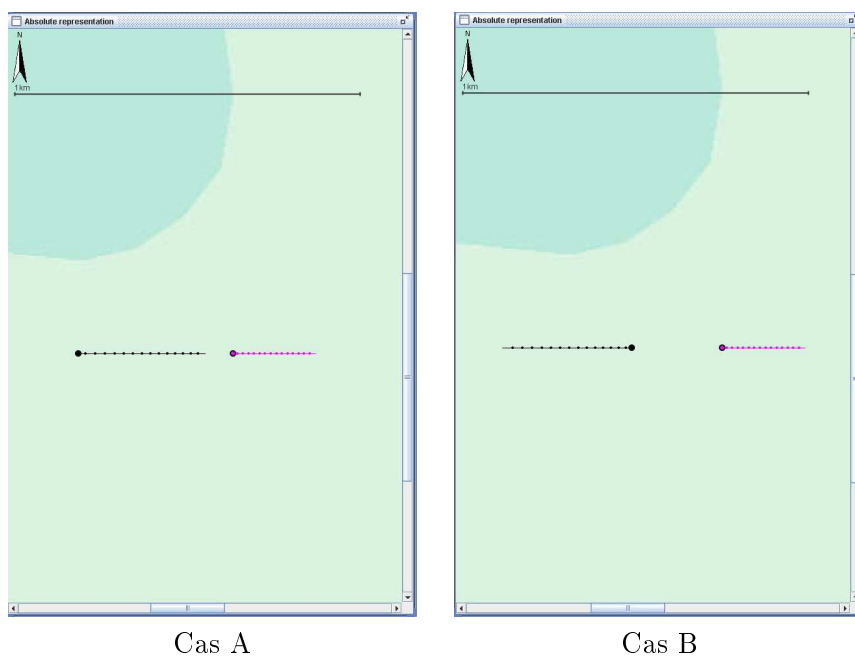


Cas A



Cas B

Diapositive F.19 — Comparaison des configurations 5 et 7

*Diapositive F.20* — Comparaison des configurations 5 et 6*Diapositive F.21* — Comparaison des configurations 2 et 7

Annexe G

COMPARAISONS DES CONFIGURATIONS DANS LA REPRÉSENTATION RELATIVE

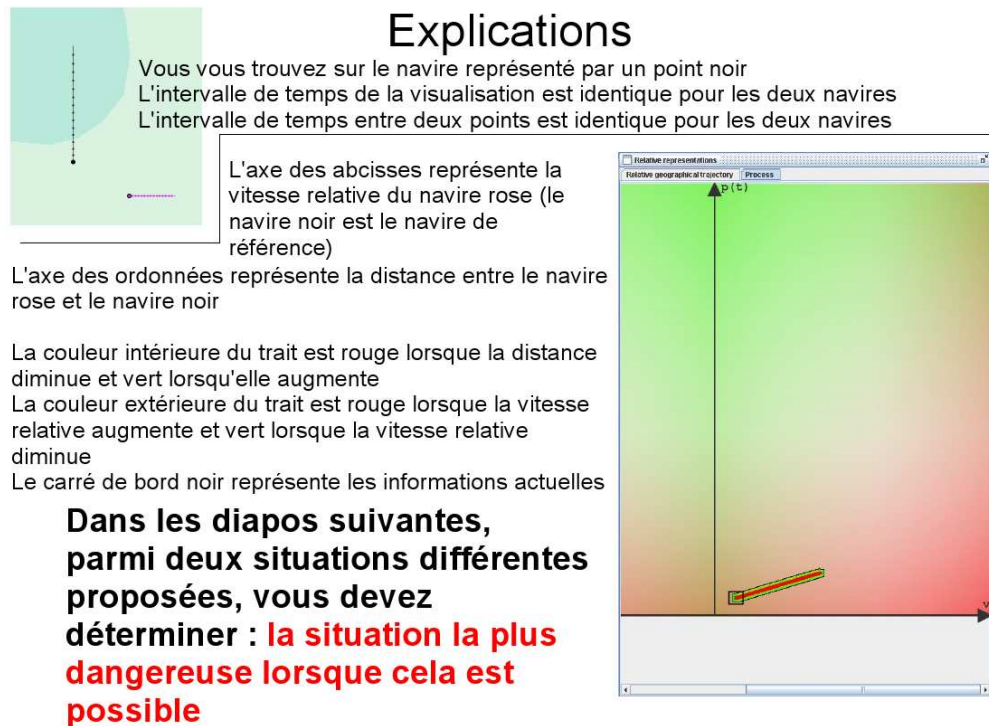
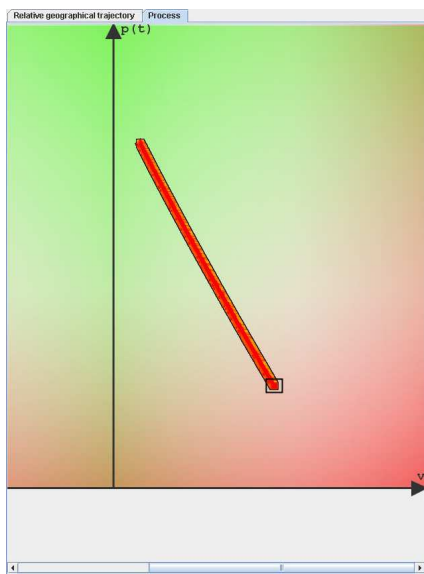
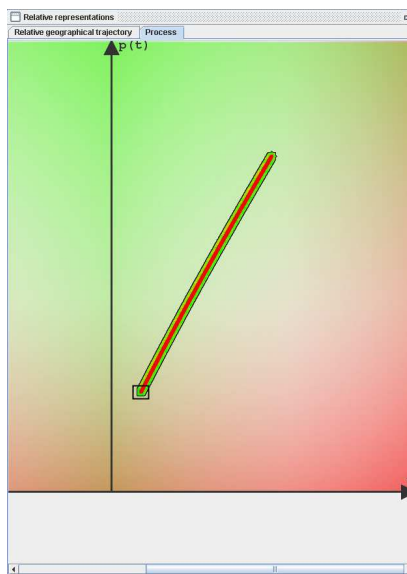


Figure G.1 — Explications

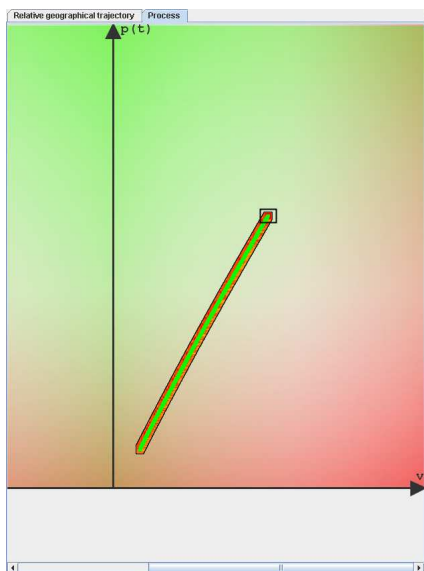


Cas A

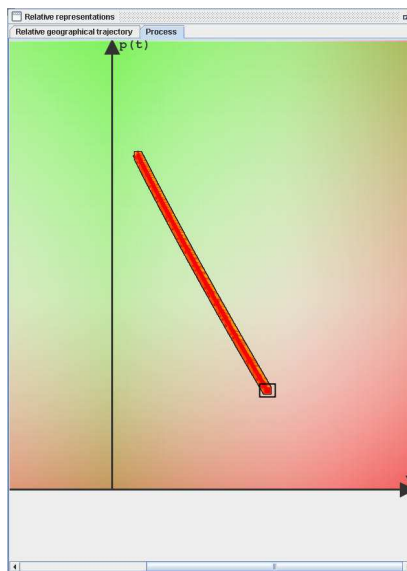


Cas B

Diapositive G.1 — Comparaison des configurations 3 et 7

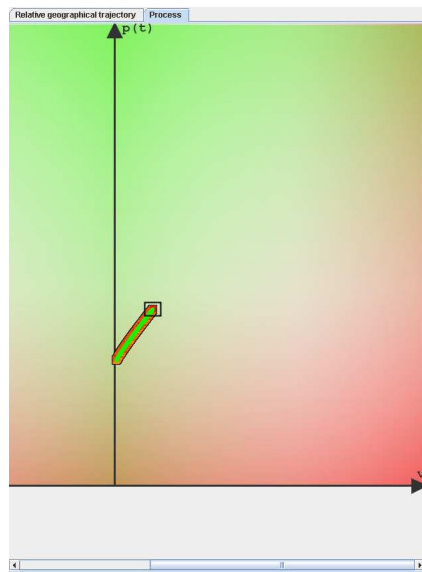


Cas A

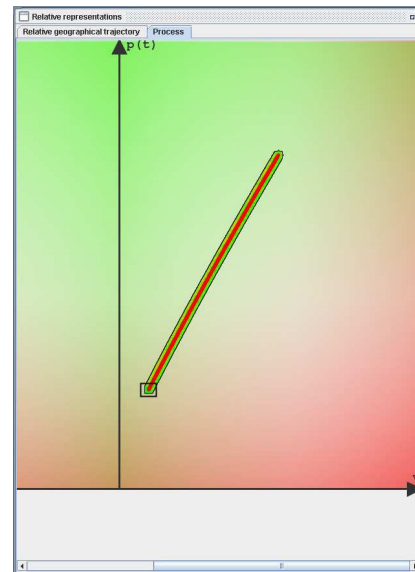


Cas B

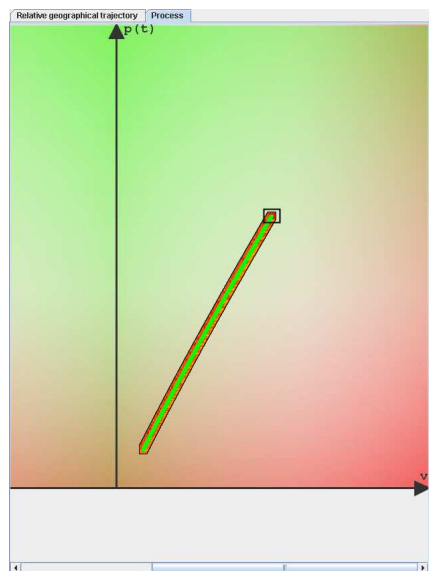
Diapositive G.2 — Comparaison des configurations 1 et 6



