



*Faculté des Sciences
Département de Géographie*

L'identité à travers l'espace et le temps

Vers une définition de l'identité
et des relations spatio-temporelles
entre objets géographiques

*Thèse soutenue par
Pierre Hallot
Pour l'obtention du titre de
Docteur en Sciences*

Année académique 2011 – 2012

Promoteur

Professeur Roland Billen

Université de Liège

Comité de lecture

Professeur Christophe Claramunt

École Navale de Brest (France)

Professeur Jean-Paul Donnay

Université de Liège

Professeur René Warnant

Université de Liège

Jury extérieur

Professeur Gérard Ligozat

Université Paris-Sud (France)

Professeur Nico Van de Weghe

Universiteit Gent

Professeur Esteban Zimanyi

Université Libre de Bruxelles

*A toi, Louise, ma schtoupfette, ma tintin boulette,
mon cabri, mon beau bébé et tout le reste.*

*A toi, petit être dont l'identité est déjà une réalité pour moi,
mais dont la spatialité n'est encore qu'une espérance...*

Remerciements

Durant ces cinq années de recherche doctorale, j'ai eu l'occasion de réaliser de nombreuses rencontres, tant dans mon milieu professionnel que personnel. Il m'est impossible, ici, de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail. Qu'il me soit permis mettre à l'honneur quelques personnes en particulier. Celles-ci ont, par leur présence, leurs conseils et leurs suggestions, fourni un apport sensible à ce travail de longue haleine.

Avant tout, mes remerciements vont au professeur Roland Billen. Durant ce travail, il m'a à la fois conseillé, soutenu et guidé à chacune des différentes étapes et écueils qu'un doctorant peut rencontrer. En tant que promoteur, il a su rester constamment disponible, en me permettant de confronter mes idées à un expert de la modélisation spatiale. Lors de nos nombreuses discussions, après-midis de recherche ou de rédaction d'articles, nous avons réellement pu échanger nos idées afin d'aboutir au travail présenté aujourd'hui. Je remercie également le professeur Roland Billen de m'avoir proposé mon poste d'assistant, me permettant ainsi d'accomplir mon doctorat dans d'excellentes conditions de travail. En qualité d'homme et d'ami, je souhaite également remercier Roland pour son attention lors de passages difficiles. Sa volonté d'aboutir et sa persévérance m'ont accompagné jusqu'à la fin de ce travail. Enfin, merci pour ces nombreux fous-rire et voyages plus amusants les uns que les

autres. Je pense notamment à notre nuit au « Romantik Walhalla Hotel¹ » et aux fameuses « buffalo-wings² ».

Je souhaite également vivement remercier le professeur Christophe Claramunt d'avoir, d'une part, accepté d'intégrer mon comité de thèse et, d'autre part, de m'avoir suivi et conseillé lors de ce travail. Je remercie également le professeur de s'être déplacé régulièrement à Liège afin de participer à mes comités de thèses, d'avoir si bien partagé son expérience professionnelle avec moi. En effet, que cela soit par ses avis judicieux quant aux journaux dans lesquels publier ou par ses explications (parfois enflammées) des relations entre chercheurs, il a toujours su m'aiguiller de façon claire. Merci également pour les excellents moments passés en Bretagne et dans l'Utah.

Je désire également remercier les professeurs Jean-Paul Donnay et René Warnant d'avoir participé à mon comité de thèse, d'avoir trouvé le temps de m'aider et d'apporter les corrections nécessaires à la bonne tenue de cet ouvrage. La réalisation d'une thèse ne peut se faire qu'avec une solide formation scientifique. L'enseignement de la rigueur et de l'approche scientifique a été l'un des objectifs des professeurs Jean-Paul Donnay et René Warnant durant mes études de Licence et de Master, qu'ils en soient remerciés.

Merci aux professeurs Gérard Ligozat, Nico Van de Weghe et Esteban Zimanyi d'avoir accepté de composer mon jury de thèse. Je tiens particulièrement à les remercier du temps investi dans cette lecture. J'espère pouvoir, par ce travail, leur apporter une information intéressante pour leurs travaux futurs. Je voudrais enfin avoir une pensée toute particulière pour le professeur Nico Van de Weghe, qui par intérêt scientifique, a accepté de lire cet ouvrage dans une langue qu'il ne pratique pas quotidiennement.

Une thèse, requiert beaucoup de travail et d'investissement, mais une vie saine ne peut être entièrement destinée au travail. C'est pourquoi je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu durant cette « épreuve ». Par leurs attentions, les moments de détente, les pauses cafés,... elles m'ont permis de garder un lien avec le monde réel. Merci à Benoît (S), François, Christophe (S), Christophe (C), Stéphanie, Benoît (B), Matthieu, Jean-Paul, Marie, Nadia, Delphine et Cyril. Je remercie également mes parents et ma famille sans qui la perspective d'études supérieures n'aurait pas été envisageable. Merci à mes parents de m'avoir soutenu tout au long de ce travail et pour leur relecture. Un tout grand merci à Marie-France de s'être engagée dans la relecture attentive et la correction de ce document.

Finalement, je voudrais remercier tout particulièrement celle qui, au quotidien, a partagé avec moi cette recherche. Merci à mon épouse qui a toujours su me motiver quand il le fallait et me permettre de relâcher la pression quand celle-ci devenait insupportable. Merci

¹ <http://www.hotel-walhalla.de/>

² http://en.wikipedia.org/wiki/Buffalo_wing

à elle d'avoir été là pour moi, d'avoir su passer outre mes petits défauts. Il n'y a pas de mots pour exprimer la gratitude que j'ai envers elle.

Merci à Hans Zimmer et John Williams pour les longues heures passées en compagnie de leur musique.

Résumé

Cette recherche aborde la modélisation de l'évolution d'objets dans l'espace-temps. Le travail traite essentiellement de concepts liés à l'identité, l'espace et le temps.

Premièrement, nous posons la notion d'état spatio-temporel d'un objet. Cette notion permet la modélisation de l'évolution de l'identité d'un objet. En effet, la gestion de l'identité d'un objet ne doit pas être conditionnée à sa spatialité. Nous montrons qu'il existe beaucoup de relations vers des objets dont l'identité existe déjà alors que leur spatialité n'existe plus ou n'existe pas encore. Par ailleurs, lorsqu'un objet n'est pas visible durant un intervalle de temps, cela n'implique pas nécessairement la destruction de son identité. Le modèle proposé vise à établir un cadre formel pour la gestion des objets non-existants et non-présents.

Par la suite, nous étudions les interactions spatio-temporelles entre objets. Une solution à l'étude de ces interactions est l'analyse des relations entre états spatio-temporels identitaires. Il apparaît que le jeu de relations proposé représente une vision généralisée des modèles de raisonnement spatio-temporel actuels. Sachant que la continuité de l'espace-temps n'est pas conservée lors d'une représentation qualitative, l'application de la théorie de la dominance permet de reconstruire des transitions continues lors du passage d'un état qualitatif à un autre. Le développement de cette théorie de transition permet également de justifier les différentes transitions entre états spatio-temporels.

La suite logique est l'étude de l'évolution des relations entre états spatio-temporels. Ce travail aboutit à la définition des « configurations de vie et de mouvement ». Ce modèle de représentation formel et iconique fournit une vue simplifiée de l'évolution spatio-temporelle entre deux objets. Les configurations de vie et de mouvement peuvent, par ailleurs, être utilisées afin de formaliser la relation entre deux histoires spatio-temporelles. Dans ce travail, nous prouvons que ce langage est suffisant pour fournir des connaissances spatio-temporelles

sur des objets en mouvement. Ce modèle constitue également un cadre formel dans lequel il est possible de classer l'ensemble des modèles actuels de raisonnement spatio-temporel.

Sur base des configurations de vie et de mouvement, deux applications sont développées. Premièrement, nous proposons de généraliser les configurations de vie et de mouvement vers un ensemble de 25 relations représentant l'information spatio-temporelle avec un grand niveau d'abstraction. Nous pensons que cet ensemble est proche de la perception humaine de l'information spatio-temporelle. Deuxièmement, deux interprétations en langage naturel des configurations de vie et de mouvement sont proposées. L'une est appliquée aux relations spatio-temporelles généralisées ; l'autre interprète un ensemble de prédicats spatio-temporels du langage courant.

Summary

The principal goal of this research is to model object's evolution in space and time; it implies questioning identity, space and time.

First, we define the concept of object spatio-temporal state. This concept allows modelling object identity evolution. Indeed, managing object identity must not be related to the object spatiality. In other words, we assume that the existence of an object is not dependant of its spatial extension. We show that there exist a lot of relationships associated to objects which does not yet exist or which does not exist anymore. We show also that when objects are not visible during an interval of time, it does not imply the lost of their identity. The model we propose aims at providing a framework for non-existent and non-visible objects

Then, we study the spatio-temporal interactions between objects. The proposed solution is to define relationships between objects spatio-temporal states. It appears that the proposed set of relationships is a generalized vision of existing spatio-temporal reasoning models. Knowing that space-time continuity is not preserved in qualitative modelling, we apply the dominance theory which aims at retrieving continuous transitions between qualitative states. This development provides formal definitions of possible transition between spatio-temporal states relationships.

Logically, the next step is to study the possible evolution of these spatio-temporal states relationships. This leads to the development of a formal model called "life and motion configurations". This iconic representation gives a simplified view of the spatio-temporal evolution between two objects. It can be used to formalize the relationship between two spatio-temporal histories. In this work, we prove that this language is sufficient to provide spatio-temporal knowledge on moving objects. It determines also a framework in which others spatio-temporal reasoning models can be classified.

Based on life and motion configurations, we propose two applications. Firstly, the life and motion configurations are generalised into a set of 25 relationships representing spatio-

temporal information with a high level of abstraction. We believe that this set is close to people perception of spatio-temporal information. Secondly, two natural language interpretations of life and motion configurations are proposed; one applied to generalized spatio-temporal relationships, one applied to spatio-temporal predicates used in common French language.

Chapitre I.

Introduction

*Il n'existe aucune branche des mathématiques,
aussi abstraite soit-elle, qui ne puisse s'appliquer
un jour aux phénomènes du monde réel.
Nikolai Ivanovitch Lobatchevski*

1. L'identité, l'espace et le temps...

L'identité, l'espace et le temps... trois notions qui définissent toute chose. Trois notions qui répondent aux questions fondamentales: Qui, quoi ? Où ? Quand ? Cette recherche apporte une contribution à la compréhension de ces concepts et à la mise en lumière de leurs interactions.

Sans identité, pas d'êtres, pas d'objets, pas de personnes. L'identité permet de distinguer une personne, un objet de tous les autres. Chaque personne est unique, chaque objet l'est aussi. L'identité affirme l'unicité, c'est le fondement universel de la distinction de toute chose. L'espace, quant à lui, procure leur extension spatiale aux objets. Un continent, une ville, un immeuble, une pomme, un atome occupent tous une partie de l'espace. Certes, les objets peuvent se combiner dans l'espace, mais tout objet physique possède une extension dans l'espace. Toute notion abstraite tels un pays, une commune, un sentiment aura une extension dans l'espace conceptuel qui la décrit. Les objets se déplacent dans l'espace, ils s'y transforment, ils y vivent, évoluent et disparaissent. Enfin, il y a le temps. L'identité et l'espace

y sont projetés entièrement. Quoi que l'on pense, quoi que l'on tente de modéliser, le temps influence le monde, les objets, les personnes. Souvent vu comme un avancement inéluctable, le temps bouleverse la conception de toute chose. Ne pas le considérer est, sans doute, une des plus grandes restrictions faites en modélisation. En effet, proposer un modèle qui n'inclut pas le temps réduit de prime abord la réalité vers un contexte restreint.

Nous sommes perpétuellement confrontés à ces trois notions, nous en faisons partie, nous sommes en constante évolution dedans. Il n'est pas simple de modéliser ce qui nous entoure, le système dans lequel nous sommes. Pour étudier un problème, la recherche tente souvent de s'en abstraire et de l'étudier à un niveau supérieur duquel il a été posé. S'abstraire de l'identité, de l'espace et du temps n'est pas possible. Afin de modéliser ces trois notions, nous devons donc les étudier de l'intérieur. Pour ce faire, un des seuls outils dont nous disposons sont les mathématiques. Cet outil d'abstraction et de modélisation nous permet de rendre compte formellement de ces concepts, de les décrire et de les utiliser afin de raisonner.

Nous percevons quotidiennement des objets qui évoluent dans l'espace et le temps. L'histoire du déplacement d'un objet est quant à elle plus difficilement représentable. Le déplacement d'un objet est conservé par l'histoire. Encore faut-il la retenir, soit, dans notre cas, mesurer et stocker le déplacement de l'objet. Nous ne percevons les déplacements que par le changement de l'état du monde qu'ils impliquent. Il existe cependant des exemples pour lesquels on perçoit, en quelque sorte, l'histoire du déplacement d'un objet. Si on observe le ciel et que le temps (météorologique) le permet, nous apercevons la manifestation du mouvement d'avions dans l'espace et le temps. Les trainées de condensation laissées par le passage d'avions représentent une manifestation de l'histoire de leur déplacement (Figure I-1). Ces trainées symbolisent en quelque sorte l'histoire spatio-temporelle du déplacement d'objets dans l'espace-temps.



Figure I-1 Trainées de condensation ou « contrails » produites par la condensation de la vapeur d'eau émises par les réacteurs d'avions au-delà d'une certaine altitude. Les trainées de condensation représentent une manifestation du déplacement d'objets dans l'espace et le temps, elles symbolisent l'histoire spatio-temporelle du déplacement d'avions dans le ciel.

Ces trois notions fondamentales, à la base de toute étude géographique, nous amène à nous poser plusieurs questions. Qu'est-ce que l'identité, comment la représenter ? Un objet a-t-il toujours une identité ? Comment évolue-t-elle dans le temps et dans l'espace ? A partir de quand est-il opportun de considérer l'identité d'un objet ? Faut-il conserver l'identité d'un objet disparu ? Bref, comment évolue l'identité d'un objet dans l'espace et dans le temps ?

Nous tenterons par cette recherche d'apporter une contribution significative à ces questions. Notre but n'est pas ici de développer une nouvelle théorie philosophique de l'identité, ni même de proposer une nouvelle vision de l'espace-temps, mais bien, en s'appuyant sur les recherches actuelles en science de l'information spatiale, de mieux comprendre les relations qui lient ces trois concepts d'identité, d'espace et de temps.

2. Contexte de recherche

Depuis la fin des années 1980, la recherche en géographie s'est orientée vers une gestion informatisée de son information. Cette véritable révolution, dans la manière de

concevoir et de penser l'information, a abouti à la création d'une nouvelle science : *la géomatique*. L'acquisition, la gestion, le traitement et la diffusion de l'information à caractère spatial sont les traits fondamentaux de cette nouvelle discipline. La modélisation de l'information fait appel à des concepts philosophiques qui aident à identifier ce que l'on veut décrire. Les premières questions à se poser ne sont-elles pas : Qu'est-ce qu'une information ? Qu'est-ce qu'un objet ? Que veut-on décrire ? La formalisation de concepts dans un système informatique implique de maîtriser le sens de ce que l'on veut y représenter. Les années 1990 rapprochent encore plus la modélisation de la philosophie par l'apport de la modélisation orientée objet. Ce concept visant à décrire un tout et les propriétés qui lui sont associées projette encore plus les concepts philosophiques d'identité, d'objets, de perception dans la modélisation informatique. La géomatique, en tant que science de l'information spatiale, doit donc également étudier de manière fondamentale les concepts qu'elle tente d'analyser et de représenter. Cette recherche s'inscrit dans ce courant de pensée, on parle alors de science de l'information spatiale. La géomatique a pour habitude de traiter des phénomènes à petite échelle, les espaces de représentation habituels de la géographie. La science de l'information spatiale quant à elle s'abstrait régulièrement de la notion d'échelle ; elle vise à l'analyse d'une spatialité générale, les relations et les fondements propres de tout ce qui occupe une partie de l'espace, quelle qu'en soit la taille. Bien qu'affranchis de notion d'échelle, nous dirigerons cependant cette recherche vers des applications géographiques. Notre formation ainsi que le cheminement qui nous a conduits à étudier ce domaine est profondément ancré dans la science de la géographie. Notre but est ici de proposer une approche fondamentale dont l'application principale est tournée vers la géomatique ou encore la géographie.