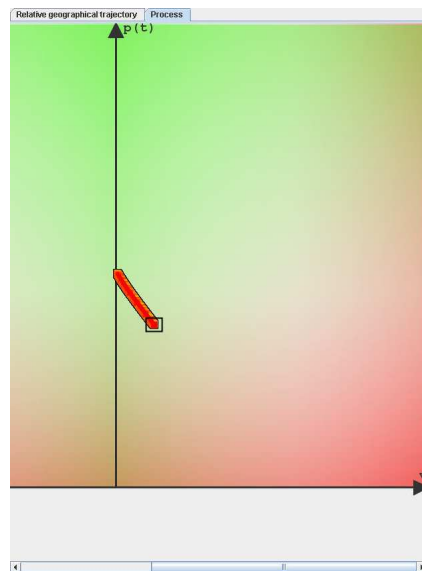
Cas A



Cas B

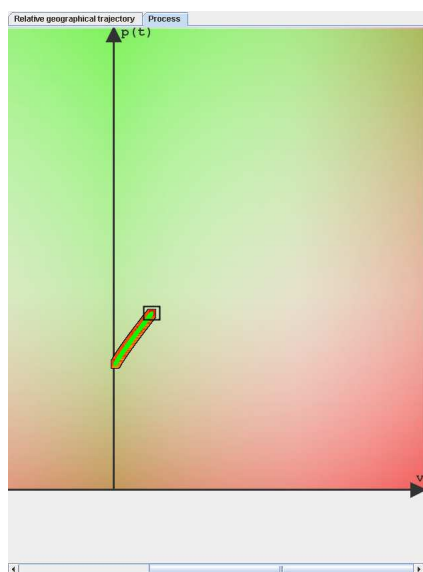
Diapositive G.3 — Comparaison des configurations 2 et 5

Cas A

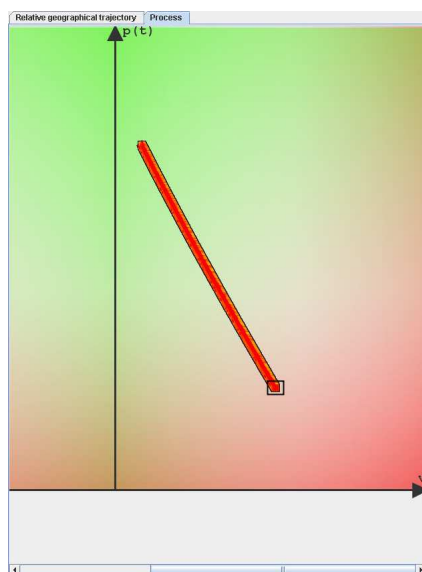


Cas B

Diapositive G.4 — Comparaison des configurations 1 et 4

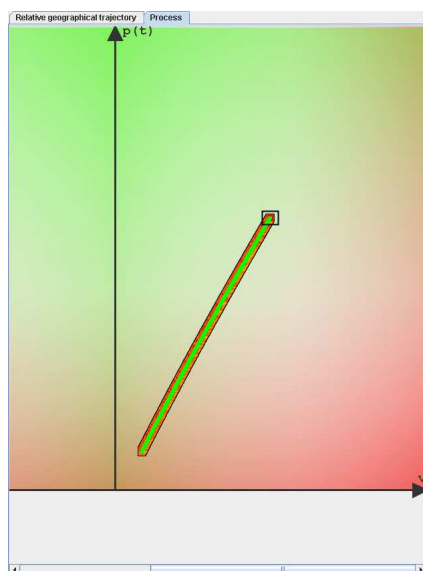


Cas A

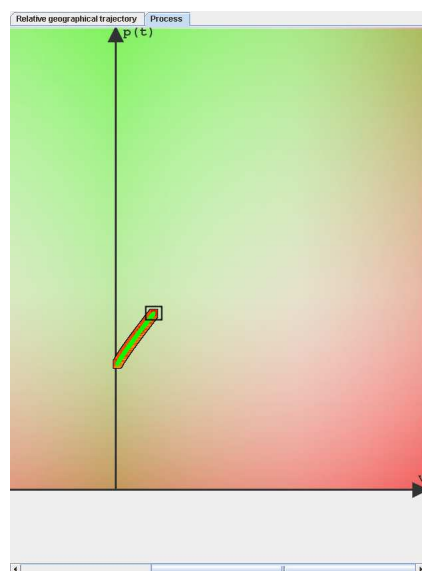


Cas B

Diapositive G.5 — Comparaison des configurations 2 et 3

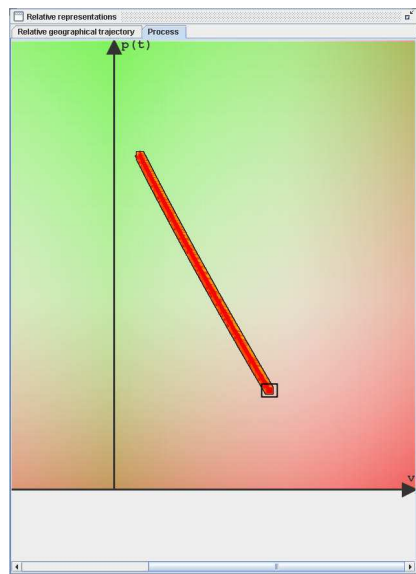


Cas A

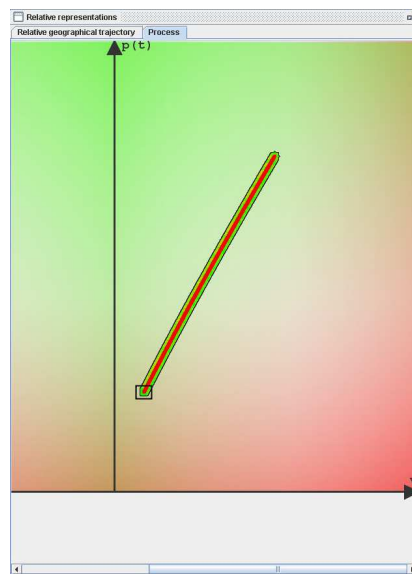


Cas B

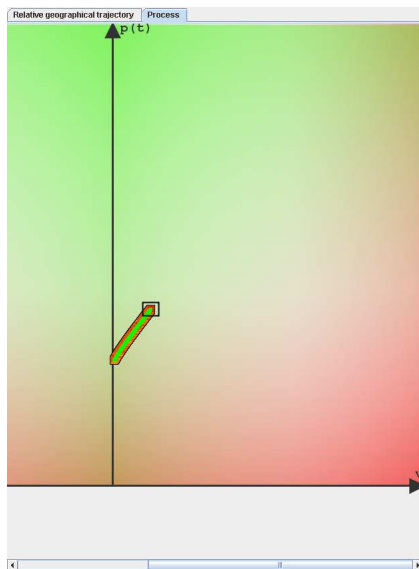
Diapositive G.6 — Comparaison des configurations 1 et 2



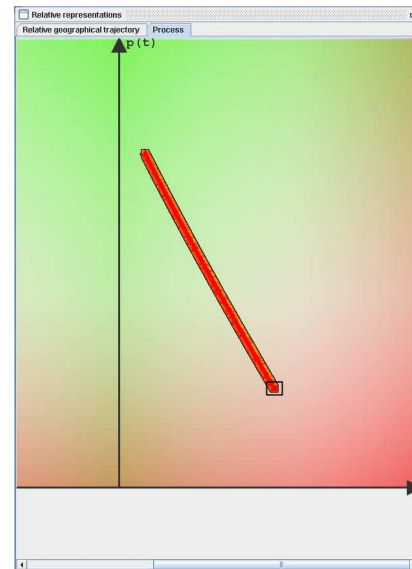
Cas A



Cas B

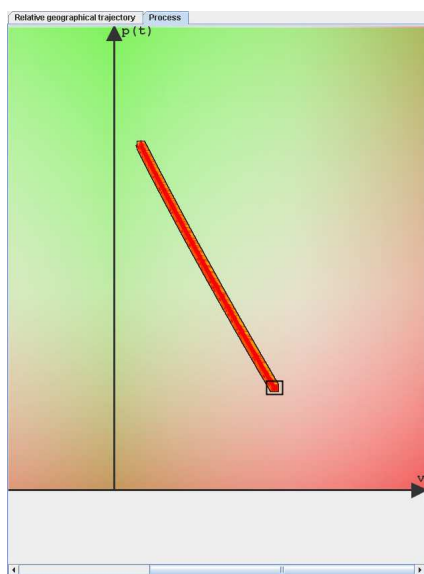
Diapositive G.7 — Comparaison des configurations 6 et 7

Cas A

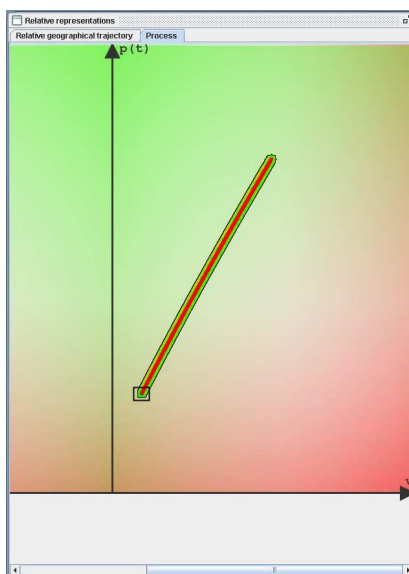


Cas B

Diapositive G.8 — Comparaison des configurations 2 et 6

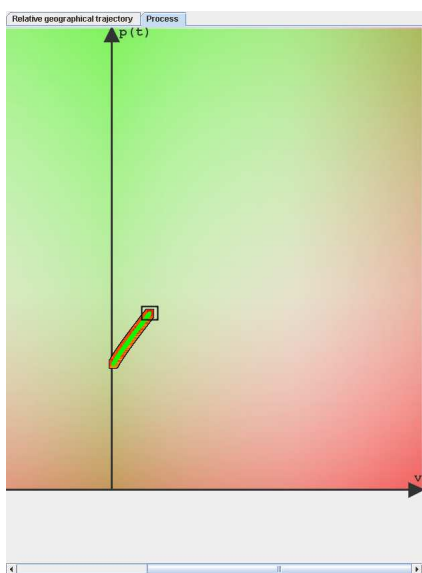


Cas A

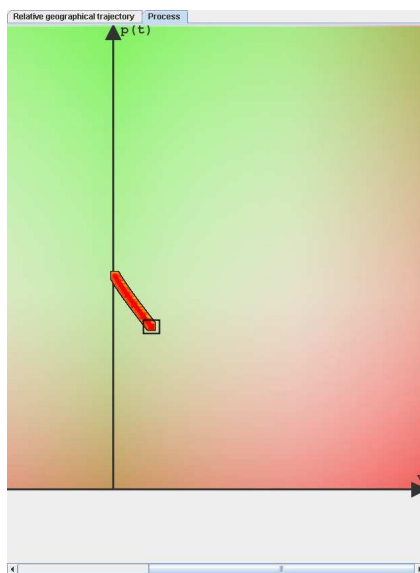


Cas B

Diapositive G.9 — Comparaison des configurations 3 et 5

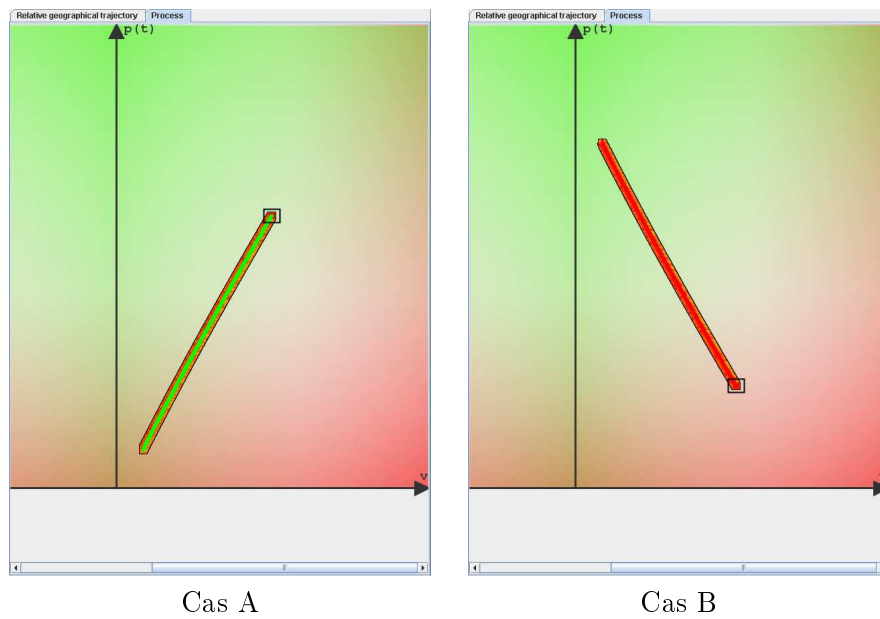


Cas A

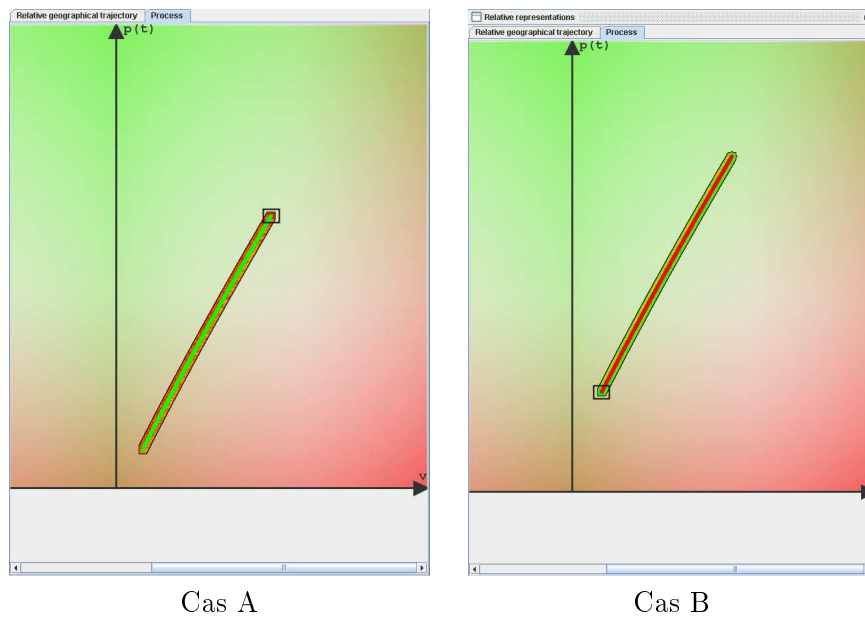


Cas B

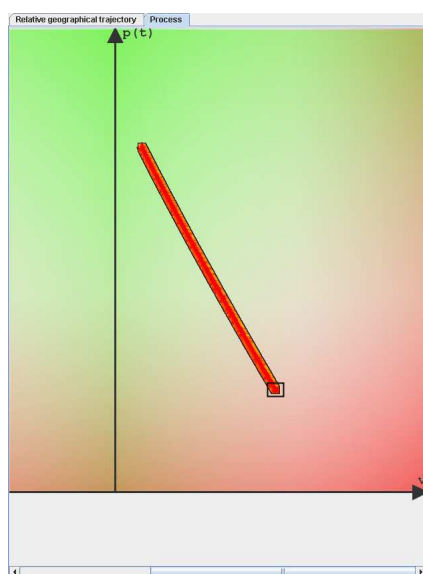
Diapositive G.10 — Comparaison des configurations 2 et 4



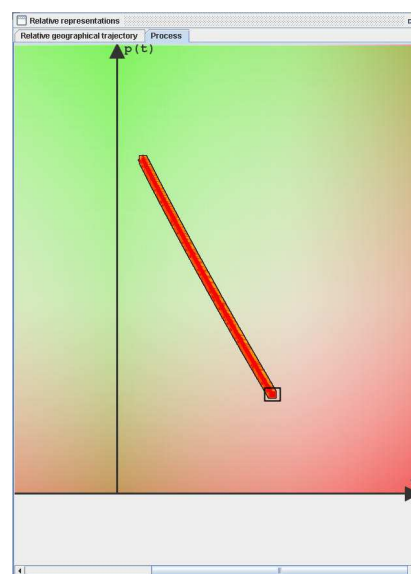
Diapositive G.11 — Comparaison des configurations 1 et 3