Cette mise en contexte nous amène à poser nos différentes questions de recherches. Lors d'études géographiques ou spatiales, on est régulièrement amené à considérer des objets en mouvement. Ces objets ne sont pas éternels, ils se déplacent, quittent parfois notre champ de vision ou notre champ de conception. Il n'existe pas de système omniscient capable de représenter l'information de toute chose à chaque instant. Qu'il s'agisse d'une personne qui quitte une pièce, d'un avion qui sort de la zone de visibilité d'un radar, d'un camion suivi par un système de navigation satellitaire qui passe sous un pont, d'un immeuble détruit ou encore d'un projet de construction, la continuité de l'observation d'objets n'est que rarement respectée. Cette constatation nous conduit à notre première question de recherche : *Comment modéliser l'évolution complète d'un objet dans l'espace et le temps ?* Cette question très générale peut être raffinée en plusieurs sous questions pour lesquelles nous tenterons également d'apporter des éléments de réponse. La modélisation complète de l'existence d'un objet implique premièrement de s'interroger sur l'évolution de son identité. Comment évolue l'identité d'un objet dans le temps ? L'identité d'un objet est-elle liée à sa spatialité ? Que devient l'identité d'un objet s'il perd son extension spatiale ? L'identité est-elle infinie dans le temps ? La pensée suffit-elle à définir l'identité d'un objet, l'oubli d'une chose implique-t-il la disparition de son identité ? Toutes ces questions traitent de la perception de l'identité au travers de l'espace et du temps. Dans ce contexte, *nous proposons d'étudier, au travers des*

modèles de raisonnements spatiaux, temporels et spatio-temporels, les diverses approches liées à l'évolution de l'identité dans le temps. La définition d'un modèle d'information qui prendrait en compte l'ensemble de l'évolution spatio-temporelle serait alors une fondation générale à toutes les analyses spatio-temporelles. Celles-ci, soit plus détaillées, soit dédiées à des applications particulières, pourraient alors être perçues comme des raffinements ou des spécialisations d'un modèle général. Une des clés de lecture de ce travail est la recherche d'une modélisation globale de l'information spatio-temporelle. Nous nous plaçons ici dans une perspective de développement conceptuel et non dans une étude des mécanismes logiques de représentation au sein d'une base de données géographique. Bien que nous ne prétendions pas répondre complètement à la question de la modélisation conceptuelle de l'information spatio-temporelle, nous apportons ici *une proposition de modèle général de l'information spatio-temporelle* à partir de laquelle peuvent être dérivés tous les modèles de raisonnements spatio-temporels dont nous avons connaissance. L'idée de généralité se traduit dans cette recherche par la définition de l'ensemble d'éléments minimums mais nécessaires au raisonnement sur l'information spatio-temporelle.

Tout modèle n'est applicable que si l'information qu'il véhicule peut être transmise. La définition de quelque concept que ce soit, s'il n'est pas visualisable et interprétable par un utilisateur final, n'aura pas d'utilité, ni de finalité. Par cette recherche, nous tentons également de fournir une approche simple qui autorise le traitement simple d'information spatio-temporelle. Le lien entre des concepts théoriques de modélisation et l'interprétation que l'on peut en faire dans son langage naturel est la pierre angulaire de tout modèle réussi. Notre travail tente donc de *proposer une interprétation claire et utile aux concepts de raisonnements spatio-temporels* afin que ceux-ci puissent être utilisés et compris facilement par un utilisateur final.

3. Structure de la thèse

Notre objectif est ici de présenter de façon cohérente le travail effectué durant nos cinq années de recherche. L'approche développée lors de notre travail n'est pas temporellement linéaire. Nous percevons plus notre contribution de manière cyclique ; c'est à force d'essais, d'erreurs, de lectures et de relectures que nous proposons le document suivant. La présentation de cette recherche suit un schéma tout à fait différent de celui qui nous a conduits à sa définition. Afin de proposer un document clair et cohérent, nous avons choisi de le structurer de la façon suivante.

De quoi parle-t-on ? Quels sont les travaux déjà réalisés dans le domaine ? Comment la communauté scientifique perçoit-elle l'information, l'identité, l'espace et le temps ? Toutes ces questions font l'objet de notre chapitre d'état de la recherche. Dans ce chapitre, nous abordons les concepts clés qui nous semblent indispensables à la bonne lecture de ce

document. Nous présentons également par ce chapitre les travaux sur lesquels cette recherche est fondée. Rien ne sert de réinventer la roue, nous partons donc de ce qui est et nous tentons de modéliser ce qui n'est pas encore. Comme nous le précisons pas la suite, toute l'information utile à la compréhension de ces concepts n'est peut-être pas abordée. Cependant, nous pensons proposer suffisamment de références afin d'aider le lecteur soucieux d'approfondir une thématique particulière.

Que souhaite-t-on réaliser ? Où allons-nous ? Bien que le contexte de ce travail soit expliqué précédemment, le chapitre traitant des objectifs de recherche propose par plusieurs exemples la mise en relation de nos objectifs avec l'état de l'art. Cette partie établit de façon claire les limites de notre travail, les objectifs que nous souhaitons atteindre, les questions pour lesquelles nous souhaitons apporter une réponse.

L'état spatio-temporel d'un objet doit être compris comme la vision que nous proposons de l'identité, de la spatialité et de la temporalité de ce que nous qualifions d'objet. L'approche formelle présentée dans cette section aborde la définition du concept général de la relation entre l'identité, l'espace et le temps pour un objet. Par une série d'exemples, nous tentons de mettre en avant des situations pour lesquelles la modélisation actuelle de la perception d'un objet dans l'espace et le temps n'est pas suffisante. Sur base d'une définition mathématique formelle d'un objet, d'une vision de l'espace et d'une vision du temps, nous exposons le concept d'état spatio-temporel. Nous justifions également cette définition par le développement d'une théorie de raisonnement appelée la « théorie de la dominance ». Cette théorie formalise certaines étapes de notre recherche et établit de façon formelle des concepts jusqu'ici définis de manière personnelle.

Le chapitre suivant traite non plus d'un seul objet mais de plusieurs. La modélisation de l'évolution d'objets nécessite la prise en compte d'un contexte dans lequel l'objet évolue. Nous sommes en relation avec le monde qui nous entoure. Il est alors nécessaire de tenir compte de ces relations. Que ce soit la relation spatiale que nous partageons avec le sol lorsque nous marchons, les relations entre états voisins, la relation entre une route et un véhicule en mouvement, il s'agit chaque fois de relations spatio-temporelles entre deux ou plusieurs objets. Ce chapitre propose d'étudier les relations qu'entretiennent plusieurs objets, à nouveau sous le regard de l'identité, de l'espace et du temps. L'étude de ces relations nous amène à poser un ensemble fini de relations possibles entre deux objets. Ces relations reprennent quelques concepts clés de notre langage commun comme l'« histoire » et la « connaissance ».

Comme toute chose, les relations spatio-temporelles évoluent dans le temps. Rien n'est éternel, aucun objet ni aucune conception n'est statique tout au long de son existence. Il en est de même pour les relations spatio-temporelles et les relations entre identités d'objets. Cependant, la représentation de l'évolution de ces relations est quelque chose de complexe. Comme nous l'avons vu précédemment, la représentation de l'évolution d'un objet dans

l'espace et le temps nécessite déjà une conceptualisation. Hormis quelques exemples précis, on ne perçoit pas toute l'évolution d'un objet dans l'espace-temps. L'évolution de la relation entre deux objets est alors d'autant plus complexe à représenter. Ce chapitre propose une formalisation simple de l'évolution de ces relations. Par une représentation standardisée et basée sur une définition formelle, nous étudions les « *configurations de vie et de mouvement* » entre deux objets. Ce chapitre établit de façon exhaustive toutes les façons de faire évoluer deux objets d'un point de vue identitaire, spatial et temporel. Cette représentation est également à la base d'une série d'applications possibles.

La fin de ce travail est consacrée à deux applications basées sur la formalisation de l'évolution de la relation entre deux objets dans l'espace et le temps. Afin de répondre au souhait d'avoir, pour un utilisateur final, une méthode d'analyse simple de l'information spatio-temporelle, nous travaillons sur la généralisation du concept de configuration de vie et de mouvement. Le chapitre VII présente donc une application de généralisation des différentes évolutions possibles pour deux objets dans l'espace et le temps afin d'étudier cette évolution au travers d'un nombre limité de relations facilement interprétables. Outre quelques remarques particulières quant à l'impossibilité de certaines évolutions, ce chapitre montre l'intérêt d'un niveau d'abstraction élevé afin de percevoir facilement l'information spatio-temporelle.

Le dernier chapitre de ce travail revient à des notions familières de notre langage. Comme nous l'avons énoncé précédemment, tout modèle a besoin d'être compris et interprété afin d'être utilisé. Nous proposons donc au travers de ce chapitre une interprétation en langage naturel, soit dans notre langage usuel de notre vision abstraite des relations spatio-temporelles entre objets. Nous y présentons également la formalisation de concepts utilisés quotidiennement, tels que la « rencontre », le « croisement »... afin de parler d'information spatio-temporelle. Ce chapitre boucle notre recherche en revenant à l'expression familière de l'information spatio-temporelle et de l'identité.

Nous terminons bien évidemment par la proposition de plusieurs évolutions possibles de cette recherche, de l'explication des pistes laissées en suspens et de la présentation d'autres applications possibles à ce travail. Nous y proposons également un résumé des apports principaux de ce travail ainsi qu'une mise en perspective de l'apport de ce travail avec d'autres recherches du domaine.

Chapitre II.

État de la recherche

*Ma limite de l'Univers ne serait-elle
définie que par mes connaissances ?*

Ce chapitre est consacré à un descriptif de l'état actuel de la recherche relative aux divers domaines utiles dans la suite de ce travail. Il est évident que le lecteur intéressé par l'approfondissement d'une thématique particulière n'y trouvera pas nécessairement toutes les informations souhaitées. Notre volonté est cependant de proposer suffisamment de références afin de guider ses recherches.

Le fil conducteur choisi pour présenter l'état de la recherche est le suivant : nous commençons par décrire la notion d'« *identité* ». Cette notion étant un point fondamental de ce travail, nous en proposons une description complète. Nous abordons ensuite les notions les plus générales relatives à l'« *objet* ». Pour chacune de ces notions, nous aborderons leur utilisation dans le contexte d'applications géographiques et, par conséquent, dans le contexte de données à caractère spatial. La description des données géographiques sera étudiée via les « *relations spatiales qualitatives* » qu'il peut exister entre objets. Afin de pouvoir aborder l'évolution, il sera nécessaire de s'attarder sur la définition et la modélisation du « *temps* », ainsi que des relations temporelles associées. Finalement, nous aborderons le contexte de « *modélisation spatio-temporelle* ». Tout au long de ce chapitre, nous proposerons également au lecteur divers exemples afin d'aider à la compréhension des différents modèles.

1. De l'identité à l'identité géographique

Nous abordons ici différentes notions relatives à l'identité. L'identité telle que définie en philosophie qualifie le concept qui relie une chose à elle-même (Audi and Reference 1999). L'identité est également vue comme une relation bidirectionnelle. L'identité peut être définie analytiquement par :

$$\forall F (Fa \rightarrow Fb) \leftrightarrow a = b \quad (2.1)$$

Cette relation exprime que, pour toute propriété, si l'on retrouve la même propriété partagée par un objet A et un objet B, alors l'objet A et l'objet B sont identiques (Zalta 2006). Nous verrons par la suite que cette définition théorique n'est pas nécessairement toujours satisfaite, notamment lorsque l'on travaille dans un contexte spatio-temporel. Cette relation bidirectionnelle définit deux concepts. De gauche à droite, la relation exprime « *l'indiscernabilité des identiques* » et, de droite à gauche, celui de « *l'identité des indiscernables* ». Ces deux notions peuvent être expliquées respectivement comme « la non différenciation possible de deux choses identiques » et comme le fait que « deux choses identiques ne sont pas différenciables, hormis via leur identité ». Ces notions ont été définies par Leibniz et sont actuellement reprises sous le terme de la « *loi de Leibniz* » (Audi and Reference 1999; Zalta 2006).

Par la suite, nous présentons une sélection de questionnements et paradoxes relatifs à la définition de l'identité dans le domaine philosophique. Cette discussion a pour but de montrer la complexité d'une telle définition et des postulats qu'il est nécessaire de poser afin de permettre son utilisation dans le domaine logique ou informatique. Nous proposons par la suite les solutions métaphysiques ou théoriques établies pour répondre à ces questionnements. Ces solutions passent par une définition plus complète de l'identité.

A. Le paradoxe du « bateau de Thésée »

Les questionnements relatifs à l'identité datent de l'Antiquité³. A cette époque les questions propres à l'unicité de la personne et au fait d'être identique intéressaient déjà les philosophes. L'exemple le plus connu de cette interrogation est celui du « *bateau de Thésée* » ou du « *paradoxe de Thésée* ». L'histoire racontée par Plutarque évoque le voyage de Thésée parti d'Athènes vers la Crète afin de combattre le Minotaure. A son retour triomphant, les Athéniens décidèrent de conserver son navire. A cette fin, ils démontèrent les planches usées du bateau afin de les remplacer par des neuves de telle manière qu'au final toutes les planches du bateau furent remplacées (Ferret 1996). Cette légende amène à la question suivante : peut-on encore dire qu'il s'agit de bateau de Thésée ? En d'autres termes, l'identité du bateau de

³ Les premières notions d'identité logique ont été abordées par Platon et énoncées par Aristote.

Thésée a-t-elle été conservée bien que l'ensemble de ses constituants ait été remplacé ? Pour aller plus loin, nous pourrions nous demander quelle identité attribuer au bateau qui pourrait être reconstruit sur base des pièces usées extraites du navire ? Deux interprétations peuvent être données à cette fable. D'aucuns affirment que le bateau de Thésée a perdu son identité par le remplacement de tous ses constituants, d'autres affirment qu'il s'agit toujours du même bateau. La question est de savoir si le changement de matière implique un changement d'identité ou si celle-ci est conservée d'une autre manière⁴.

La réponse à ce paradoxe sera en partie formulée par Leibniz. Sa solution passe par l'explication de l'identité des indiscernables. Si l'on considère qu'il existe dans l'univers plusieurs choses, alors il est nécessaire de considérer un principe d'individuation pour permettre d'expliquer pourquoi il y a plusieurs choses. L'« *identité numérique* » est basée sur ce principe. A partir du moment où l'on considère plusieurs choses, alors elles sont différentes, à tout le moins, par une différence numérique. D'une manière intuitive, deux objets correspondants sont des copies l'un de l'autre à partir du moment où ils sont deux, et donc pas identiques. Par exemple deux montres issues de la même fabrication considérées comme identiques se différencient sur base numérique, le fait qu'elles soient deux. Mais ce principe n'est pas suffisant pour une compréhension complète de la différence entre deux choses. En effet, peut-on se baser uniquement sur une différenciation numérique pour individualiser des choses ? Dans ce cas, les choses n'ont qu'une seule manière de se différencier, le fait d'être plusieurs. Ainsi, il suffit uniquement d'avoir plusieurs objets pour qu'ils soient différents. Il n'est dès lors pas possible de prendre en compte plusieurs sortes de différences, une tasse est autant différente d'un verre que d'un chat. Les philosophes ont fait évoluer ce principe de différenciation numérique et ont décidé de ne plus le placer comme point fondamental de la différenciation. De cette manière, ils justifient que toute différence numérique doit être fondée sur une différence relative à la composition des individus. Toute entité possède au moins quelques différences avec les autres identités, sur base de quoi elles diffèrent numériquement. Leibniz a établi la loi métaphysique⁵ définissant que *deux choses qui partagent tous leurs attributs en commun ne sont pas seulement similaires, mais sont la même chose* (Zalta 2006). L'équation (2.2) doit être lue comme suit : pour toute entité x et y, et si et seulement si pour toute propriété de x, y a la même propriété, alors x est identique à y.

$$\forall x \forall y \forall P (Px \equiv Py) \supset (x = y) \quad (2.2)$$

Sur base de ce principe, nous pourrions dire que le navire de Thésée n'est pas identique à celui qui a été rénové. En effet, il ne partage plus toutes les propriétés du premier. Cependant, d'une manière intuitive, nous sentons qu'il s'agit toujours du même navire.

⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Bateau_de_Th%C3%A9s%C3%A9e Consulté en Août 2011.

⁵ Une loi métaphysique peut être comprise comme une loi qui n'est pas nécessairement vraie dans tous les mondes à contrario d'un principe logique. On pourrait donc imaginer un monde où ce principe n'est pas vrai.

Lorsque nous rénovons une maison par exemple, ce n'est pas parce que nous remplaçons un vitrage que nous changeons l'identité du bien. La solution à ce paradoxe vient donc d'une analyse de l'identité des constituants. Les formulations de l'identité fournies jusqu'à présent sont essentiellement statiques temporellement. L'expérience du bateau de Thésée quant à elle compare l'état du navire avant et après, temporellement parlant, le remplacement de ses constituants. L'analyse de l'identité doit donc avoir une composante spatio-temporelle.