Diapositive G.12 — Comparaison des configurations 1 et 7

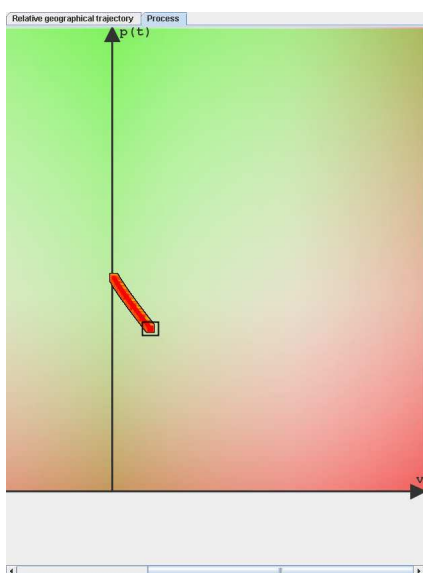


Cas A

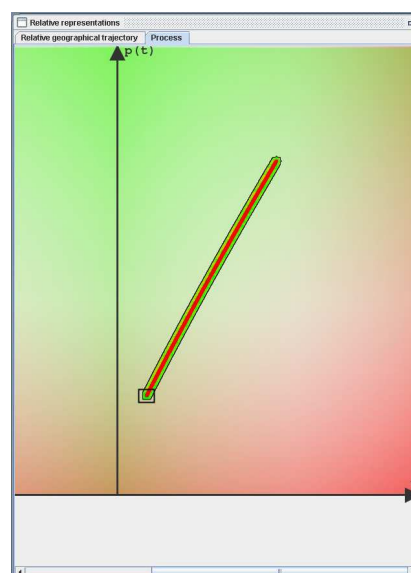


Cas B

Diapositive G.13 — Comparaison des configurations 3 et 6

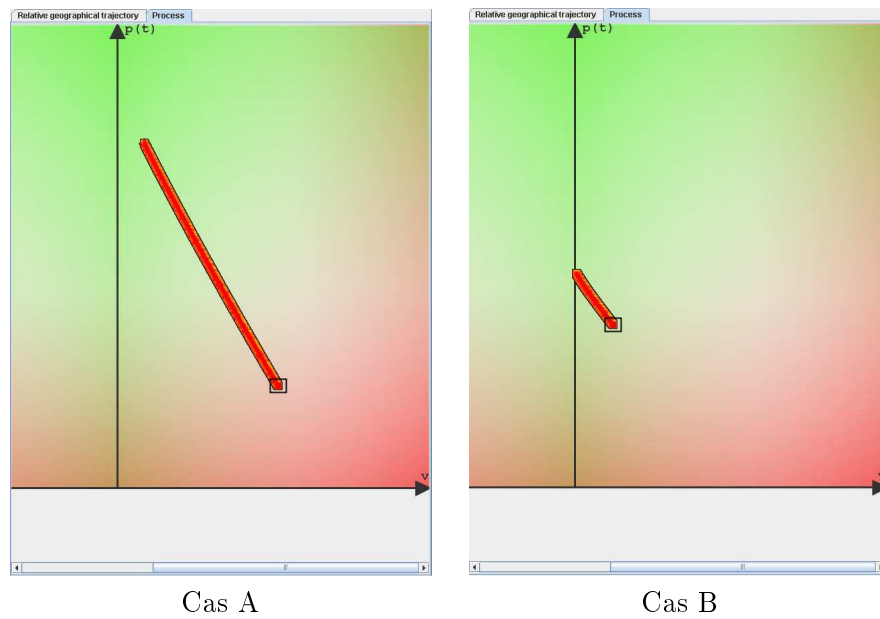


Cas A

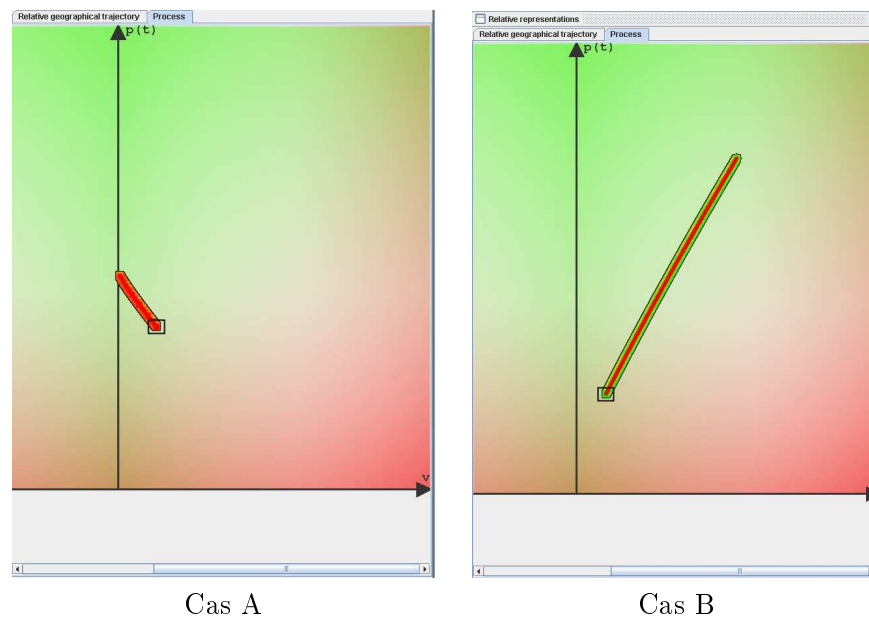


Cas B

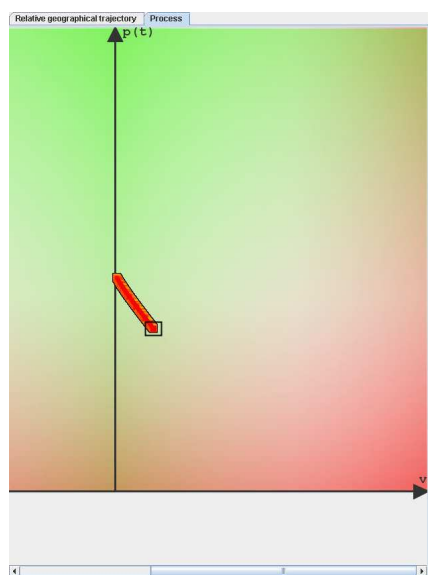
Diapositive G.14 — Comparaison des configurations 4 et 5



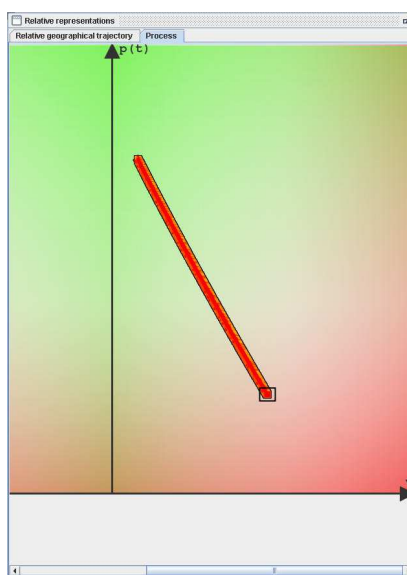
Diapositive G.15 — Comparaison des configurations 3 et 4



Diapositive G.16 — Comparaison des configurations 4 et 7

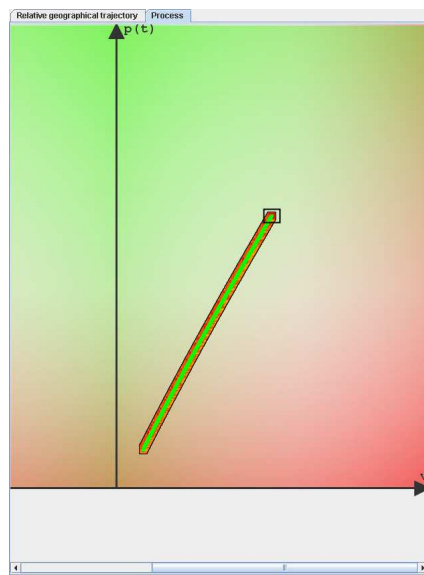


Cas A

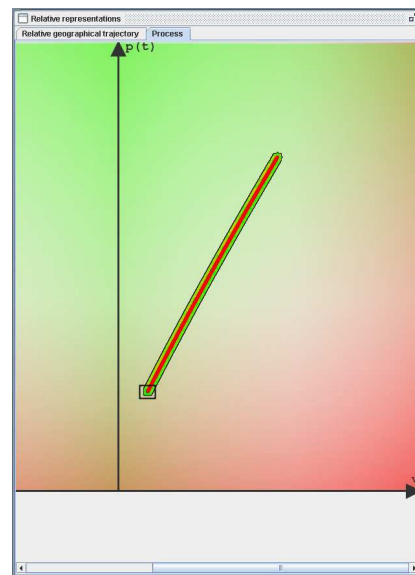


Cas B

Diapositive G.17 — Comparaison des configurations 4 et 6

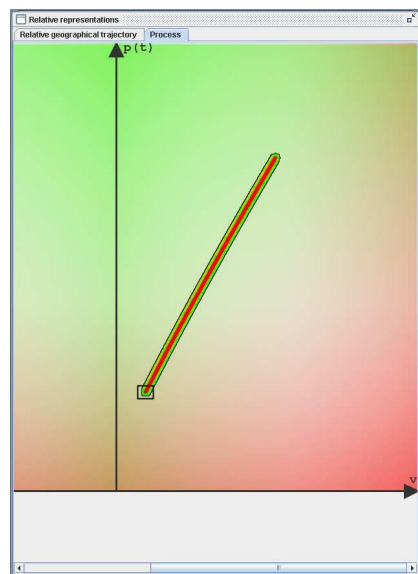


Cas A

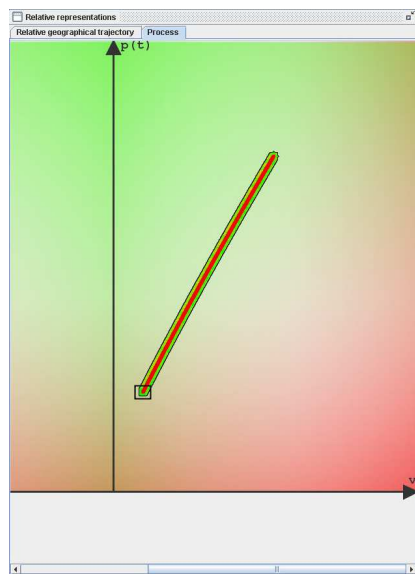


Cas B

Diapositive G.18 — Comparaison des configurations 1 et 5

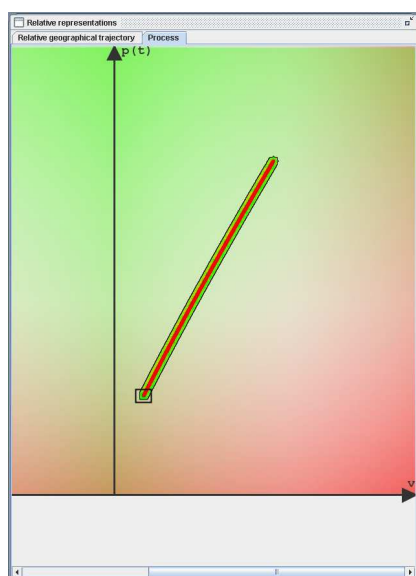


Cas A

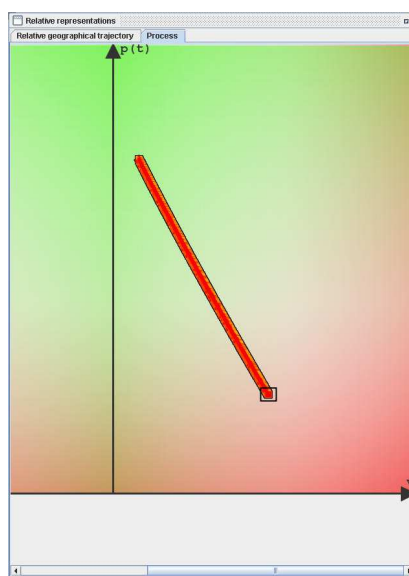


Cas B

Diapositive G.19 — Comparaison des configurations 5 et 7

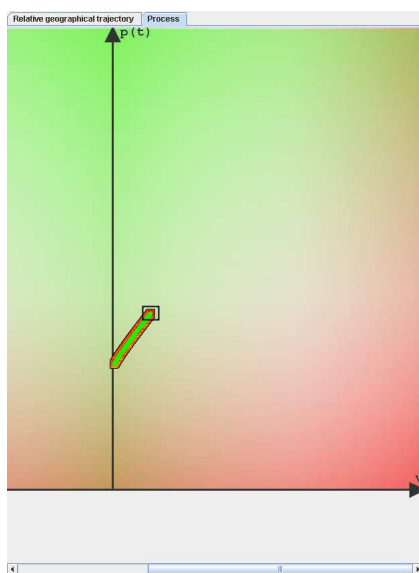


Cas A

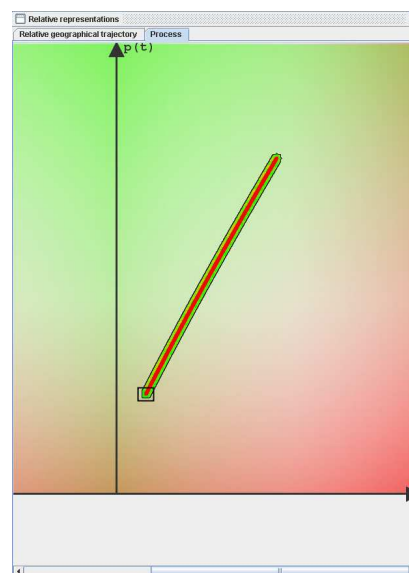


Cas B

Diapositive G.20 — Comparaison des configurations 5 et 6



Cas A



Cas B

Diapositive G.21 — Comparaison des configurations 2 et 7

BIBLIOGRAPHIE

- [Agarwal et al., 2000] Agarwal, P., Arge, L., et Erickson, J. (2000). Indexing moving points. In *Proceedings of the Nineteenth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems, 15-17 Mai, 2000, Dallas, Texas, USA*, pages 175–186. ACM.
- [Allen, 1983] Allen, J. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Journal of the ACM*, 26(11) :832–843.
- [Arcieri et al., 1993] Arcieri, F., Ercoli, S., et Nardelli, E. (1993). The GeoSQL language for the manipulation of geographical data. In *ICCI '93 : Proceedings of the Fifth International Conference on Computing and Information*, pages 484–490, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Aufaure-Portier, 1995] Aufaure-Portier, M. (1995). A high level interface language for GIS. *Journal of Visual Language and Computing*, 6(2) :167–182.
- [Barwise et Etchemendy, 1991] Barwise, J. et Etchemendy, J. (1991). Visual information and valid reasoning. *Visualization in teaching and learning mathematics*, pages 9–24.
- [Baumert et Schermesser, 2006] Baumert et Schermesser (2006). Interface interactive pour le suivi de navire en zone cotière. Rapport technique, école navale.
- [Bayer et McCreight, 1972] Bayer, R. et McCreight, C. (1972). Organization and maintenance of large ordered indexes. *Acta Informatica*, 1(3) :173–189.
- [Beckmann et al., 1990] Beckmann, N., Kriegel, H.-P., Schneider, R., et Seeger, B. (1990). The R*-tree : an efficient and robust access method for points and rectangles. *SIGMOD Rec.*, 19(2) :322–331.
- [Becquet, 2005] Becquet, P. (2005). Transmission et analyse AIS. In *Journée AIS 2005 du CETMEF*.
- [Berendt et al., 1998] Berendt, B., Barkowsky, T., Freksa, C., et Kelter, S. (1998). Spatial representation with aspect maps. *Spatial cognition - An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*, pages 313–336.
- [Bestougeff et Ligozat, 1993] Bestougeff, H. et Ligozat, G. (1993). *Logical Tools for Temporal Knowledge Representation*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [Bonhomme et Aufaure, 2001] Bonhomme, C. et Aufaure, M. (2001). Tests psycho-cognitifs de métaphores visuelles pour un langage d'interrogation de systèmes d'information géographique. *Revue d'Interaction Homme-Machine*, 2(1) :33–53.

- [Cai et Revesz, 2000] Cai, M. et Revesz, P. (2000). Parametric R-tree : an index structure for moving objects. In *Proceedings of the International Conference on Management of Data, COMAD*.
- [Chon et al., 2002] Chon, H. D., Agrawal, D., et Abbadi, A. E. (2002). Data management for moving objects. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 25(2) :41–47.
- [Claramunt et Thériault, 1996] Claramunt, C. et Thériault, M. (1996). Toward semantics for modelling spatio-temporal processes within gis. In *Seventh International Symposium on Spatial Data Handling*, pages 47–64. Taylor and Francis.
- [Clarke, 1981] Clarke, B. (1981). A calculus of individuals based on 'connection'. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 22(3) :204–218.
- [Clementini et al., 1997] Clementini, E., Felice, P. D., et Hernandez, D. (1997). Qualitative representation of positional information. *Artificial Intelligence*, 95(2) :317–356.
- [Clementini et al., 1993] Clementini, E., Felice, P. D., et van Oosterom, P. (1993). A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. In *Proceedings of the Third International Symposium on Advances in Spatial Databases*, pages 277–295, Londres, UK. Springer-Verlag.
- [Colliot, 2003] Colliot, O. (2003). *Représentation, évaluation et utilisation de relations spatiales pour l'interprétation d'images. Application à la reconnaissance de structures anatomiques en imagerie médicale*. Mémoire de thèse, Ecole nationale supérieure des télécommunications.
- [De Kleer et Brown, 1984] De Kleer, J. et Brown, J. (1984). A qualitative physics based on confluences. *Artificial Intelligence*, 24(1-3) :7–83.
- [Desclés, 1994] Desclés, J. (1994). Quelques concepts relatifs au temps et à l'aspect pour l'analyse des textes. In Desclés, J., Guentchéva, Z., Karolak, S., et Koseska-Toszewa, V., editors, *Etudes cognitives, Tome 1 : Sémantique des catégories d'aspect et de temps*, pages 57–88.
- [Devogele, 2002] Devogele, T. (2002). *Langages pour les SIG*, Les langages de manipulation, chapitre 6, pages 135–156. Edition Hermès. Traité IGAT : Information Géographique et Aménagement du Territoire, sous la direction de M. Mainguenaud.
- [Egenhofer, 1994a] Egenhofer, M. (1994a). Deriving the composition of binary topological relations. *Journal of Visual Languages and Computing*, 5(2) :133–149.
- [Egenhofer, 1994b] Egenhofer, M. (1994b). Spatial SQL : A query and presentation language. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 6(1) :86–95.
- [Egenhofer, 1997] Egenhofer, M. (1997). Query processing in spatial-query-by-sketch. *Journal of Visual Languages and Computing*, 8(4) :403–424.
- [Egenhofer et Franzosa, 1991] Egenhofer, M. et Franzosa, R. (1991). Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(2) :161–174.
- [Egenhofer et Mark, 1995a] Egenhofer, M. et Mark, D. (1995a). Modelling conceptual neighborhoods of topological line-region relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(5) :555–565.
- [Egenhofer et Mark, 1995b] Egenhofer, M. et Mark, D. (1995b). Naive geography. In *Spatial Information Theory*, pages 1–15. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 988, Springer Verlag.