B. L'identité à travers le temps

D'autres questionnements relatifs à l'identité proviennent de son étude au travers du temps. Est-ce qu'un objet aujourd'hui est identique à lui-même hier ? Si l'on s'en réfère à la définition(2.1), il sera toujours possible de trouver une propriété qui n'est pas identique entre hier et aujourd'hui, par exemple son âge, son usure... En d'autres termes, peut-on toujours vérifier la relation suivante :

$$\forall F \forall t_1 \forall t_2 (Fa_{t_1} \rightarrow Fa_{t_2}) \leftrightarrow a_{t_1} \stackrel{?}{=} a_{t_2} \quad (2.3)$$

En effet, si l'on considère une pièce de deux euros, elle possède une identité propre. Cependant, si elle est fondue, elle ne peut plus être utilisée comme monnaie, elle perd donc son identité de pièce de monnaie. Si la pièce *est* la partie de métal, si la pièce est le même objet que la partie de métal, alors la même chose semble être détruite et non détruite à la fois. En effet, bien que le résultat ne puisse plus être utilisé comme monnaie, son métal peut toujours être utilisé. Si la pièce *n'est pas* la partie de métal, i.e. si la pièce et la partie de métal ne sont pas un seul et même objet partageant la même identité, alors nous devons considérer qu'il existe deux choses différentes possédant chacune une identité au même endroit et au même moment. Pour répondre à ce paradoxe, Wiggins considère que la portion de métal n'est pas la pièce de deux euros, mais qu'elle constitue celle-ci (Carosella, Saint-Sernin et al. 2008). L'identité de la pièce ou du navire est donc conservée dans le temps bien que l'identité de tous ses constituants ou d'une partie de ceux-ci soient modifiés ou détruits. Cependant plusieurs scénarios peuvent être proposés afin de concevoir cette évolution temporelle (Carosella, Saint-Sernin et al. 2008).

- L'identité est définie de manière absolue. Dès le changement d'une propriété de l'objet, celui-ci ne partage plus toutes ses propriétés avec lui-même dans le passé et ils ne sont donc plus identiques ;
- L'identité est définie de manière relative à un *sortal*⁶. Des objets de différentes sortes peuvent occuper un même lieu et un même temps, mais des objets de même type ne le peuvent pas. Le bateau et ses constituants occupent la même portion d'espace-temps, il s'agit d'objets de différents types.

⁶ Un *sortal* est une classe dont toutes les instances sont identifiées de la même manière.

- L'identité est vue selon le principe de quadri-dimensionnalisme : le bateau avant et après rénovation sont des objets temporellement étendus distincts qui coïncident en t. Des parties temporelles d'objets distincts peuvent occuper le même espace au même temps, mais un seul et même objet ne peut occuper différentes parties temporelles.

Bien que les trois scénarios puissent avoir leurs justifications, nous préférons la 2^{ème} ou la 3^{ème} possibilité. La 2^{ème} possibilité étant communément admise en logique informatique, celle-ci est la plus souvent utilisée dans des modélisations statiques. Nous utiliserons par contre plus la troisième possibilité dans des modélisations spatio-temporelles.

C. L'identité de l'objet informatique

Dès la fin des années 80, Khoshafian et Copeland (Khoshafian and Copeland 1986) discutent de l'importance de la notion d'identité d'un objet dans les langages de programmation ainsi que dans les systèmes de gestion de base de données. Ils définissent l'identité comme « *the property of one objet which distinguishes each objects from all others* » (la propriété d'un objet qui le distingue chaque objet de tous les autres⁷). Ils plaident pour l'intégration d'une notion forte de l'identité au niveau conceptuel dans les langages de programmation ainsi que dans les langages de gestion de base de données. Pour eux, l'utilisation unique d'un nom de variable pour distinguer les objets temporaires mélange les concepts d'adressage et d'identité ; de même, l'utilisation d'une clé d'identification comme seul moyen de retrouver des objets persistants mélange l'identité avec le concept de valeur de donnée. L'utilisation de la notion d' « identifier key » (clé d'identification) proposée par Codd (Codd 1982) est pourtant parfaitement généralisée de nos jours. En effet, les systèmes de gestion de base de données, étant dédiés à la gestion et la manipulation de grand jeu de données persistantes, nécessitent un support complet de l'identité tant dans sa représentation que dans son évolution dans le temps. Khoshafian (Khoshafian and Baker 1994) explique que tous les objets sont uniques ; cependant, lorsqu'on modélise ceux-ci dans le but de les gérer dans un système de gestion de base de données, nous nous focalisons régulièrement sur une application particulière qui fait que nous ne prenons pas en compte toutes les propriétés qui permettraient de les différencier. Si le système gère de manière intégrée l'identité d'un objet, celui-ci restera unique même si toutes les propriétés modélisées venaient à être identiques. Le principe d'individualisation et de préservation dans les bases de données implique en effet que « *chaque mise à jour effectuée par un utilisateur doit préserver l'intégrité de l'individualité* » (Smith and Smith 1982).

Les langages de modélisation de données utilisent également le concept d'identité. Le plus connu d'entre eux est sans nul doute le langage de modélisation unifié UML (Unified

⁷ Traduction libre.

Modelling Language) (Bennett, McRobb et al. 2006). Ce langage visuel permet la modélisation de toutes les informations et de leur flux dans un système ou une organisation. Ce langage préconise que l'identité ne doit pas être gérée comme l'attribut d'un objet mais bien qu'elle en est un constituant principal. Trois types de composantes sont d'ailleurs définis pour une classe. L'état, qui exprime dans quelle situation un objet peut exister, les attributs qui donnent la valeur des propriétés de l'objet à un instant donné, et l'identité qui permet d'identifier de manière unique l'objet. Notons que, dans ces modélisations, la loi de Leibniz est respectée en ce sens que, si un objet possède toutes les mêmes propriétés d'un autre objet, alors ils peuvent être considérés comme identiques.

D'une manière générale, nous pouvons constater que la gestion de l'identité en informatique est bien moins développée qu'elle ne l'est dans le domaine philosophique. En effet, l'analyse, la gestion et le stockage des données d'un système via l'informatique obligent à effectuer une série de simplifications et de postulats de départ. Comme le présente la Figure II-1, le domaine d'analyse ainsi que les besoins des utilisateurs créent un filtre par lequel le problème est analysé et conservé. De cette manière, deux objets peuvent bien plus vite devenir identiques au niveau de leurs propriétés que lorsque nous l'analysons d'un point de vue philosophique. Deux véhicules modélisés comme instances d'objets dans une base de données ne contenant que des propriétés de marque et de modèle seront vite amenés à être identiques. Si l'on considère leurs numéros de châssis en plus, ils deviendront uniques. Ce numéro peut d'ailleurs être assimilé à un identifiant unique permettant leur différenciation. Dans le domaine philosophique, la définition de l'identité implique l'utilisation de n'importe quelle propriété, par exemple le comptage des atomes constituant l'objet. Dans ce cas, deux objets seront toujours uniques l'un par rapport à l'autre.

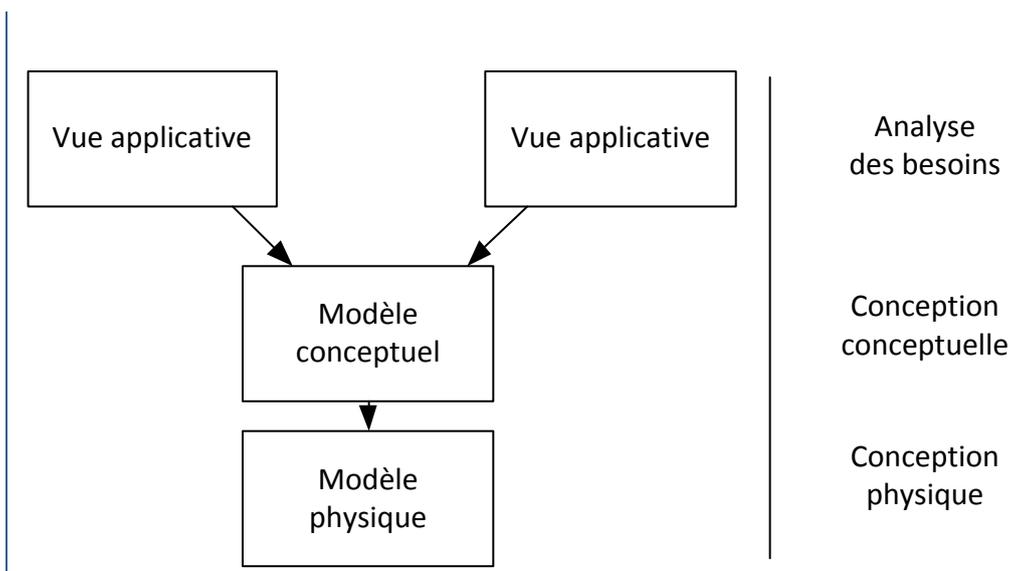


Figure II-1 : Organigramme de la succession des différentes étapes de conception d'une base de données. Traduit de (Smith and Smith 1982).

D. L'identité de l'objet géographique

Le problème de l'identité d'objets est crucial en géographie afin de suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps. Durant la fin des années 90, le monde scientifique de l'information spatiale s'est beaucoup intéressé à la gestion de l'identité des objets géographiques (Claramunt, Thériault et al. 1997; Galton 1997; Hornsby and Egenhofer 1997; Claramunt and Jiang 1998; Claramunt, Thériault et al. 1998; Hornsby and Egenhofer 1998; Hornsby, Egenhofer et al. 1999; Claramunt and Jiang 2000; Claramunt and Jiang 2000; Hornsby and Egenhofer 2000; Cohn and Hazarika 2001; Hazarika and Cohn 2001; Worboys 2001; Campos, Egenhofer et al. 2003; Campos, Hornsby et al. 2003). Un premier travail sur l'identité d'objets géographiques a été proposé par Hornsby (Hornsby and Egenhofer 1997; Hornsby and Egenhofer 1998; Hornsby and Egenhofer 2000) durant le début des années 2000. Elle propose un modèle de changement basé sur l'identité (« Identity based change »). L'objectif de ce modèle est de suivre l'évolution spatiotemporelle d'un objet sur base de la gestion avancée de son identité dans un système de données géographiques. Ce modèle propose une taxonomie de certains changements uniques possibles qu'il peut arriver à un objet géographique. Pour répondre à la modélisation de l'évolution des phénomènes géographiques, l'idée du modèle est de suivre le changement de manière qualitative. La succession d'états d'existence et de non-existence est prise en compte dans ce modèle afin de suivre les différents états possibles d'un objet géographique. Nous reviendrons plus en détail sur ce modèle dans la description des modèles spatio-temporels.

L'identité d'un objet géographique est également utilisée pour effectuer le lien entre sa représentation spatiale et les valeurs attributaires qui lui sont liées. Dans la majeure partie des formats de données géographiques hybrides, ce principe est aujourd'hui communément utilisé (Pantazis and Donnay 1996; Le Ber, Ligozat et al. 2007). Historiquement, ce principe est issu du fait que la représentation géographique n'était pas gérée de la même manière que les valeurs attributaires. En effet, la gestion même de l'information géographique par les systèmes de gestion de base de données est assez récente. Comme mis en exergue par Khoshafian (Khoshafian and Copeland 1986), les modèles de données proposés notamment par Esri⁸ mélangent les concepts d'adressage et d'identité.

2. De l'objet à l'objet géographique

L'évolution des langages de programmation et de la modélisation informatique a amené vers la fin des années 80 à considérer la notion d'objets (DeWitt and Zdonik 1990; Worboys, Hearnshaw et al. 2006). Plus proche de la perception humaine et facilitant la programmation, ce concept est aujourd'hui reconnu et utilisé comme standard dans quasi toutes les

⁸ Il s'agit ici notamment du modèle de fichier ArcInfo.

modélisations. La vision proposée fait suite à l'évolution des langages de programmation dit séquentiels (Kim 1990; Kim 2002). La notion d'objet, bien que simple à comprendre pour l'utilisateur dans le cadre de la modélisation, nécessite une connaissance plus approfondie pour les développeurs de tels systèmes. Cette notion est également reliée à toute une série de concepts philosophiques relatifs à la connaissance et aux données elles-mêmes. Le lecteur intéressé peut se référer à l'excellent livre « *On the origin of Objets* » de Smith (Smith 1998).

A. Représentation objet

La programmation orientée objet est un paradigme établi dans les années 70 (Kay 1996). Cela signifie qu'il s'agit d'une référence établie et communément adoptée par la communauté informatique. Ce paradigme consiste en la définition et l'interaction de briques logicielles appelées objets. L'objet sert à représenter un concept ou toute entité du monde physique. Il peut s'agir d'un livre, d'une région géographique, d'un pays. Pour chaque objet, il lui est défini une structure interne et des comportements. Sa structure interne est composée d'une part d'un ensemble de propriétés par lesquelles l'objet sera décrit, d'autre part par les actions ou comportements que l'objet sera capable de réaliser. La combinaison de ses différentes briques logicielles permet via leur communication et leur comportement de résoudre le problème ou l'action posée.

Comme déjà présentée, la modélisation UML est communément utilisée pour effectuer une représentation objet. Le « diagramme de classe » ou « diagramme statique » permet la représentation de l'état d'un système. Les objets y sont représentés via des classes et les relations entre les classes sont également présentes dans le formalisme. Pour chaque classe peut être définie une série d'attributs et de comportements. L'exemple suivant représente via le formalisme UML un exemple de gestion cadastrale.

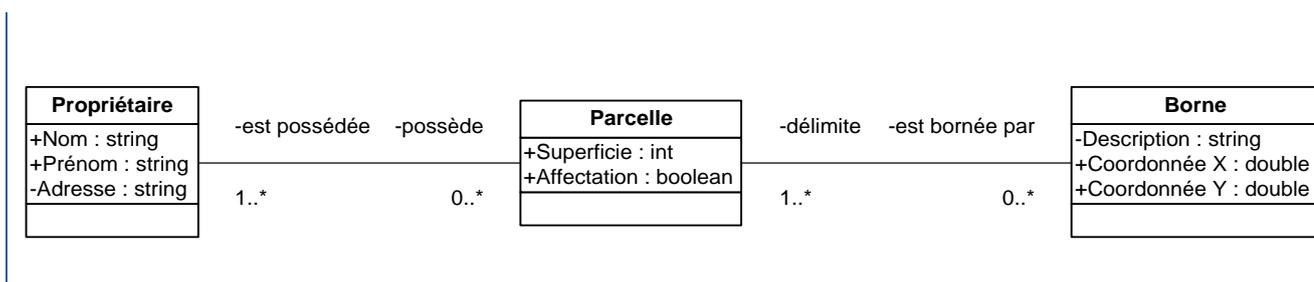


Figure II-2 Représentation d'une situation cadastrale via le formalisme UML. Ce formalisme permet la représentation orientée objet d'un système.

La représentation objet permet la modélisation de systèmes. Dans l'exemple présenté à la Figure II-2, la classe Propriétaire qui représente l'ensemble des objets propriétaires de parcelles est en relation avec une classe parcelle. Cette relation représente la possession d'une parcelle. Les cardinalités présentes sur les relations permettent d'identifier le nombre

d'occurrences minimales et maximales qui entrent en jeu dans la relation. La parcelle est à son tour en relation avec des bornes cadastrales. Pour chaque objet peuvent lui être associés des propriétés et des événements. Les propriétés décrivent les objets tandis que les événements fournissent des informations quant à leur comportement. Dans le cas de la modélisation du schéma conceptuel d'une base de données, les événements, autre que ceux qui sont implicitement pris en compte dans le système, sont souvent négligés. Il est à noter que nous n'indiquons pas d'identifiant pour les classes. Ceux-ci sont gérés nativement par le système. Si l'on indiquait un identifiant à ce stade, il pourrait y avoir des incohérences vis-à-vis des relations proposées. En effet, dans le cas d'une dépendance fonctionnelle, i.e. lorsque toutes les instances d'une classe sont en relation avec une autre classe, il n'est pas nécessaire d'identifier les individus de cette classe.

B. Représentation d'un objet géographique

L'évolution de la représentation objet a également fortement influencé le monde de l'information géographique. Différents types d'objets sont proposés par Smith (Smith and Varzi 1997; Smith and Mark 1998). Ils démontrent l'importance d'utiliser une ontologie dans le domaine géographique. En effet, les objets pris en compte dans le monde de l'information géographique diffèrent des objets que pourraient gérer le monde des sciences cognitives ou informatiques pures. La topologie⁹ et les relations d'une partie à un tout apparaissent beaucoup plus importantes dans le domaine géographique. Le changement d'échelle d'analyse peut notamment expliquer l'importance de ces relations. Les objets géographiques sont souvent identifiés par la localisation de leur frontière telle que les frontières d'un lac, d'une forêt, etc. Cependant deux types de frontières d'objet peuvent être distingués. Il s'agit des frontières *bona fide* et *fiat* (Smith and Varzi 1997). La première catégorie correspond à des véritables discontinuités dans le monde physique, par exemple une balle de tennis, une tasse, d'une certaine manière une rivière, un lac... La seconde correspond à des frontières qui sont projetées dans l'espace géographique de sorte que les discontinuités possèdent un certain degré d'indépendance par rapport aux objets qu'elles représentent. Les objets fiat sont typiquement des divisions administratives, des zones d'influences, les tropiques,... Tous les objets peuvent être classés de manière un peu plus complexe. Bien que leur définition fasse clairement référence à un objet fiat, leur frontière peut être vue comme un mélange des deux catégories. Il s'agit par exemple de la Corse qui, bien qu'une division administrative occupe une seule île bien définie, ses frontières qui, bien qu'objet du fait de l'homme, se voient clôturées ou à tout le moins marquées visiblement au sol.

En amont de la représentation géographique définie, il est intéressant de faire le point sur les différents paradigmes géographiques existants (Burrough and Frank 1995). D'une façon générale, il existe trois visions différentes de la géométrie d'objets. Historiquement, la

⁹ Plus de détails concernant les relations topologiques peuvent être trouvés au Chapitre II.3.B.

spatialité est vue comme un attribut particulier de l'objet, un attribut répondant à des propriétés particulières et pour lequel des comportements propres sont définis. Le second paradigme proposé voit la géométrie comme un objet à part entière. Une fonction relie alors une spatialité à un objet. Ainsi le changement de géométrie est indépendant du changement de l'objet. Ce paradigme est notamment utilisé dans le CityGML (Gröger, Kolbe et al. 2006). Une troisième possibilité, assez récente, est de dissocier la géométrie de l'objet de sa position. Un objet possède alors une géométrie relative indépendante de sa position. La position en elle-même devient un objet et est en relations avec la géométrie et l'objet fondamental. Nous reviendrons au Chapitre III sur le choix effectué dans cette recherche.

L'exemple présenté à la Figure II-2 met en jeu des objets possédant une spatialité. Les bornes sont localisées spatialement et elles composent des parcelles qui pourraient l'être également. Selon les normes de l'OGC¹⁰, la structuration de l'information spatiale peut également être représentée via une modélisation objet (Figure II-3). Cette structuration de l'information spatiale permet d'introduire directement une spatialité dans les modèles conceptuels orientés objets. Via des relations de spécialisation et généralisation, tous les objets possédant une composante géographique peuvent être liés à une série de classes géographiques de base. Certains outils CASE¹¹ permettent d'en dériver directement des bases de données géographiques où la spatialité des objets est gérée nativement.

¹⁰ Open Gis Consortium

¹¹ Ateliers Génie Logiciel (AGL)

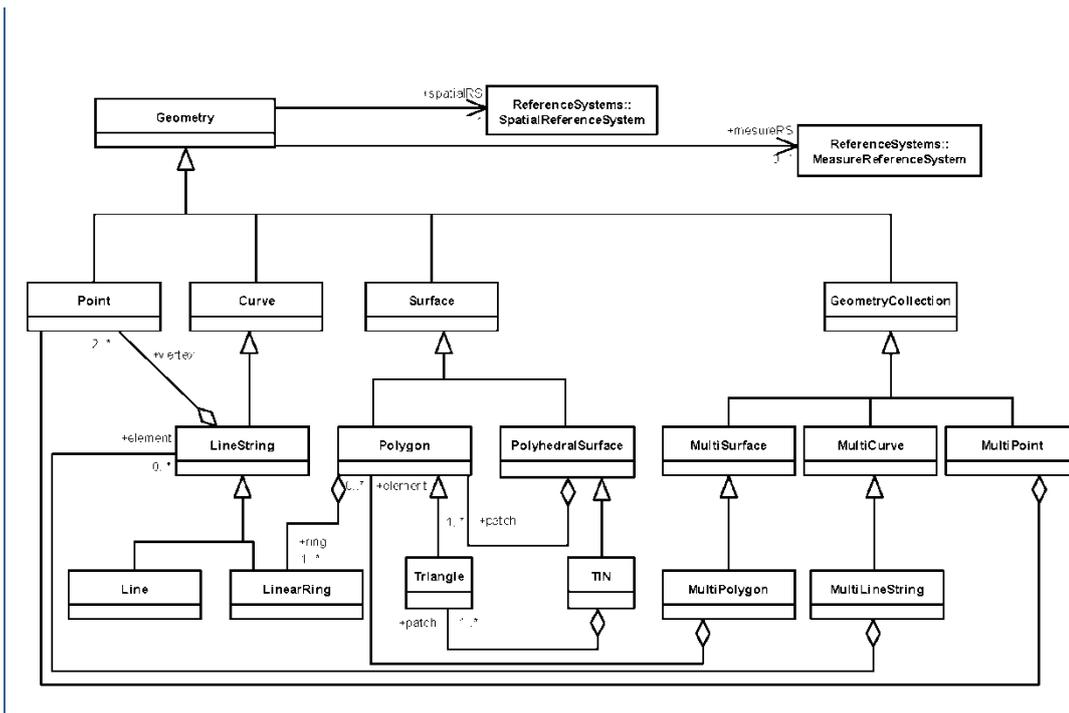


Figure II-3 Modèle de données géographiques « Simple Feature » de l'Open Gis Consortium¹². Ce modèle formalisé a pour but de représenter les différentes spatialités possibles pour un objet géographiques. On y retrouve une classe intitulée géométrie de laquelle hérite toute une série de spatialités prises en compte par la norme, tels que des points, lignes, polygones mais également des collections de ceux-ci.

C. Représentation spatiale

Cette réflexion sur la représentation spatiale d'un objet nous amène à nous questionner plus en profondeur sur la spatialité elle-même. Quelle spatialité représentons-nous ? Il n'est pas possible de représenter tout à fait fidèlement un objet géographique du monde réel. Une interprétation ou une généralisation est toujours nécessaire et est fortement dépendante de l'échelle d'analyse. La représentation ne capture qu'une partie des propriétés d'un objet et qu'une interprétation de sa spatialité via un filtre mathématique. Nous avons communément l'habitude de regarder la spatialité au travers de la représentation géométrique euclidienne. Celle-ci nous permet d'appréhender des coordonnées planes ou tridimensionnelles des points caractéristiques d'un objet géographique. Cependant, il est tout à fait envisageable de ne pas se concentrer sur une représentation géométrique euclidienne mais sur d'autres types de géométries. Par exemple, lorsque nous analysons un plan de métro, nous nous focalisons sur les différentes connexions possibles entre les lignes, la position dans l'espace de ces mêmes lignes et de leur parcours n'a que peu d'importance. Dans ce cas, nous parlons de

¹² Source : OpenGis Implementation Specification for Geographic information – Simple feature access. Consulté sur <http://www.opengeospatial.org/standards/sfa> en Août 2011.

représentation topologique d'un réseau. La spatialité peut même être envisagée via des géométries non continues (Stell and Webster 2007). La figure suivante permet d'appréhender les différentes géométries mathématiques possibles à l'interprétation de la spatialité d'un objet. La Figure II-4 représente différents pays de l'Union Européenne. Chaque représentation symbolise une vision géométrique différente de cette zone géographique. La géométrie utilisée est surimposée à chaque représentation.

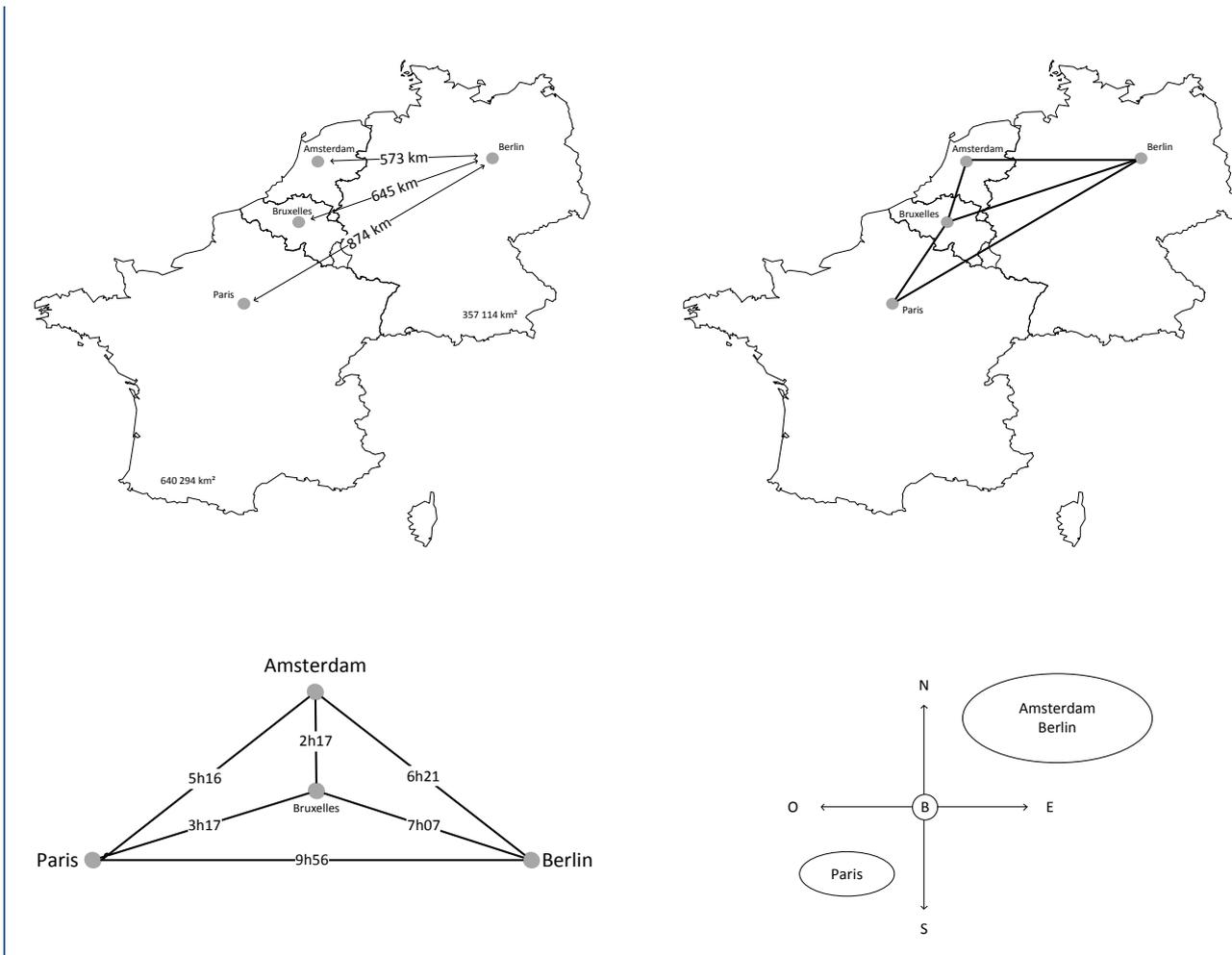


Figure II-4

Exemple de représentations géométriques de quatre pays européens. En haut à gauche, la représentation classique de ces pays avec la distance séparant les différentes capitales de ceux-ci. En haut à droite, sur la représentation classique est surimposée une vision topologique des connexions possibles entre les capitales. Seule la relation de connexion importe dans ce type de représentation. En bas à gauche, la représentation dans un espace temporel du temps de parcours nécessaire afin de rejoindre les différentes capitales. En bas à droite, une représentation spatiale qualitative de l'orientation de chaque capitale par rapport à la ville de Bruxelles.

i. Géométrie euclidienne – métrique

C'est la géométrie que nous avons tous pour habitude d'utiliser. Celle-ci fait appel aux notions métriques de qualification des objets. Ceux-ci y sont toujours représentés de manière quantitative via une mesure. Chaque pays est dimensionné en fonction d'une unité de mesure. La position d'un objet particulier est donnée par rapport à son écart à des directions de référence. On parle alors de coordonnées. Cette géométrie, bien que quasi toujours utilisée dans les analyses afin de présenter un résultat, n'est cependant que rarement choisie pour effectuer des raisonnements spatiaux. En effet, elle consomme énormément de ressources et n'est pas facilement modélisable via une série de relations simples telles que pourraient l'être des relations topologiques.

ii. Géométrie topologique

La géométrie topologique ou géométrie de la feuille de caoutchouc a été discutée très longuement dans le domaine des mathématiques (Asher and Vieu 1995; Cohn 1996; Clementini and Di Felice 1998; Vasardani and Egenhofer 2009). L'idée d'une telle géométrie est de ne se focaliser que sur les propriétés de connexion entre les objets. La position spatiale de ceux-ci n'intervient plus dans la géométrie topologique. Dans ce contexte, seule l'information de contenance des capitales par leurs pays respectifs est retenue (Figure II-5). L'image de la feuille de caoutchouc permet à l'utilisateur de se rendre compte que, quelle que soit la déformation homéomorphique que peut subir le plan, les relations topologiques resteront identiques. Ce type de géométrie peut fournir des informations telles la ville de Commines est à la frontière de deux pays ; le Rhin est également la frontière entre l'Allemagne et la France. Elle ne rend pas compte de la distance qui sépare Bruxelles de Berlin.

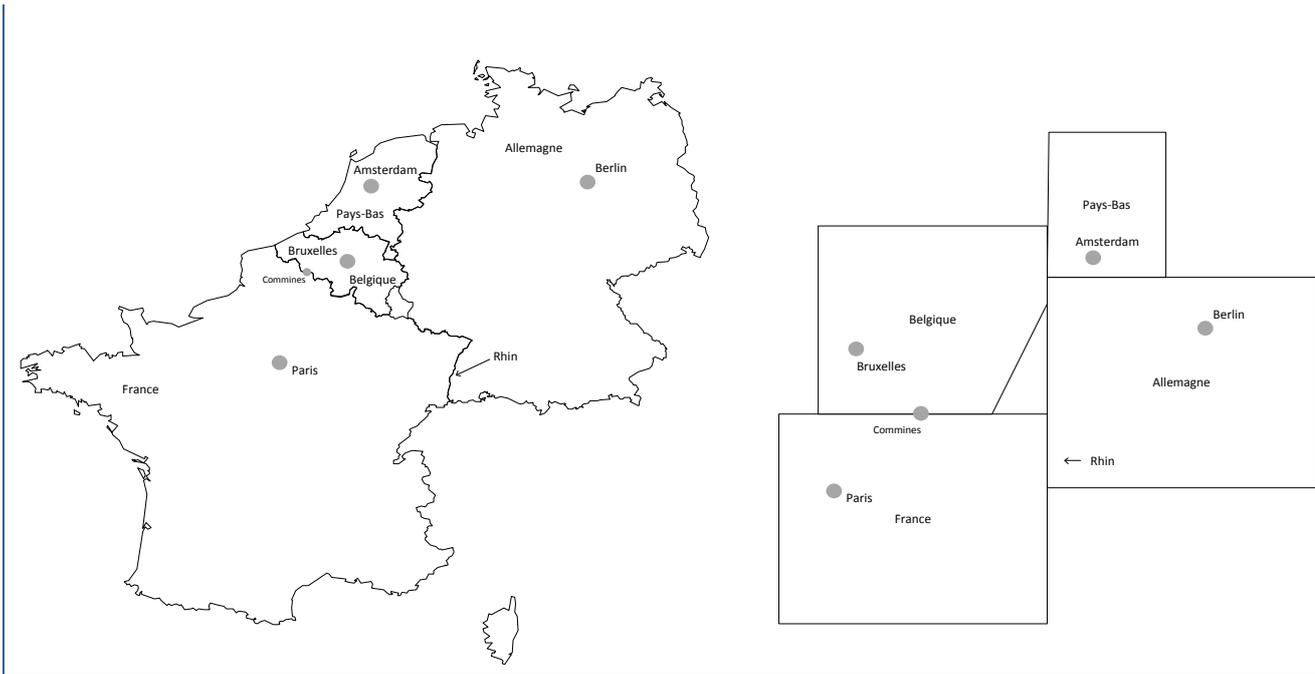


Figure II-5 Représentation de deux situations équivalentes d'un point de vue de la géométrie topologique. Les relations qu'il est possible d'établir entre les villes et les pays sont identiques dans les deux représentations.

iii. Géométrie projective

La géométrie projective fournit plus d'informations que la géométrie topologique. Elle permet notamment la description de concepts de convexité, concavité, d'alignement (Billen 2002). Avec celle-ci il est possible de détailler la relation qui lie la Croatie à la Bosnie Herzégovine comme présenté à la Figure II-6 (partie de droite). La géométrie peut également être à la base de concepts tels les notions de gauche et de droite. Lorsque l'on raisonne avec trois objets, il est possible de déterminer si un objet est à gauche ou à droite d'un axe. Dans l'exemple de la Figure II-6 partie de gauche, on voit que la ville d'Amsterdam est à gauche de l'alignement de Bruxelles et Berlin.