- [Eschenbach et Schill, 1999] Eschenbach, C. et Schill, K. (1999). Studying spatial cognition - a report on the DFG workshop on the representation of motion. *KI - Kunstliche Intelligenz*, 13(3) :57–58.
- [Fournier, 2005] Fournier, S. (2005). *Intégration de la dimension spatiale au sein d'un modèle multi-agents à base de rôles pour la simulation : application à la navigation maritime*. Mémoire de thèse, Université de Rennes 1.
- [Frank, 1992] Frank, A. (1992). Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space. *Journal of visual languages and computing*, 3 :343–371.
- [Freksa, 1992a] Freksa, C. (1992a). Temporal reasoning based on semi-intervals. *Artificial Intelligence*, 54(1) :199–227.
- [Freksa, 1992b] Freksa, C. (1992b). Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In *Spatio-Temporal Reasoning*, pages 162–178.
- [Freska et Zimmermann, 1992] Freska, C. et Zimmermann, K. (1992). On the utilization of spatial structures for cognitively plausible and efficient reasoning. In *IEEE International Conference of Systems Man and Cybernetics*, pages 261–266.
- [Gaede et Günther, 1998] Gaede, V. et Günther, O. (1998). Multidimensional access methods. *ACM Computing Surveys*, 30(2) :170–231.
- [Galton, 1995a] Galton, A. (1995a). A qualitative approach to continuity. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Time, Space and Movement : Meaning and Knowledge in the Sensible World (TSM'95)*.
- [Galton, 1995b] Galton, A. (1995b). Towards a qualitative theory of movement. In Frank, A. U. et Kuhn, W., editors, *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS (Proceedings of International Conference COSIT'95)*, pages 377–396.
- [Galton, 2000] Galton, A. (2000). *Qualitative Spatial Change*. Oxford University Press.
- [García-Ortiz et al., 1995] García-Ortiz, A., Amin, S., et Wootton, J. (1995). Intelligent transportation systems : A global perspective. *Mathematical and Computer Modelling*, 22 :259–268.
- [Goodchild, 1992] Goodchild, M. (1992). Geographical data modeling. *Computer and Geosciences*, 18 :401–408.
- [Grenon et Smith, 2004] Grenon, P. et Smith, B. (2004). Snap and span : Towards dynamic spatial ontology. *Spatial Cognition and Computation*, 4(1) :69–103.
- [Guibert, 1994] Guibert, J. (1994). Organisation et contrôle des flux de trafic maritimes, aériens et terrestres : Cas du maritime. *Navigation*, 165 :15–26.
- [Guibert, 2001] Guibert, J. (2001). Evolution de l'organisation de la navigation maritime : cas de la manche. *Navigation*, 49(193) :42–48.
- [Güting et al., 2000] Güting, R., Böhlen, M., Erwig, M., Jensen, C., Lorentzos, N., Schneider, M., et Vazirgiannis, M. (2000). A foundation for representing and querying moving objects. *Transactions on Database Systems (TODS)*, 25(1) :1–42.
- [Guting et Schneider, 2005] Guting, R. et Schneider, M. (2005). *Moving objects databases*. Morgan Kaufmann.
- [Guttman, 1984] Guttman, A. (1984). R-trees : a dynamic index structure for spatial searching. In *SIGMOD '84 : Proceedings of the 1984 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pages 47–57, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Hake et Grünreich, 1994] Hake, G. et Grünreich, D. (1994). *Kartographie*. De Gruyter, Berlin/New York.

- [Hammer, 1993] Hammer, E. (1993). Representing relations diagrammatically. In Allwein, G. et Barwise, J., editors, *Working Papers on Diagrams and Logic*, pages 77–119. Visual Inference Laboratory, Indiana University, Bloomington, Indiana.
- [Hammer, 1994] Hammer, E. (1994). Reasoning with sentences and diagrams. *The Notre Dame Journal of Formal Logic*, 35(1) :73–87.
- [Hayes, 1978] Hayes, P. (1978). The naive physics manifesto. In Michie, D., editor, *Expert Systems in the Microelectronic Age*, pages 242–270, Edinbourg, Ecosse. Edinburgh University Press.
- [Hayes, 1985] Hayes, P. (1985). Naive physics I : Ontology for liquids. In Hobbs, J. R. et Moore, R. C., editors, *Formal Theories of the Commonsense World*, pages 71–108. Ablex, Norwood, NJ.
- [Henle, 1979] Henle, M. (1979). *A combinatorial introduction to topology*. Freeman, San Francisco, USA.
- [Hornsby et Egenhofer, 2000] Hornsby, K. et Egenhofer, M. (2000). Identity-based change : a foundation for spatio-temporal knowledge representation. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(3) :207–224.
- [Imfeld, 2000] Imfeld, S. (2000). *Time, points and space - Towards a better analysis of wildlife data in GIS*. Mémoire de thèse, University of Zürich, Suisse.
- [Kollios et al., 1999] Kollios, G., Gunopulos, D., et Tsotras, V. J. (1999). On indexing mobile objects. In *Symposium on Principles of Database Systems*, pages 261–272.
- [Kuipers, 1978] Kuipers, B. (1978). Modeling spatial knowledge. *Cognitive Science*, 2 :129–153.
- [Kuipers et Levitt, 1988] Kuipers, B. et Levitt, T. (1988). Navigation and mapping in large-scale space. *AI Mag.*, 9(2) :25–43.
- [Kulpa, 1994] Kulpa, Z. (1994). Diagrammatic representation and reasoning. *Machine GRAPHICS and VISION*, 3(1/2) :77–103.
- [Laumonier, 2004] Laumonier, J. (2004). *Contrôle de systèmes multiagents asynchrones : application aux systèmes de transport intelligents*. Mémoire de thèse, Université de Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada.
- [Laurini et Milleret-Raffort, 1993] Laurini, R. et Milleret-Raffort, F. (1993). *Les Bases de Données en Géomatique*. HERMES, Collection Géomatique, Paris.
- [Laurini et al., 2001] Laurini, R., Servigne, S., et Tanzi, T. (2001). A primer on telegeoprocessing and telegeomonitoring. *Computers, Environment and Urban Systems*, 25(3) :249–265.
- [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.
- [Ligozat, 1998] Ligozat, G. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, 9 :23–44.
- [Lomet et Salzberg, 1989] Lomet, D. et Salzberg, B. (1989). Access methods for multiversion data. *SIGMOD Rec.*, 18(2) :315–324.
- [Longley et al., 1999] Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., et Rhind, D. (1999). *Geographical Information Systems : Principles, Techniques, Management and Applications, 2nd Edition*. Wiley.