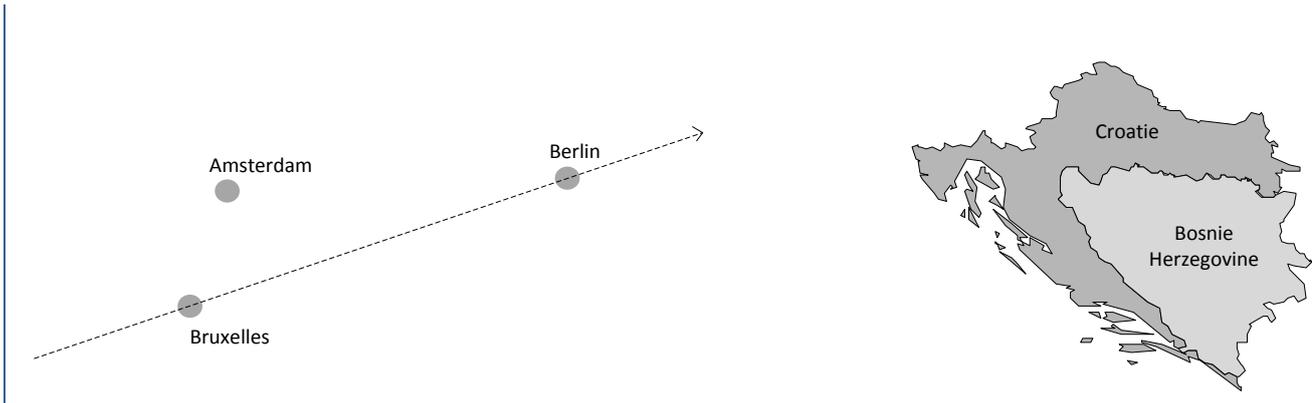


Figure II-6 Représentation en géométrie projective de configurations spatiales de pays et capitales européennes. A gauche, la position projective de la ville d'Amsterdam par rapport à Bruxelles et Berlin. A droite, la représentation de l'inclusion de la Bosnie Herzégovine dans la Croatie. Cette géométrie rend compte des convexités et des concavités des formes géométriques.

3. Raisonnement spatial

Une partie importante du raisonnement spatial est dédiée à l'étude des relations spatiales qualitatives qu'il existe entre deux objets. Ces relations sont utilisées lors de la modélisation des relations existantes entre des objets géographiques mais également lors de l'inférence de nouvelles connaissances notamment via ce qui est appelé des *tables de composition*. Ces tables fournissent l'information suivante : connaissant la relation qu'il existe entre les éléments A et B et les éléments B et C, quelles peuvent-être les relations possibles entre les éléments A et C :

$$\forall A, \forall B, \forall C ((r_1(A, B) \wedge r_2(B, C)) \rightarrow r_3(A, C)) \quad (2.4)$$

Les relations spatiales peuvent être décrites via plusieurs modèles mathématiques. Elles sont le plus couramment décrites via une approche qualitative. Dans le cadre des relations spatiales qualitatives plusieurs modèles possibles sont à nouveau différenciables. Il s'agit des approches topologiques telles qu'utilisées dans le modèle des 9 intersections (9-i), du CBM et des L-L orientées. Une approche se basant sur une géométrie projective peut également être envisagée. Dans ce cas, les relations ne décrivent plus uniquement les connexions qu'il peut exister entre deux objets mais y ajoutent des concepts projectifs de mathématique tels que les notions d'alignement, de convexité et de concavité. Les notions d'avant, d'arrière, de gauche et droite peuvent également être étudiées par l'analyse de trois objets.

A. Region Connexion Calculus – RCC

Le modèle du « Region Connexion Calculus » (RCC) a été proposé par Randell, Cui et Cohn (Randell, Cui et al. 1992; Cohn 1996; Cohn, Bennett et al. 1997; Cohn, Bennett et al. 1997; Cohn and Hazarika 2001; Randell and Witkowski 2004). Ce modèle a pour primitive spatiale les régions. Sur base de quelques primitives spatiales et une relation de connexion, ils construisent un modèle de relations spatiales qualitatives très élaboré valable pour des régions concaves et convexes (pour lequel il ne fait pas la différence). La plupart des modèles géométriques ont le point pour primitive de base. En effet, en géométrie euclidienne, la droite est définie comme l'ensemble de points possédant une même direction, le segment comme la portion de droite bornée par deux points, etc. Cependant, le point est géométriquement parlant une abstraction de l'esprit (Hernández 1994). En effet, il est défini comme un objet ne possédant pas de dimension. Il n'a pas de taille, ni de surface. Or, bien que cela soit très utile dans bien des cas de modélisation, il ne correspond pas aux phénomènes physiques que l'on peut rencontrer dans le monde réel. Aucun objet n'a pas de dimension. En fonction de la précision, un objet est toujours assimilable à une surface (Gotts, Gooday et al. 1996). De plus, comme dans la plupart des approches de topologie où le point est choisi comme primitive, une structure de composition supplémentaire est nécessaire pour reconstruire la surface à partir du point. Cette structure basée sur le point a notamment été reprise par l'OGC (voir 2.B). Historiquement, le RCC est basé sur les travaux de Clarke (Clarke 1981; Clarke 1985). Celui-ci propose d'utiliser la région comme un ensemble de points, bien que cela ne soit pas la préférence des auteurs du RCC. Il définit la relation dyadique¹³ primitive (2.5) qui doit être lue comme « x est en connexion avec y ».

$$C(x, y) \quad (2.5)$$

Cette relation reste valable si au moins un point est incident dans à la fois x et y. La définition proposée par Cohn est que cette relation primitive reste valable si la fermeture topologique des deux régions partage au moins un point. Pour lui, deux régions sont identiques si elles sont connectées exactement au même ensemble de régions, donc si les deux forment le même ensemble de points de leurs fermetures topologiques. Les deux axiomes principaux qui sont à la base du RCC sont les suivants :

$$\forall x [C(x, x)] \quad (2.6)$$

$$\forall x, \forall y [C(x, y) \rightarrow C(y, x)] \quad (2.7)$$

La table suivante reprend les différentes relations construites sur base des deux axiomes précédents :

¹³ Le terme dyadique qualifie une relation qui lie deux choses.

<i>Relation</i>	<i>interpretation</i>	<i>Definition of R(x, y)</i>
DC(x, y)	x is disconnected from y	$\neg C(x, y)$
EQ(x, y)	x is identical with y	$P(x, y) \wedge P(y, x)$
O(x, y)	x overlaps y	$\exists z[P(z, x) \wedge P(z, y)]$
DR(x, y)	x is discrete from y	$\neg O(x, y)$
PO(x, y)	x partially overlaps y	$O(x, y) \wedge \neg P(x, y) \wedge \neg P(y, x)$
EC(x, y)	x is externally connected to y	$C(x, y) \wedge \neg O(x, y)$
TPP(x, y)	x is a tangential proper part of y	$PP(x, y) \wedge \exists z[EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$
NTPP(x, y)	x is a nontangential proper part of y	$PP(x, y) \wedge \neg \exists z[EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$

Figure II-7 Table des 8 relations définies dans le RCC. Ces 8 relations représentent les différentes connexions possibles entre deux régions dans un monde à 2 dimensions. Ce jeu de relation est JEPD. Le tableau est tiré de (Randell, Cui et al. 1992).

Une interprétation spatiale peut être fournie pour ces 8 relations. Elles sont représentées à la Figure II-8. Nous verrons par la suite que ces relations sont quasi identiques à celles définies par Egenhofer et Herring (Egenhofer and Herring 1990) ou encore par Clementini (Clementini, Di Felice et al. 1993; Clementini and Di Felice 1998) plus ou moins au même moment. Cependant, l'approche de construction des deux modèles est totalement différente. Ces deux modèles de relations spatiales qualitatives sont sans doute les modèles les plus utilisés en raisonnement spatial de nos jours. Ils sont largement implémentés dans les différents SIG-Logiciels libres ou commerciaux et ont fait l'objet d'une normalisation.

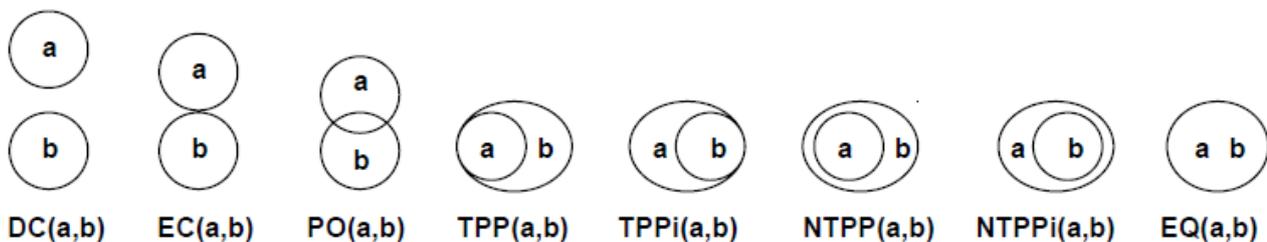


Figure II-8 Interprétation spatiale des 8 relations définies dans le modèle RCC. Il est à noter que cet ensemble de relations est un ensemble JEPD. Représentation obtenue de (Randell, Cui et al. 1992).

B. Binary topological intersection model (9i) – Modèle des 9 intersections

Le modèle des 9 intersections a été proposé par Egenhofer et Herring (Egenhofer 1989; Egenhofer 1989; Egenhofer and Herring 1990; Egenhofer 1991; Egenhofer 1993). Ce modèle

basé sur une topologie simplifiée des objets géographiques permet l'analyse de relations entre toutes les primitives spatiales. Comme nous l'avons montré précédemment, la topologie mathématique n'est pas toujours respectée lors de la modélisation d'information géographique. Comme on peut le constater sur le graphique, les primitives spatiales différencient divers constituants des primitives géométriques : l'extérieur, la frontière et l'intérieur.

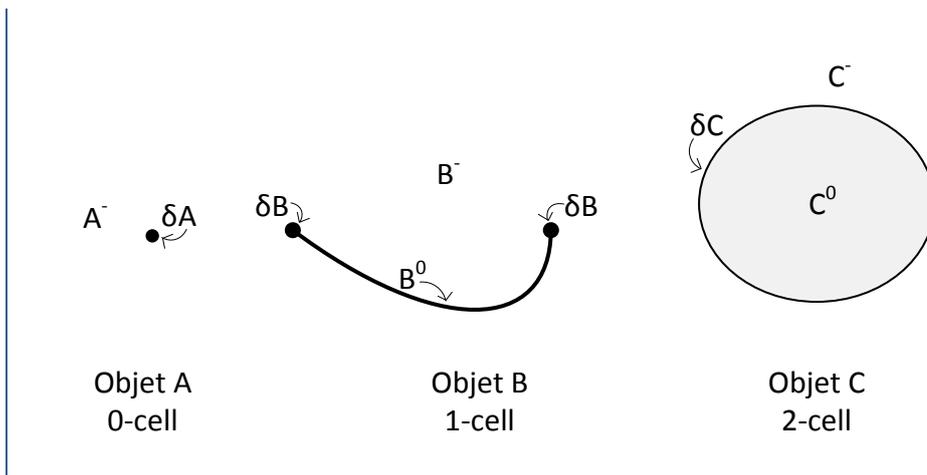


Figure II-9 Représentation de trois primitives géométriques, le point (0D), la ligne (1D) et le polygone (2D) dans un espace à deux dimensions. On peut également voir la décomposition proposée par Egenhofer et Herring en extérieur, frontière et intérieur de chaque objet. Le point ne possède pas d'intérieur, les extrémités du segment sont ses points de frontières et l'ensemble des points internes représente son intérieur bien que la définition formelle topologique du segment ne considère qu'une frontière pour le segment.

Ils basent leur modèle de topologie algébrique spatiale sur une primitive appelée « cells » (cellule) définie pour chaque dimension spatiale (Egenhofer and Herring 1990). Le 0-cell est un nœud ; le 1-cell est un lien entre deux 0-cell distincts et le 2-cell est la surface décrite par la fermeture de trois 1-cells qui ne s'intersectent pas. Plus généralement, la face d'un n-cell A est un (0...n)-cell qui est contenu dans A. Les axiomes suivants servent de base à la définition du modèle, ils définissent la fermeture, l'intérieur, la frontière et l'extérieur d'un cell.

- La fermeture d'un n-cell A, notée comme \bar{A} , est l'ensemble de toutes les faces $r-f$ de A, ou $0 \leq r \leq n$ soit :

$$\bar{A} = \bigcup_{r=0}^n r-f \in A \quad (2.8)$$

- L'ensemble théorique des frontières d'un n-cell A , représenté par ∂A , est l'union de toutes les r-facettes $r-f$, où $0 \leq r \leq (n-1)$, qui sont contenues dans A .

$$\partial A = \bigcup_{r=0}^{n-1} r-f \in A \quad (2.9)$$

- L'intérieur d'un cell A , noté comme A^0 , est l'ensemble de la différence entre la fermeture de A et la frontière de A .

$$A^0 = \bar{A} - \partial A \quad (2.10)$$

- L'extérieur d'un cell A , représenté par A^- , est l'ensemble de tous les cells de l'univers U qui ne sont pas un élément de la fermeture de A .

$$A^- = U - \bar{A} \quad (2.11)$$

Sur base de ces définitions théoriques d'une fermeture topologique et des constituants des primitives géométriques, ils construisent leur modèle de relations spatiales des 9 intersections. L'idée de base du modèle est de croiser les différentes primitives que sont l'intérieur, la frontière et l'extérieur dans une matrice. Cela crée donc 9 intersections possibles d'où le nom du modèle. Théoriquement, chaque intersection pouvant être nulle ou non nulle, il existe 2^9 possibilités. La relation topologique entre deux objets est donc définie par :

$$R_{(A,B)} = \begin{pmatrix} A^0 \cap B^0 & \partial B \cap A^0 & B^- \cap A^0 \\ \partial A \cap B^0 & \partial B \cap \partial A & B^- \cap \partial A \\ A^- \cap B^0 & \partial B \cap A^- & B^- \cap A^- \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

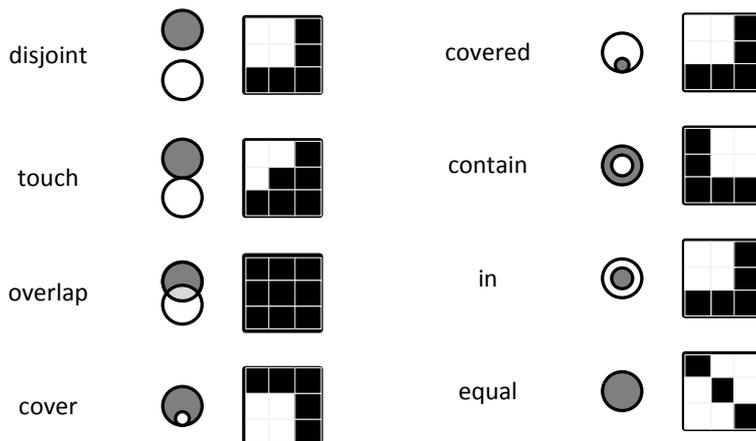


Figure II-10 Représentation des 8 relations spatiales qualitatives entre deux régions obtenues sur base d'une analyse topologique des intersections. Chaque relation est nommée par son nom usuel dans le langage courant. La figure présente également les patterns symbolisant les matrices d'intersections topologiques.

Les matrices d'intersections topologiques ne sont pas toujours représentées entièrement. Comme dans la Figure II-10, les matrices d'intersections sont représentées par un motif ou « pattern » indiquant si l'ensemble d'intersection est nul ou pas. Les patterns consistent en la représentation graphique de la matrice d'intersection via 9 cases qui sont respectivement noires ou blanches en fonction de la nullité ou non de l'intersection topologique (Kurata and Egenhofer 2006; Kurata and Egenhofer 2007). Plus généralement, les patterns sont souvent utilisés afin de rendre la visualisation de relations plus faciles à l'utilisateur. Ces pictogrammes font souvent l'objet d'une certaine formalisation propre aux modèles de relation qu'ils représentent. Différents auteurs (Thériault, Claramunt et al. 1999; Laube, Kreveld et al. 2005; Noyon, Claramunt et al. 2007; Gottfried 2008; Hornsby and King 2008) les utilisent dans leurs représentations.

Le modèle des 9 intersections a été très longuement étudié par la communauté de l'information spatiale. Les relations ont été définies pour des régions, mais aussi toutes les primitives géométriques. Le calcul des relations topologiques entre lignes fournit un résultat de 33 relations possibles.

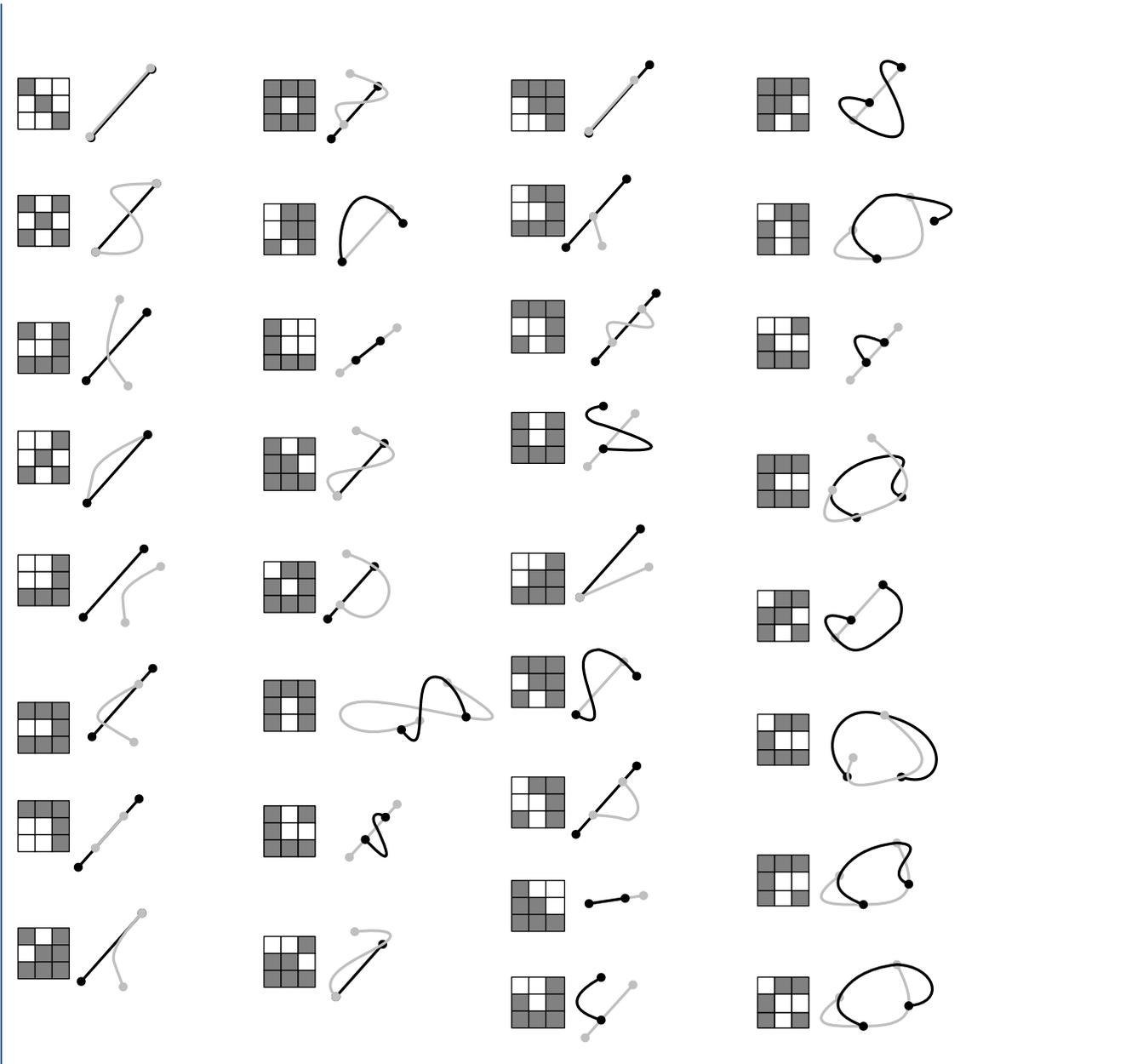


Figure II-11 Représentation d'une interprétation spatiale possible des 33 relations topologiques possibles entre deux lignes. La figure représente également les patterns des matrices d'intersections topologiques associées aux relations.

D'un point de vue théorique, il existe 2^9 relations topologiques possibles sur base de la matrice d'intersections. Cependant, certaines configurations matricielles n'ont pas de réalité physique. Pour réduire le nombre de possibilités sans avoir à tenter une représentation de chaque relation, Egenhofer et Herring ont proposé une série de conditions logiques qui s'appliquent aux matrices d'intersections topologiques. Ces conditions négatives utilisées dans la suite de ce travail sont présentées en annexe au Chapitre XII.1.

Cette représentation d'intersections topologiques a été à la base d'un certain nombre d'autres modèles. En effet, une décomposition supplémentaire des éléments constitutifs d'un objet géographique peut entraîner un certain raffinement des relations possibles entre deux objets. Dans ce cas, il ne s'agit plus de relations topologiques à proprement parler, mais bien toujours des relations spatiales qualitatives. Ces modèles prennent par exemple en compte une différenciation des points de départ et d'arrivée d'une ligne comme proposé par Kurata (Kurata and Egenhofer 2006; Kurata and Egenhofer 2007), ou le traitement de relations dans un espace projectif comme proposé par Billen (Billen 2002; Billen and Kurata 2008).

C. Calculus Based Model (CBM) et Dimension Extended Method (DEM)

Le calcul des relations spatiales topologiques a suscité plusieurs extensions. La plus marquante et la plus implémentée est sans nul doute le « *Dimension Extended Method* » (DEM) proposé par Clementini (Clementini and Di Felice 1993; Clementini, Di Felice et al. 1993; Clementini and Di Felice 1995). Ce modèle propose de tenir compte de la dimension de l'intersection d'une relation topologique. De cette manière, les auteurs proposent une extension plus détaillée des relations possibles entre deux objets géographiques. Ce modèle permet notamment d'effectuer la différence entre les différents cas présentés à la Figure II-12. La représentation de la matrice d'intersection topologique n'est plus simplement une représentation d'un ensemble vide ou non, mais fait place à la dimension du résultat de l'intersection (0D, 1D, 2D).

$$\dim(S) = \begin{cases} - \text{si } S = \emptyset \\ 0 \text{ si } S \text{ contient au moins un point et pas de ligne ni de surface} \\ 1 \text{ si } S \text{ contient au moins une ligne et pas de surface} \\ 2 \text{ si } S \text{ contient au moins une surface} \end{cases} \quad (2.13)$$

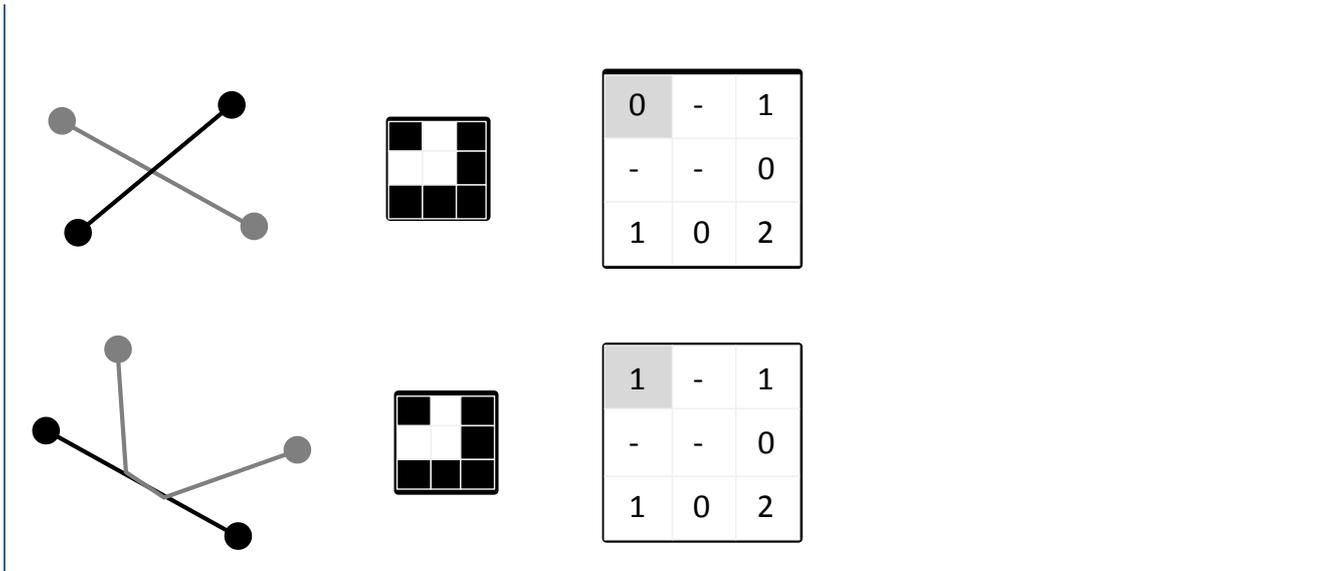


Figure II-12 Représentations de 2 relations topologiques identiques du point de vue du modèle des 9-i d'Egenhofer. Ces 2 relations sont différenciées dans le modèle DEM de Clementini par la description de la dimension des intersections. Dans la première relation, l'intersection entre les deux intérieurs est un point (0D) tandis que, dans la deuxième relation, l'intersection est un segment de droite (1D).

L'idée de départ du « Calculus Based Model » est que, sur base du DEM, le nombre de relations à représenter est trop important pour l'utilisateur et que celui-ci ne pourra pas extraire toute leurs significations. Ils proposent de réduire le nombre de relations en prenant en compte notamment uniquement les intersections entre les frontières dans le cas des relations lignes-régions. Ceci conduit à un plus petit ensemble de relations qui restent néanmoins tout à fait intéressantes pour l'utilisateur et la gestion de la majeure partie des cas d'utilisations.

D. Head-Tail-Body Intersection - D-line Relationships

Kurata (Kurata and Egenhofer 2006; Kurata and Egenhofer 2007) propose de différencier le point de départ (tail) et le point d'arrivée (head) d'un segment. Sur base d'une extension de la matrice d'intersection topologique, il obtient 68 relations possibles entre deux segments. Bien qu'il soit le premier à présenter ce résultat sous forme de diagramme conceptuel de voisinage et en matrice d'intersection, le principe même de raisonnement avait déjà été présenté par Clementini (Clementini and Di Felice 1998) en tenant compte de points de départs et d'arrivées de segments.

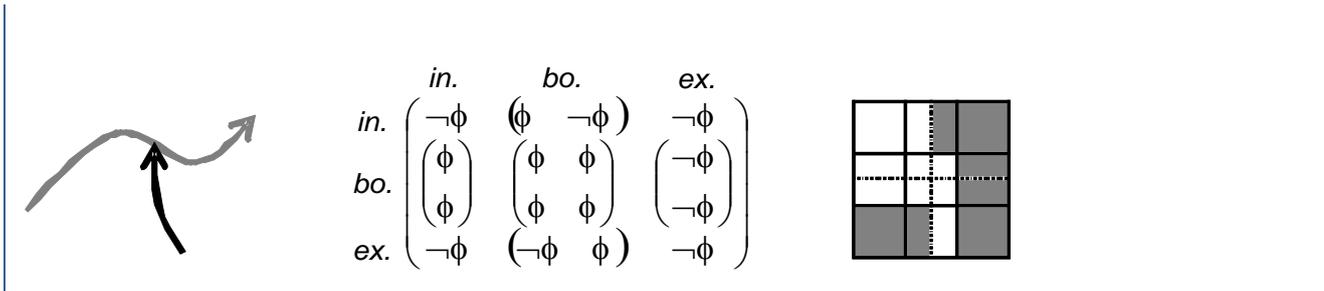


Figure II-13 Modélisation d'une relation entre deux lignes en considérant leurs points de départ et d'arrivée. La représentation est faite via le modèle 9+ intersection proposé par Kurata. Comme on peut le constater, la matrice d'intersection topologique voit ses colonnes frontières divisées en deux afin de différencier les intersections entre points de départ et d'arrivée.

4. Raisonnement temporel

Nous vivons dans l'espace et dans le temps. Ces concepts bien que triviaux font partie intégrante de notre vie courante. Il n'est pas simple de les modéliser, car nous évoluons dedans, nous en faisons partie. Il n'est pas évident de représenter et raisonner sur quelque chose qui nous compose. Nous analyserons toujours mieux quelque chose qui nous est extérieur. Le temps comme la perception d'objets spatiaux peut se modéliser de différentes manières. Deux grandes visions existent dans la modélisation du temps (Gale 1968; Miller 2005). D'une part, une vision absolue et, d'autre part, une vision relative. La position temporelle d'un objet peut être vue soit en rapport avec une échelle absolue et positionnée sur celle-ci, soit être décrite sur base des relations que son existence ou son évolution entretient avec son entourage. Ces deux visions ne sont pas contradictoires mais complémentaires. Nous percevons le temps tous de manière différente. Nous nous référons à une échelle absolue lorsqu'il s'agit de prendre un train, d'être à l'heure à une réunion. Cependant, le temps que nous percevons n'est pas toujours identique. Durant certains événements ou actions, le temps que peut durer ces faits varie en fonction d'un certain nombre de critères objectifs, mais surtout subjectifs comme l'intérêt que nous y trouvons, l'attention que nous portons aux faits, etc. La vision absolue du temps se focalise plus sur la structure qui sert de référentiel à la position dans le temps. La vision, relative quant à elle, se focalise plus sur l'événement lui-même et est indépendante d'une échelle de mesure absolue (Peuquet 1994). Cette similarité avec l'espace conduit à une modélisation du temps fort proche des concepts spatiaux. Le temps peut être vu comme un espace à une dimension, les modélisations spatiales unidimensionnelles peuvent donc s'en approcher. Cependant, une différence importante est à noter entre l'espace et le temps. Le temps avance inexorablement. Quel que soit l'objet modélisé, le phénomène observé, il ne peut pas se produire une seconde fois exactement de la même manière. Ce qui est passé est passé. La dimension temporelle est donc orientée. Dans le cas de l'espace, cela est fort différent. Rien n'empêche de revenir en

arrière et de retrouver la même position spatiale. Toutes les questions relatives à la modélisation de l'espace entrent cependant également en compte avec la dimension temporelle (Augusto 2001). Quelle unité prendre en compte, quelle est l'influence de la notion d'échelle pour la modélisation d'un phénomène, où placer les limites d'un changement d'état d'un objet. Dans la suite de ce chapitre, nous fournissons plusieurs définitions du temps telles qu'implémentées en logique classique. Ces définitions sont basées sur l'ouvrage de Le Ber, Ligozat et Papini intitulé « *Le raisonnement sur l'espace et le temps* » (Le Ber, Ligozat et al. 2007).

A. Le temps comme une succession d'instants

Afin de représenter les structures des entités temporelles, il faut tenir compte des propriétés courantes des ordres caractérisant les diverses théories à base d'instants. Ces propriétés sont appelées ordres sous-jacents. L'idée est de revenir à la définition la plus fondamentale du prédicat nécessaire à la définition du temps. Les structures temporelles à base d'instants sont du type :

$$\mathcal{I} = \langle T, < \rangle \quad (2.14)$$

T est un ensemble d'instants et < est un ordre partiel strict, irréflexif et transitifs qui peut avoir des axiomes supplémentaires comme :

- la linéarité :

$$\forall x \forall y (x < y \vee y < x \vee x = y) \quad (2.15)$$

- la succession :

$$(\forall x \exists y y < x) \wedge (\forall x \exists y (x < y)) \quad (2.16)$$

- la densité :

$$\forall x \forall y (x < y \rightarrow \exists z (x < z < y)) \quad (2.17)$$

- l'ordre discret :

$$\begin{aligned} \forall x \forall y \left(\left(x < y \rightarrow \exists z (x < z \wedge \neg \exists u (x < u < z)) \right) \right) \\ \left(\left(x < y \rightarrow \exists z (z < y \wedge \neg \exists u (z < u < y)) \right) \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Ces différentes propriétés peuvent être expliquées assez simplement. La linéarité représente le fait que, si l'on considère trois instants, ils ne peuvent être que successifs dans le passé ou le futur, ou égaux. La densité exprime le fait qu'entre deux instants il existe toujours

un instant qui peut s'intercaler. L'ordre discret quant à lui est contradictoire avec la densité. Ces deux propriétés ne peuvent exister simultanément dans une définition temporelle. Il représente le fait que deux instants successifs ne peuvent admettre un instant supplémentaire entre eux. Si l'on considère les propriétés (2.15), (2.16), (2.17), on peut effectuer un homéomorphisme entre la représentation du temps et l'ensemble des nombres réels \mathbb{R} . Une théorie temporelle définie à l'aide de ces prédicats est en effet très semblable aux prédicats définissant l'ensemble des nombres réels auquel on ajouterait une propriété de succession. Certains vont même jusqu'à utiliser une logique temporelle pour en dériver une définition des nombres réels (Galton 2011). Cette logique temporelle instantanée est utilisée dans plusieurs représentations de formalisme spatio-temporel tel qu'on peut les retrouver notamment dans plusieurs modèles (Mc Dermott 1982; Galton 1995; Galton 1995; Galton 1997; Galton 2000; Galton 2001; Galton 2004; Van de Weghe, Cohn et al. 2006; Noyon, Claramunt et al. 2007). L'autre vision du temps est de le considérer comme discret. L'homéomorphisme a alors lieu vis-à-vis de l'ensemble des nombres naturels \mathbb{N} . Chaque instant étant associé à un nombre naturel toujours avec le prédicat supplémentaire d'ordonnement ne permettant pas le retour dans le passé. Dans le cas d'un temps non-linéaire, où la propriété (2.15) ne serait pas prise en compte, on parle de « *branching time* ». Cette approche permet la modélisation de plusieurs futurs possibles, ou de plusieurs passés en fonction par exemple de l'interprétation que l'on peut donner à des événements anciens non connus parfaitement (Gerevini 1997). Le temps peut finalement être modélisé comme possédant un début et une fin, ce qui inverse la propriété (2.16). Cependant, dans la majeure partie des cas d'applications courantes, cette propriété sera toujours prise en compte. En effet, il faut se rapporter à des modélisations proches de concepts plus philosophiques ou proches de l'astrophysique afin d'avoir la nécessité de considérer un « *début du temps* » ou une « *fin du temps* ».