- [Maass, 1993] Maass, W. (1993). A cognitive model for the process of multimodal, incremental route descriptions. In Frank, A. et Campari, I., editors, *Spatial Information Theory : Theoretical Basis for GIS*, pages 1–13. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 716, Springer Verlag.
- [Masolo et al., 2003] Masolo, C., Borgo, S., Gangemi, A., Guarino, N., Oltramari, A., et Schneider, L. (2003). The wonderWeb library of foundational ontologies and the DOLCE ontology. Rapport technique 1, Laboratory For Applied Ontology - ISTC-CNR.
- [Meyer, 1992] Meyer, B. (1992). Beyond icons : towards new metaphors for visual query languages for spatial information systems. In Cooper, R., editor, *Proceedings of the first international workshop on interfaces to database systems*, pages 113–135. Springer-Verlag.
- [Mokbel et al., 2003] Mokbel, M., Ghanem, T., et Aref, W. (2003). Spatio-temporal access methods. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 26(2) :40–49.
- [Mokhtar et al., 2002] Mokhtar, H., Su, J., et Ibarra, O. (2002). On moving object queries. In *Proceedings of the 21st ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symposium on Principles of Database Systems (PODS)*, pages 188–198.
- [Montello, 2001] Montello, D. (2001). Spatial cognition. In Smelser, N. et Baltes, P., editors, *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, pages 14771–14775. Oxford : Pergamon Press.
- [Moratz et al., 2002] Moratz, R., Tenbrink, T., Bateman, J., et Fisher, K. (2002). Spatial knowledge representation for human-robot interaction. In Freksa, C., Brauer, W., Habel, C., et Wender, K., editors, *Spatial cognition 2003*, pages 263–286. Springer.
- [Mourelatos, 1978] Mourelatos, A. (1978). Events, processes, and states. *Linguistics and philosophy*, 2 :415–434.
- [Noyon et al., 2007] Noyon, V., Claramunt, C., et Devogele, T. (2007). A relative representation of trajectories in geographical spaces. *Geoinformatica*, pages 18 pages, à paraître.
- [Noyon et al., 2005a] Noyon, V., Devogele, T., et Claramunt, C. (2005a). A formal model for representing point trajectories in two-dimensional spaces. In *CoMoGIS, ER Workshops 2005*, pages 208–217. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 3770, Springer Verlag.
- [Noyon et al., 2005b] Noyon, V., Devogele, T., et Claramunt, C. (2005b). A relative modelling approach for spatial trajectories. In *Proceedings of the 4th ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS*, pages 139–143.
- [Organisation Internationale de Normalisation (ISO), 2000] Organisation Internationale de Normalisation (ISO) (2000). Information technology, database languages, SQL multimedia and application packages- part 3 : Spatial, norme ISO n° ISO/IEC 13249-3 :1999.
- [Pakalnis, 2007] Pakalnis, S. (2007). *Tracking populations of moving objects*. Mémoire de thèse, University of Aalborg, Danemark.
- [Petit et al., 2006] Petit, M., Ray, C., et Claramunt, C. (2006). A contextual approach for the development of GIS : Application to maritime navigation. In Carswell, J. et Tekuza, T., editors, *Proceedings of the 6th International Symposium on Web and Wireless Geographical Information Systems*, number 4295 in LNCS, pages 158–169. Springer-Verlag.
- [Pfoser et al., 2000] Pfoser, D., Jensen, C., et Theodoridis, Y. (2000). Novel approaches in query processing for moving object trajectories. In *VLDB '00 : Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Data Bases*, pages 395–406, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann Publishers Inc.

- [Porkaew et al., 2001] Porkaew, K., Lazaridis, I., et Mehrotra, S. (2001). Querying mobile objects in spatio-temporal databases. In *Proceedings of the Seventh International Symposium on Spatial and Temporal Databases (SSTD)*, pages 59–78.
- [Prabhakar et al., 2002] Prabhakar, S., Xia, Y., Kalashnikov, D., Aref, W. G., et Hambrusch, S. (2002). Query indexing and velocity constrained indexing : Scalable techniques for continuous queries on moving objects. *IEEE Transaction on Computers*, 51(10) :1124–1140.
- [Préfecture Maritime, 2007] Préfecture Maritime (2007). Sauvetage et surveillance du trafic maritime sur la façade de la manche et de la mer du nord (bilan 2006). Rapport technique, Préfecture maritime Manche - Mer du Nord.
- [Procopiuc et al., 2002] Procopiuc, C., Agarwal, P., et Har-Peled, S. (2002). Star-tree : An efficient self-adjusting index for moving objects. In *ALENEX '02 : Revised Papers from the 4th International Workshop on Algorithm Engineering and Experiments*, pages 178–193, Londres, UK. Springer-Verlag.
- [Randell et al., 1992] Randell, D., Cui, Z., et Cohn, A. (1992). A spatial logic based on regions and connection. In Nebel, B., Rich, C., et Swartout, W., editors, *Proceedings of the Third International Conference Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'92)*, pages 165–176. M. Kaufmann, San Mateo, California, USA.
- [Randell et Cohn, 1989] Randell, D. A. et Cohn, A. G. (1989). Modelling topological and metrical properties of physical processes. In Brachman, R. J., Levesque, H. J., et Reiter, R., editors, *Proceedings of the 1st International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'89)*, pages 357–368. Morgan Kaufmann.
- [Raubal et al., 1997] Raubal, M., Egenhofer, M., Pfoser, D., et Tryfona, N. (1997). Structuring space with image schemata : Wayfinding in airports as a case study. In *Spatial Information Theory*, pages 85–102.
- [Recanati, 2005] Recanati, C. (2005). Raisonner avec des diagrammes : perspectives cognitives et computaionnelles. *Intellectica*, 1 :9–42.
- [Saglio, 2006] Saglio, J.-M. (2006). *Fondements des bases de données spatiales*, chapitre 7 : Indexation spatiale, pages 151–173. Editions Hermès-Lavoisier.
- [Šaltenis et Jensen, 2002] Šaltenis, S. et Jensen, C. (2002). Indexing of moving objects for location-based services. In *ICDE '02 : Proceedings of the 18th International Conference on Data Engineering*, page 463, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Šaltenis et al., 2000] Šaltenis, S., Jensen, C., Leutenegger, S., et Lopez, M. (2000). Indexing the positions of continuously moving objects. In *SIGMOD Conference*, pages 331–342.
- [Schlieder, 1996] Schlieder, C. (1996). A computational account of preferences in mental model construction. In *Proceedings of the First European Workshop on Cognitive Modeling*, pages 90–96. U. Schmid, J. Krems, and F. Wysotzki.
- [Sellis et al., 1987] Sellis, T., Roussopoulos, N., et Faloutsos, C. (1987). The R -tree : A dynamic index for multi-dimensional objects. In *The VLDB Journal*, pages 507–518.
- [Shin, 1991] Shin, S.-J. (1991). A situation-theoretic account of valid reasoning with Venn diagrams. In Barwise, J., Gawron, J. M., Plotkin, G., et Tutiya, S., editors, *Situation Theory and Its Applications (Vol. 2)*, pages 581–605. CSLI, Stanford, CA.
- [Sistla et al., 1997] Sistla, A., Wolfson, O., Chamberlain, S., et Dao, S. (1997). Modeling and querying moving objects. pages 422–432. IEEE Computer Society.
- [Smith, 1996] Smith, B. (1996). Meretopology : A theory of parts and boundaries. *Data and knowledge engineering*, 20 :287–303.

- [Spaccapietra, 2001] Spaccapietra, S. (2001). Editorial : Spatio-temporal data models and languages. *GeoInformatica*, 5(1) :5–9.
- [Stroh et Schuldt, 2006] Stroh et Schuldt (2006). Integration of an AIS transponder into the pc-based operational marine simulator Marine GIS using NMEA interface/communication protocol. Rapport technique, Ecole navale.
- [Su et al., 2001] Su, J., Xu, H., et Ibarra, O. (2001). Moving objects : logical relationships and queries. In *Proceedings of the Seventh International Symposium on Spatial and Temporal Databases (SSTD)*, pages 3–19. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 2121, Springer Verlag.
- [Tao et al., 2003] Tao, Y., Papadias, D., et Sun, J. (2003). The TPR*-tree : An optimized spatio-temporal access method for predictive queries. In *Proceedings of the International Conference on Very Large Data bases, VLDB*, pages 790–801.
- [Tayeb et al., 1998] Tayeb, J., Ulusoy, Ö., et Wolfson, O. (1998). A quadtree-based dynamic attribute indexing method. *Computer Journal*, 41(3) :185–200.
- [Taylor et Blewitt, 2006] Taylor, G. et Blewitt, G. (2006). *Intelligent positioning : GIS-GPS unification*. Wiley.
- [Thériault et Claramunt, 1999] Thériault, M. et Claramunt, C. (1999). La modélisation du temps et des processus dans les sig : une nécessité pour la recherche interdisciplinaire. *Revue internationale de géomatique, Numéro spécial sur les SIG spatio-temporel*, 9(1) :67–99.
- [Tversky, 1993] Tversky, B. (1993). Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models. In Frank, A. et Campari, I., editors, *Spatial Information Theory : Theoretical Basis for GIS*, pages 14–24. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 716, Springer Verlag.
- [Union Internationale des Télécommunications, 1998] Union Internationale des Télécommunications (1998). Caractéristiques techniques d'un système d'identification automatique universel de bord pour navire, utilisant l'accès multiple par répartition dans le temps et fonctionnant dans la bande attribuée aux services mobiles maritimes en ondes métriques. Rapport technique UIT-R M.1371, Union internationale des télécommunications.
- [Van De Weghe, 2004] Van De Weghe, N. (2004). *Representing and reasoning about moving objects : a qualitative approach*. Mémoire de thèse, University of Ghent, Belgique.
- [Van de Weghe et al., 2005] Van de Weghe, N., Kuijpers, B., Bogaert, P., et Maeyer, P. D. (2005). A qualitative trajectory calculus and the composition of its relations. In *Proceedings of the first International Conference on GeoSpatial Semantics*, pages 60–76. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 3799, Springer Verlag.
- [Van De Weghe et Maeyer, 2005] Van De Weghe, N. et Maeyer, P. D. (2005). Conceptual neighbourhood diagrams for representing moving objects. In *CoMoGIS, ER Workshops 2005*, pages 228–238. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 3770, Springer Verlag.
- [Vieu, 1997] Vieu, L. (1997). Spatial Representation and Reasoning in Artificial Intelligence. In Stock, O., editor, *Spatial and Temporal Reasoning*, pages 3–41. Kluwer, Dordrecht.
- [Wang et Lee, 1993] Wang, D. et Lee, J. (1993). Visual reasoning : its formal semantics and applications. *J. Vis. Lang. Comput.*, 4(4) :327–356.
- [Worboys, 2005] Worboys, M. (2005). Event-oriented approaches to geographic phenomena. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(1) :1 – 28.
- [Worboys et Duckham, 2004] Worboys, M. et Duckham, M. (2004). *GIS : A Computing Perspective*. CRC Press, 2 edition.