La granularité temporelle (Gerevini 1997; Claramunt, Jiang et al. 2000; Hornsby and King 2008) est également une notion importante dans l'approche de modélisation. Le temps peut être regroupé en différentes entités correspondant par exemple aux secondes, minutes, heures. Ces entités sont hiérarchisées et se composent l'une l'autre. En fonction de la représentation et de l'abstraction invoquées dans une représentation, certains niveaux n'auront pas de sens ou seront privilégiés. En effet, si l'on imagine une modélisation de phénomènes géologiques de formation de roches, la granularité temporelle sera choisie en fonction de l'échelle des phénomènes représentés. Il est évident que l'entité « seconde » ne sera pas prise en compte. A contrario, lors de la modélisation de l'impact d'une balle de tennis, cette entité prendra tout son sens. Enfin, si l'on considère une synchronisation informatique ou d'horloges de récepteurs GNSS, la seconde sera une entité bien trop grande pour être prise en compte. La même réflexion peut avoir lieu pour le raisonnement spatial en fonction de l'échelle d'analyse ou de conceptualisation (Clementini, Felice et al. 1997).

B. Le temps comme une succession d'intervalles

La deuxième grande vision de modélisation temporelle est celle des intervalles de temps. A l'instar des modèles de représentations spatiales, l'entité primitive de modélisation du temps peut ne pas être ponctuelle (ou instantanée) mais toujours avoir une certaine durée, si petite soit-elle (Randell, Cui et al. 1992). Le choix des modèles de raisonnement temporel à base d'intervalles est bien plus vaste que celui des raisonnements à base d'instant. Les structures sont principalement fondées sur l'inclusion ou le recouvrement des intervalles, sur la relation de contact temporel ou sur une approche hybride entre les deux dernières méthodes (Le Ber, Ligozat et al. 2007).

i. L'axiomatisation de Van Benthem

Van Benthem (van Benthem 1983; van Benthem 1989) propose une axiomatisation de la logique temporelle sur base d'intervalles de la manière suivante :

$$\mathcal{T} = \langle I, \sqsubseteq, < \rangle \quad (2.19)$$

Le symbole \sqsubseteq signifie la relation d'inclusion, I l'ensemble d'intervalles et $<$ la relation de précédence temporelle. La logique possède les axiomes suivants :

- La transitivité :

$$x \sqsubseteq y \sqsubseteq z \rightarrow x \sqsubseteq z \quad (2.20)$$

- La réflexivité :

$$x \sqsubseteq x \quad (2.21)$$

- L'antisymétrie :

$$x \sqsubseteq y \sqsubseteq x \rightarrow x = y \quad (2.22)$$

- La liberté

$$\left(\forall z (z \sqsubseteq x \rightarrow z \sigma y) \right) \rightarrow x \sqsubseteq y \quad (2.23)$$

avec σ , le recouvrement temporel défini comme :

$$x \sigma y \triangleq \exists u (u \sqsubseteq x \wedge u \sqsubseteq y) \quad (2.24)$$

- L'orientation

$$\forall x \forall y \exists u (x \sqsubseteq u \wedge y \sqsubseteq u) \quad (2.25)$$

La relation de précédence temporelle possède des propriétés très similaires aux logiques temporelles d'instants comme la transitivité (2.14), l'irréflexivité (2.14) et la succession (2.16). Les notions de densité et de linéarité s'expriment quant à elles d'une manière différente :

- La linéarité :

$$x < y \vee y < x \vee x \sigma y \quad (2.26)$$

- La densité :

$$\forall x \exists y_1 \exists y_2 (x = y_1 + y_2) \quad (2.27)$$

La linéarité exprime que deux intervalles ne peuvent que se précéder, dans le passé ou le futur, ou se recouvrir. La densité définit que, si petit soit l'intervalle x , il existera toujours un intervalle y_1 et y_2 qui composent l'intervalle x . D'autres axiomes tels que l'incompatibilité, la monotonie, l'ordre, la convexité et la liberté 2 propres à cette modélisation peuvent être énoncés. Cependant, comme ils sortent du cadre strict de notre recherche, nous renvoyons le lecteur intéressé à (Ligozat 2006; Le Ber, Ligozat et al. 2007) pour une explication claire de ces principes.

ii. L'axiomatisation basée sur la relation de contact

La théorie fondée sur cette axiomatisation est sans nul doute la théorie temporelle la plus connue tant en intelligence artificielle ou en modélisation logique qu'en théorie du sens commun, en théorie du langage naturel, etc. Il s'agit de la théorie temporelle de Allen (Allen 1983; Allen 1984; Galton 1990; Allen 1991; Trudel 1996). Développée dans l'idée de raisonner sur des événements ayant une durée, ce raisonnement ignore les instants. Un lien entre cette théorie et une modélisation à base d'instants a cependant été réalisé par Galton (Galton 2000). L'idée révolutionnaire de cette théorie est que tous les axiomes sont basés uniquement sur une relation unique intuitive de contact : « *meet* ». Cette relation exprime que deux intervalles se touchent sans se recouvrir et est définie comme :

$$x \parallel y \triangleq \text{meets}(x, y) \quad (2.28)$$

$$x \parallel y \parallel z \triangleq \text{meets}(x, y) \wedge \text{meets}(y, z) \quad (2.29)$$

Les propriétés suivantes sont alors définies¹⁴ :

¹⁴ Ces définitions sont directement tirées de la page 39 de l'ouvrage suivant : Le Ber, F., G. Ligozat, et al., Eds. (2007). Raisonnements sur l'espace et le temps : des modèles aux applications, Lavoisier.

- Les intervalles définissent une classe d'équivalence des intervalles qui les rencontrent :

$$(x \parallel y \wedge x \parallel z \wedge t \parallel y) \rightarrow t \parallel z \quad (2.30)$$

- Deux intervalles qui rencontrent les mêmes intervalles sont égaux :

$$[\forall x \forall z (x \parallel y \parallel z \wedge x \parallel u \parallel z)] \rightarrow u = y \quad (2.31)$$

- Le temps est infini et les intervalles sont finis :

$$\forall x \exists y \exists z (x \parallel y \wedge z \parallel x) \quad (2.32)$$

- La somme de deux intervalles qui se rencontrent est définie par :

$$x \parallel y \parallel z \parallel t \rightarrow \exists u (x \parallel u \parallel t) \quad (2.33)$$

- La linéarité de l'ordre sous-jacent. En d'autres termes, il s'agit soit du point de rencontre identique entre deux intervalles successifs, soit de l'intervalle contenu entre les deux points de rencontre :

$$(x \parallel y \wedge u \parallel v) \rightarrow (x \parallel v \oplus \exists z (x \parallel z \parallel v) \oplus \exists z (u \parallel z \parallel y)) \quad (2.34)$$

A partir de ce jeu d'axiomes, on définit un ensemble de 13 relations temporelles entre intervalles. Celles-ci sont devenues un vrai standard en intelligence artificielle. Elles sont représentées à la Figure II-14. La figure présente les 13 relations sous la forme d'un diagramme conceptuel de voisinage (Freksa 1991). Ce concept sera plus expliqué à la section B. Un parallèle fort peut être dressé entre cette représentation temporelle et les relations possibles entre deux lignes dans un espace unidimensionnel. C'est ce qui est à la base de plusieurs méthodes de raisonnements spatiaux ; nous renvoyons à (Freksa 1992; Freksa 1992) pour plus d'informations à ce sujet.

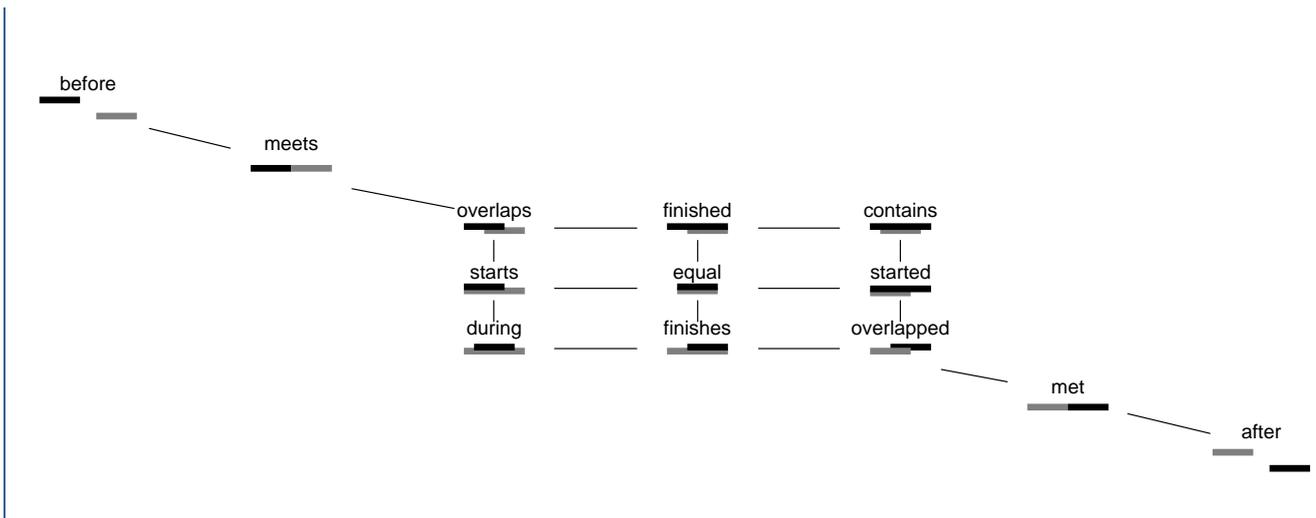


Figure II-14 Représentation des 13 relations temporelles d'Allen. Ce modèle temporel a pour primitive l'intervalle temporel. Les relations sont présentées sous la forme d'un diagramme conceptuel de voisinage (Freksa 1991). L'interprétation en langage naturel de chaque relation est également présentée.

C. Le temps comme un modèle pour l'action et le changement

La modélisation du temps telle que vue en intelligence artificielle est utilisée principalement à la modélisation du changement d'état. Un « état » est vu comme une situation stable par rapport au monde physique. Un changement est défini comme une modification de cette situation stable dans le temps vers une autre situation à nouveau stable. Cette modification de situation est dès lors vue comme étant instantanée ou comme ayant une certaine durée. Ces deux visions sont consécutives à la primitive temporelle envisagée pour la modélisation (Pani and Bhattacharjee 2001).

i. *Situation Calculus*

Le « Situation Calculus » (SC) proposé par McCarthy et Hayes (McCarthy and Hayes 1969) est sans doute un des premiers systèmes de raisonnement décrivant l'action (Pani and Bhattacharjee 2001). Ce modèle propose une représentation du monde comme un ensemble de situations instantanées. Le monde y est décrit comme une succession de « snapshots » (instantanés) pour lesquels une description du monde y est donnée. L'état du monde reste stable jusqu'à ce qu'une action soit effectuée afin de transformer son état vers un nouvel état stable. L'action est considérée comme la transition entre les états, elle est donc constituée de la paire : situation initiale, effets. Le temps n'est pas représenté tel quel dans le SC, il est implicitement compris dans la notion de situation. Celui-ci a comme primitive l'instant et possède une structure linéaire et discrète. Un problème majeur de cette représentation est qu'elle ne peut tenir compte d'une notion de durée pour une action ou tenir compte d'effets reportés dans le temps pour une action (Yoav 1987). La structure discrète du temps rend également difficile la modélisation de la continuité du changement. Plusieurs problèmes ont

été soulevés concernant cette modélisation, dont certains directement par les auteurs. Il s'agit notamment de la complexité qu'entraîne une modélisation poussée, celle-ci devant notamment formaliser tout ce qui change et également tout ce qui ne change pas entre chaque état. La complexité y augmente donc rapidement de manière incontrôlable.

Une situation s est décrite comme l'état complet de l'univers à un instant donné. Comme la description complète de l'univers est impossible, une simplification est nécessaire, seulement la partie intéressante pour l'analyse est décrite. Les auteurs parlent de « faits » relatifs à la situation. Ces faits sont utilisés pour déduire d'autres « faits » futurs à propos de la situation s ou d'une situation future. Les propriétés d'une situation sont qualifiées de « fluents » (courants) qui déterminent la transition vers une situation nouvelle. Les fluents peuvent être vus comme une fonction booléenne relative à une situation. Afin d'explicitier la notion de situation et de fluents, partons de l'exemple suivant. Considérons 2 blocs A et B disposés sur une table et l'action de déplacer le premier bloc pour le déposer sur le second. Afin de résoudre ce problème, une définition axiomatique de l'action « déposer dessus » doit être fournie :

$$\begin{aligned} & (Holds(clear(x), s) \wedge Holds(clear(y), s) \wedge x \neq y) \\ & \rightarrow Holds(on(x, y), Result(Puton(x, y), s)) \\ & \wedge \neg Holds(clear(y), Result(Puton(x, y), s)) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Avec le prédicat $Holds(x, s)$ qui signifie que la propriété x est valide à la situation s , « clear » qui signifie que l'objet n'est pas surmonté, « on » que l'objet est sur un autre et « Puton » l'action de déposer un objet sur un autre. L'exemple précédent devient alors :

$$\begin{aligned} & Holds(clear(A), S1) \wedge Holds(clear(B), S1) \wedge \neg Holds(on(A, B), S1) \\ & S2 = Result(Puton(A, B), S1) \\ & \Rightarrow \\ & Holds(on(A, B), S2) \wedge \neg Holds(clear(B), S2) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Le prédicat « Result » est alors appelé « Fluent », il fait le lien d'une action et une situation à une autre situation. Le prédicat « Holds » et la manière de représenter une situation par rapport à un instant seront largement utilisés dans les modèles d'inférences temporelles postérieures à celui-ci. Il sera d'ailleurs étendu afin de considérer des intervalles de temps.

ii. *Mc Dermott*

McDermott propose dès 1982 une première logique de raisonnement relative au temps (Mc Dermott 1982). Cette logique basée sur l'approche de la physique naïve de Hayes (McCarthy and Hayes 1969; Hayes 1990) a pour but une formulation naïve du temps utilisable pour inférer des connaissances. Ce modèle permet l'analyse de la causalité de phénomènes,

de changements continus et de problèmes de décalage temporel. La logique de McDermott est, comme celle du SC basée sur la notion de « states » (états). Cependant, il inclut également une notion d'intervalle dans son raisonnement. L'intervalle y est défini comme une paire de points ou d'instant. Il considère également la relation d'ordre \leq interdisant le retour dans le passé. Son ontologie temporelle inclut la précédence, l'infinité passée et future, et finalement un « *branching time* » basé sur une structure hiérarchique des différentes possibilités futures. Il nomme « *chronicle* » le chemin maximum au travers des différents états successifs du monde ; cela correspond à une possible histoire du monde. Le modèle effectue également la différence entre les faits et les événements. Un fait est un ensemble d'états définis comme vrais. L'événement quant à lui est l'intervalle (ou la période) durant lequel l'événement se produit, i.e. le changement d'un état du monde stable vers un autre état stable du monde. Ce modèle a surtout été utilisé dans des études de projections et de planification comme étude des différentes successions possibles d'événements et de l'effet d'actions sur l'état du monde (McDermott 1997).

iii. Le temps pour logique propositionnelle

La logique temporelle « *Propositional Linear Temporal Logic* » (PLTL) est une logique temporelle propositionnelle (Manna and Pnueli 1992). Elle est basée sur un ensemble de variables et principalement sur deux opérateurs booléens : O et \cup symbolisant respectivement une opération unitaire, i.e. signifie qu' « à l'instant suivant il sera le cas que... » et l'opérateur temporel binaire, i.e. spécifie que la formule $f_1 \cup f_2$ est vraie s'il existe un instant futur pour lequel f_2 est vraie et tel que : pour tous les instants le précédant et suivant l'instant courant, la formule f_1 est vraie (Balbiani and Condotta 2001). La formule de base du PLTL est :

$$f \triangleq \{A, \neg f, (f_1 \vee f_2), Of_1, f_1 \cup f_2\} \quad (2.37)$$

avec A une variable propositionnelle et f_1, f_2 deux formules. L'axiomatisation du temps dans ce modèle est discrète, linéaire et finie dans le passé et infinie dans le futur. Cette logique est à la base de nombreuses modélisations spatio-temporelles, citons notamment les modèles de Balbiani (Balbiani and Condotta 2001) et Wolter (Wolter and Zakharyashev 2000).

iv. Le temps comme base à une modélisation événementielle

Nous ne détaillerons volontairement pas toutes les approches temporelles événementielles. Cependant, pointons les travaux de Galton (Galton and Augusto 2002) qui propose un état actuel des notions d'événements dans le monde de la modélisation des bases de données ou de l'intelligence artificielle et la modélisation telle que proposée dans le domaine de la formalisation des connaissances. La première approche est souvent basée sur une notion événementielle associée à des instants tandis que la seconde considère plus

généralement des intervalles de temps. Bien qu'une communication existe entre les deux domaines, cette dichotomie est souvent observable. D'autres auteurs ont travaillé sur la représentation et le stockage des événements (Gehani, Jagadish et al. 1992; Claramunt and Thériault 1995; Motakis and Zaniolo 1995; Worboys 2001; Worboys and Hornsby 2004; Worboys 2005; Galton 2007). Dans ce type d'approche, l'information enregistrée ne fait plus l'état du monde entre deux instants, mais enregistre bien la transformation ou le lien qui peut être fait entre ses deux états du monde. Prenons comme exemple l'ensemble des habitations d'une rue. Deux de ces maisons sont repeintes afin de changer de couleur de façade. Une modélisation événementielle enregistrerait l'action de peindre les bâtiments et mettrait cette action en relation avec des objets bâtiments particuliers (ceux qui sont repeints). Dans une modélisation basée sur des états, l'action ne serait pas stockée en elle-même, mais bien les deux états des bâtiments avant et après peinture. L'action ou l'événement seraient alors retrouvés en comparant les modifications.