- [Worboys et Hornsby, 2004] Worboys, M. et Hornsby, K. (2004). From objects to events : GEM, the geospatial event model. In *Proceedings of the third International Conference, Geographic Information Science 2004*, pages 327–343. Lectures Notes in Computer Science, Vol. 3234, Springer Verlag.
- [Xu et al., 1990] Xu, X., Han, J., et Lu, W. (1990). Rt-tree : An improved r-tree indexing structure for temporal spatial databases. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling (SSDH'90)*, pages 1040–1049.
- [Zimmermann et Freksa, 1996] Zimmermann, K. et Freksa, C. (1996). Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge. *Applied Intelligence*, 6 :49–58.
- [Zloof, 1977] Zloof, M. (1977). Query-by-example : A data base language. *IBM Systems Journal*, 16(4) :324–343.

Curriculum Vitae

Expérience

Depuis septembre 2007 Sept 2003 - Sept 2007	Attachée temporaire d'enseignement et de recherche à l'Université de Poitiers. Assistante d'enseignement et de recherche (CDD Enseignant, chercheur) à l'Ecole Navale, Brest. 537h équivalent TD en informatique sur quatre années. Titre de thèse : Modèle de vue spatio-temporelle et relative de trajectoires d'objets mobiles Directeur : Pr. Christophe Claramunt
Février - Juin 2003	Laboratoire Signal, Image, Communication (SIC) - Université de Poitiers Conception formelle de modèles topologiques hybrides Définition et spécification d'un nouveau modèle combinatoire à partir des cartes généralisées et des chaînes de carte
Juillet - Août 2001	Entreprise Amélioration Globale des Systèmes Industriels et Informatiques (AGISI) - Châtellerauld Développement et livraison d'un logiciel de base de données

Formation

Depuis septembre 2003 2002 - 2003	Doctorante en informatique à l'Ecole Navale, Brest. DEA T3IA (Traitement de l'Information : Informatique, Image, Automatique), Université de Poitiers. Mention Bien.
2001 - 2002	Maîtrise d'informatique, Université de Poitiers. Mention Assez bien.
2000 - 2001	Licence d'informatique, Université de Poitiers. Mention Assez bien.
1998 - 2000	DEUG MIAS (Mathématiques, Informatique, Applications aux Sciences), Université de Poitiers.

Publications

Revues scientifiques avec comité de lecture

Noyon V., Claramunt C., and Devogele T., 2007. - A relative representation of trajectories in geographical spaces - *Geoinformatica*, Kluwer Academic, 18 pages, accepté

Conférences internationales avec comité de lecture

Noyon V., Devogele T. and Claramunt C., 2005. - A formal model for representing point trajectories in two-dimensional spaces - *Proceedings of the 24th International Conference on Conceptual Modelling ER'05 Conference*, Klagenfurt, Austria, October, Springer-Verlag LNCS, pages 208-217

Noyon V., Devogele T. and Claramunt C., 2005. - A relative modelling approach for spatial trajectories - *Proceedings of the 4th ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS*, University of Glamorgan, Archives of ISPRS, University of Glamorgan, 5 -8 september, pages 139-143

Conférences internationales sans comité de lecture

Claramunt C., Devogele T., Fournier S., Noyon V., Petit M. and Ray C., 2007. - Maritime GIS: From Monitoring to Simulation Systems - *Information Fusion and Geographical Information Systems (IF&GIS07)*, V. Popovitch, M. Schrenk and K. Korolenko (eds.), Springer Verlag, LN series in Geoinformation and Cartography, pp. 34-44

Noyon V. and Devogele T., 2005. - Ships' monitoring with distributed GIS for better safety policy - *Oceans'05 Europe, IEEE Conference and exhibition*, Brest, 2 pages

Conférences nationales avec comité de lecture

Noyon V. and Devogele T., 2004. - Système distribué de gestion d'objets mobiles - *Actes des journées des 7ième journée Cassini*, Grenoble, éditeur MSH Alpes, pages 7-12

Communications

Ray C., Devogele T., Noyon V., Petit M., Fournier S. and Claramunt C., 2007. - GIS Technology for Maritime Traffic Systems - In *European Research Consortium for Informatics and Mathematics News: Special Theme on Traffic Planning and Logistics*, vol. 68, pages 41-42, Kuntz, P. (eds.), ERCIM EEIG, January 2007, ISSN 0926-4981

Modèle de vue spatio-temporelle et relative de trajectoires géographiques d'objets mobiles

Avec les progrès techniques des moyens de transport, les déplacements se démocratisent et rendent les distances plus accessibles. Cette augmentation du trafic à tous les niveaux, mondial, régional et local, entraîne un encombrement croissant des routes terrestres, aériennes et maritimes et implique une surveillance particulière des zones à risque. Depuis quelques années, particulièrement dans le contexte maritime, cette surveillance est améliorée par l'utilisation des outils de géolocalisation comme le GPS (Global Positioning System) et les systèmes de transmission tel que la VHF (Very High Frequency) qui permettent de disposer de flux de données (positions, vitesses, caps) en temps réel. Les trajectoires des navires liées à ces données sont généralement représentées dans un environnement absolu (représentation cartographique) ou de manière relative (représentation radar). Ces représentations favorisent l'observation du positionnement des navires en temps réel, mais sans faciliter une véritable appréhension de l'évolution de toutes les informations connues dans les dimensions spatiales et temporelles, ce qui ne permet pas une complète compréhension des futurs états d'un système donné et une anticipation des situations critiques.

L'objectif de cette thèse est de développer un nouveau modèle conceptuel de représentation des trajectoires géographiques pour l'aide à l'analyse de comportements d'objets mobiles. Le cadre expérimental de notre recherche est celui des trajectoires maritimes, à partir duquel nous proposons de construire un modèle formel de représentation et de manipulation de trajectoires. Nous postulons que la compréhension et la perception d'un processus de déplacement peut passer par une vision égocentrique de l'espace et du temps, où les primitives de modélisation sont les composantes géométriques couramment utilisées au sein des Systèmes d'Information Géographiques. Nous montrerons que la vitesse relative et la distance apparaissent comme des paramètres pertinents de compréhension des processus de déplacement. La position relative est basée sur une notion de distance entre objets mobiles, avec une distinction qualitative qui prend en compte la nature des relations topologiques entre ces objets. La vitesse relativisée est elle basée sur une notion de vitesse relative, et où les objets plus rapides ou moins rapides que l'objet de référence sont différenciés. L'association de ces mesures définit des états spatio-temporels caractérisés dans le langage naturel et composés afin de définir des relations transitives entre les objets. Le modèle proposé permet d'identifier les changements spatio-temporels lors de transitions continues entre les états et de leur associer des processus caractérisés par des expressions non ambiguës dans le langage naturel. La visualisation de ces processus complète les visualisations existantes des positions des objets mobiles et donne un cadre nouveau de perception et d'analyse des trajectoires en milieu maritime. Un prototype pour l'application aux déplacements maritimes de navires permet de visualiser les processus décrits et valider le modèle défini avec des données maritimes réelles, et plusieurs cas d'école expérimentés auprès d'un panel d'utilisateurs.

A relative and spatio-temporal model of geographic trajectories

The worldwide increase of transportation traffic implies a progressive obstruction of many air, terrestrial and maritime routes. This also augments the number of security risks and enlarges the complexity of monitoring and regulation tasks. Over the past few years, maritime transportation and traffic have been improved by the emergence of new technological solution oriented towards real-time geo-localisation such as the GPS (Global Positioning System) and VHF systems (Very High Frequency). With continuous and real-time availability of location data on ship displacements (e.g. position, speed), trajectories are usually represented using either an absolute (cartographic view) or relative representation (e.g. radar view). These systems, used independently or through a dual mode, while they are successful in providing a global or partially local view of the geographical environment, does not provide a complete and appropriate representation of the way a mobile object and its observer act in and perceive the maritime environment.

The research presented in this thesis introduces a new conceptual model oriented to the representation of geographical trajectories in space and time. We consider the point of view where a displacement process is perceived by an egocentric representation and visualisation of space and time, and where the modelling primitives are the ones usually retained by a Geographic Information System. Our study shows that the relative speed and distance are appropriate concepts that support an egocentric-based modelling of an object and observer behaving in a maritime environment. The relative position is based on the distance between two given objects, but also makes a difference between the value of their topological relationships. Similarly, the relativised speed also makes a difference between faster and slower moving objects with respect to a referent moving object. This representation is designed on top of a two-dimensional space, this facilitating characterisation of the underlying spatio-temporal processes using natural language terms. Continuous transitions are also identified. Overall this modelling approach offers novel perspectives for the visualisation and analysis of trajectories in space and time. The approach is supported by a prototype applied to a maritime context and several experiments made with panels of users.