5. Raisonnement spatio-temporel qualitatif identitaire

Comme nous avons pu le constater, l'identité est définie comme la relation d'une chose à elle-même. Nous avons également remarqué que l'évolution de l'identité de l'objet au cours du temps a intéressé le domaine de la philosophie comme celui de l'informatique ou de l'intelligence artificielle. Dans le cadre d'une modélisation géographique, le suivi de l'identité dans le temps fait également partie intégrante des sujets de recherche actuels.

A. Identity Based Change

Le modèle de l'Identity Based Change destiné à suivre l'identité d'objets géographiques et d'inférer de nouvelles connaissances sur l'évolution d'objets a été proposé par Hornsby (Hornsby and Egenhofer 2000). Comme brièvement présenté auparavant, ce modèle propose une taxonomie des différents changements possibles d'un point de vue identitaire d'un objet géographique. Le fait de focaliser les différents changements à des objets possédant une extension spatiale induit des relations particulières qui ne seraient pas nécessairement gérées dans un modèle a-spatial. Ils basent leur travaux sur ceux de Claramunt (Claramunt and Thériault 1995; Claramunt and Thériault 1996; Claramunt, Thériault et al. 1997) qui définissent différents événements pouvant se produire dans un contexte spatio-temporel. Il s'agit notamment de l'apparition, la disparition, la production ou la transmission d'entités. Pour aller compléter ce jeu d'événements identitaires, ils définissent l'« *identity state of objets* » (l'état d'identité d'un objet). Dans les différents changements possibles, les auteurs suivent uniquement l'identité des objets qui leur sert à prouver l'existence ou la non-existence d'un objet dans le temps. Ils justifient l'utilisation de l'identité par le fait que, même si des changements spatiaux se produisent sur un objet, celui-ci ne change pas d'identité et que par

conséquent il est possible de suivre son évolution en se concentrant sur celle-ci. Afin de rendre accessibles visuellement les différents changements, ils proposent enfin le « *change description langage* » (langage de description du changement) qui, sur base de primitives visuelles, décrit le changement d'un objet.

Dans cette recherche, les auteurs s'interrogent sur la non-existence d'un objet. Ils raffinent quelque peu le concept en considérant des objets non-existants avec une histoire ou sans. Dans ce cas, le terme histoire renvoie à une existence antérieure de l'objet avec la même identité. Un objet sans histoire serait alors un objet n'ayant pas existé précédemment (Figure II-15). La transition entre plusieurs états d'identités est représentée par une flèche reliant les différents états. La notion de précédence temporelle est quant à elle symbolisée par le sens de la flèche.

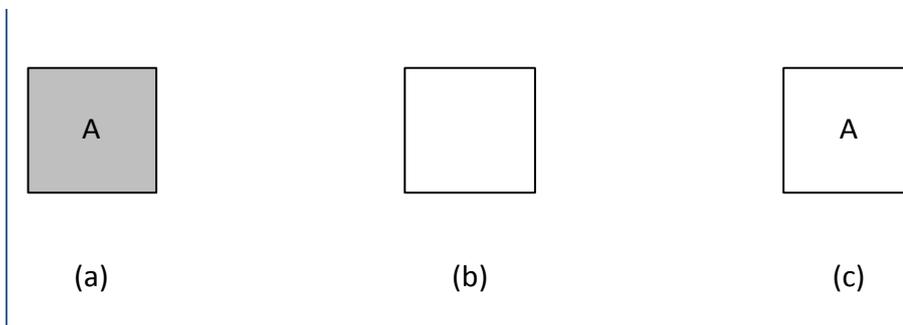


Figure II-15 : Représentation des trois états spatio-temporels proposés par Hornsby et Egenhofer. Ces trois composants de base sont : (a) l'objet existe, (b) un objet qui n'existe pas et qui ne possède pas d'histoire, (c) un objet qui n'existe pas mais qui a une histoire, existant précédemment avec l'identité de l'objet A. Représentation issue de (Hornsby and Egenhofer 2000).

Les transitions d'existence possibles entre un même objet sont alors finies et composent un ensemble de 9 changements possibles. Ils sont présentés à la Figure II-16.

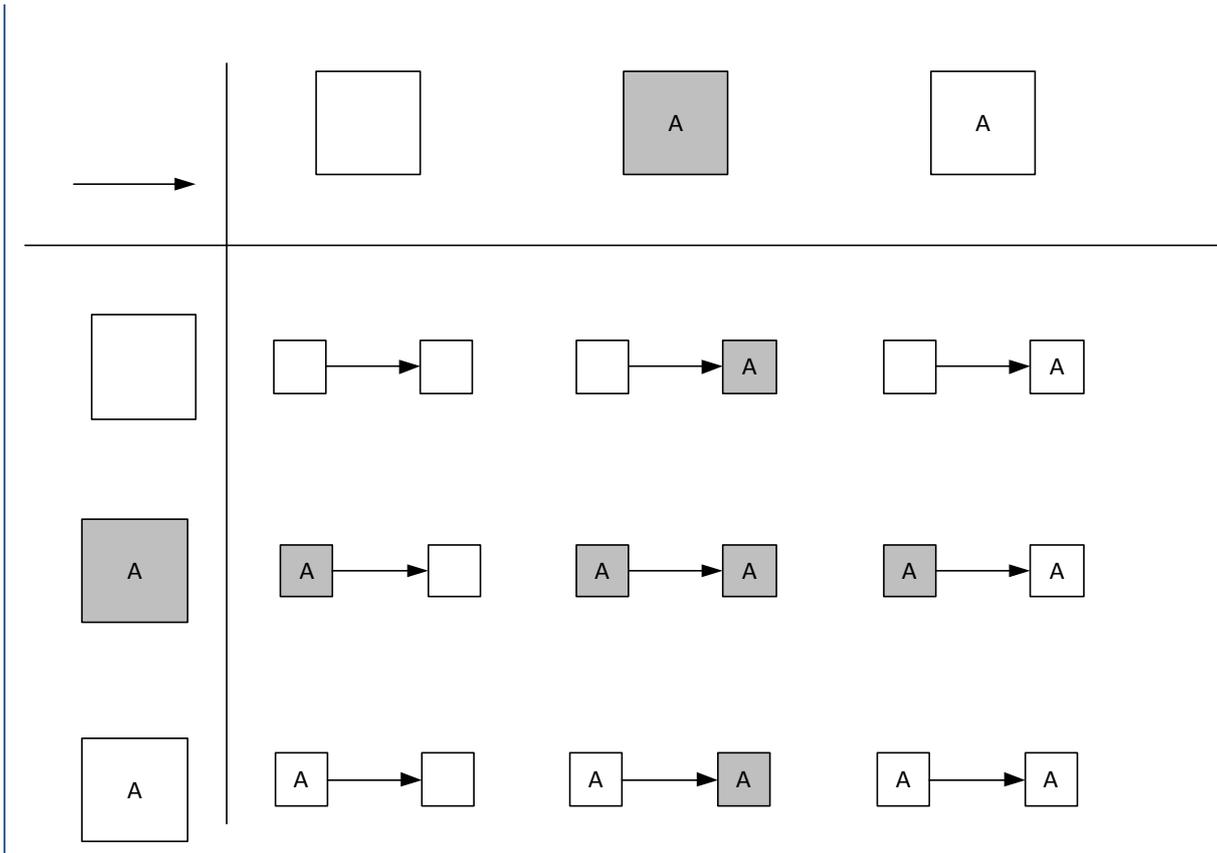


Figure II-16 Représentation des 9 changements d'état possibles d'un objet selon le formalisme du CDL de Hornsby et Egenhofer (Hornsby and Egenhofer 2000). Les 9 changements sont respectivement : la continuité de non-existence sans histoire, la création, le souvenir, la destruction, la continuité de l'existence, l'élimination, l'oubli, la réincarnation, la continuité de la non-existence avec histoire.

Le modèle permet également la prise en compte de deux objets. Dans ce cas, la flèche d'action concerne deux identités. Elle permet la modélisation de concepts comme la génération d'un objet à partir d'un autre, ou la division d'un objet en plusieurs ayant une nouvelle identité. Cette formalisation autorise la description visuelle de tout un champ de changements relatifs à l'identité et l'existence d'objets. Nous pensons cependant que les auteurs remarquent une certaine incomplétude de leur formalisation. En effet, le fait de proposer un objet non-existant sans histoire revient à considérer un objet sans identité qu'il est quand même souhaitable de modéliser. Ceci impliquerait en fait une infinité d'objets qui n'existent pas encore et dont nous ne soupçonnons pas encore l'existence. De plus, certaines transitions successives entre des états de non-existence vers des états d'existence et de non-existence suggèrent une étude plus approfondie des possibilités de changement qui pourraient se produire pour un objet. Finalement, bien que clairement expliqué et bien que le langage visuel permette une prise en main très rapide, notamment pour toute une série d'inférences

simples, le manque de formalisation de ce modèle le rend difficile à implémenter et à être considéré comme « *exact* ».

B. L'évolution de l'identité dans un environnement virtuel

L'évolution et la définition de l'identité d'objets sont également traitées dans le cas d'une modélisation d'environnements virtuels. Bien que certaines contraintes relatives à une réalité physique ne soient pas toujours nécessaires dans ces approches, nous soulignons les travaux de Campos (Campos, Hornsby et al. 2003) qui utilisent une définition intéressante de l'identité des objets géographiques pris en compte. Leur modèle, servant à la représentation d'informations notamment historiques, permet la représentation simultanée dans un environnement informatique d'information existant conjointement avec des objets n'existant plus. Le but de cette représentation est de permettre à l'utilisateur une analyse des caractéristiques de certains objets géographiques en fonction d'objets plus anciens.

Campos dresse une taxonomie de l'état des objets qui interviennent dans une modélisation dans un environnement virtuel. Il propose de croiser deux concepts orthogonaux qui sont l'existence et la visibilité. Pour lui, la visibilité d'un objet ou non est, dans les limites de son cadre de modélisation, indépendante d'une existence préalable de l'objet. En effet, n'étant pas limité à une réalité physique du monde qu'il modélise, rien de l'empêche de fixer ce postulat de départ. Il propose le tableau présenté en Figure II-17. Sa taxonomie propose une interprétation en langage naturel des différents états possibles. Il différencie l'acteur de l'espion comme étant deux objets actifs dans la modélisation, mais le premier étant visible et le second ne l'étant pas. La scène et le camouflage sont deux éléments existants mais non actifs, il s'agit typiquement de l'environnement statique dans lequel évoluent les objets. Le camouflage quant à lui n'a pas de représentation graphique, ou alors il s'agit d'objets qui sont volontairement masqués par l'utilisateur afin de permettre une meilleure interprétation des objets restants. La section des objets non-existants reprend les fantômes comme objets actifs et visibles et les fables comme objets actifs et non visibles. Finalement, les mirages et les mythes sont des éléments inactifs respectivement visibles et invisibles. Notons cependant que la notion d'existence et de non existence est surtout basée sur un choix posé par l'utilisateur afin de l'aider dans une visualisation. Bien que pouvant se baser sur une donnée relative à l'existence réelle du phénomène, rien n'empêche de la représenter alors qu'elle n'existe plus au moment de l'analyse.

		Visible	Invisible
Existent	Active	<i>actor</i>	<i>spy</i>
	Inactive	<i>scenery</i>	<i>camouflage</i>
Non- existant	Active	<i>ghost</i>	<i>fable</i>
	Inactive	<i>mirage</i>	<i>myth</i>

Figure II-17 Taxonomie des différents objets tel qu'il est possible de les représenter dans un environnement virtuel selon Campos (Campos, Hornsby et al. 2003). Il considère l'existence et la visibilité comme des concepts orthogonaux, ce qui lui permet de les croiser afin d'obtenir 8 états possibles : l'acteur, l'espion, la scène, le camouflage, le fantôme, la fable, le mirage et le mythe.

Une liste d'opérateurs permettant le passage d'un état à un autre est également proposée, ceux-ci représentant tous les passages possibles. Toutes les combinaisons de changement d'état y sont possibles. Le temps de ce modèle est géré de manière linéaire et, bien que les auteurs proposent de le diriger, le prédicat d'ordonnement n'est pas nécessaire dans cet environnement virtuel. L'histoire spatio-temporelle est enregistrée comme la succession des différents états possibles. Une action ou un événement sont quant à eux gérés comme l'intervalle de temps durant lequel une série de changements relatifs à des objets actifs apparaît (Figure II-18).

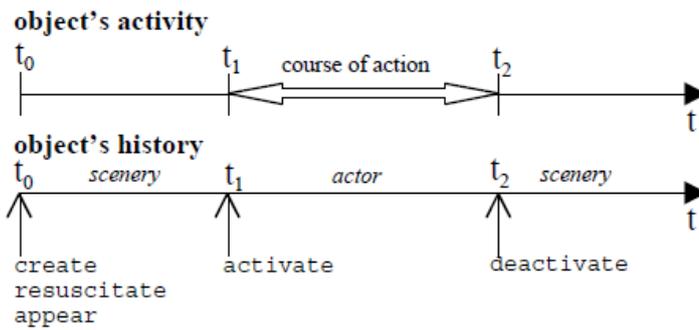


Figure II-18 Représentation de l'activité d'un objet en concurrence avec la représentation de son histoire. La phase d'activité de l'objet est considérée comme l'intervalle de temps entre son activation et sa désactivation. L'action ou l'événement a lieu entre les instants t_1 et t_2 . Cette figure est issue de (Campos, Hornsby et al. 2003)

On voit directement le grand intérêt que peut avoir ce type de modélisation dans la recherche de données archéologiques ou des projections environnementales. Ce modèle récent met également en évidence les questionnements relatifs à l'identité et à l'élargissement nécessaire des concepts qui y sont associés. Les auteurs gèrent en effet deux types d'objets actifs et non-actifs. Nous pourrions poser la question de l'intérêt de modéliser des objets non-existants et non-actifs à un instant donné. Aucune information n'est donnée quant à la future existence de tels objets. Dans ce cas, comment est-il possible de gérer un objet qui n'existe pas encore et qui n'existera pas ? Une infinité d'objets inconnus sont alors à prendre en compte.

6. Raisonnement spatio-temporel qualitatif

Possédant toutes les briques nécessaires à l'explication des modèles de raisonnements spatio-temporels, nous pouvons dès à présent présenter une sélection des quelques recherches ayant inspiré la nôtre. Le domaine du raisonnement spatio-temporel est en effet assez conséquent. Du moment où l'on considère qu'effectuer du raisonnement spatio-temporel est l'étude de l'évolution d'une relation spatiale, la quasi-totalité des modèles de relations spatiales peuvent prétendre avoir leur corolaire en modélisation spatio-temporelle (Wolter and Zakharyashev 2000; Hazarika 2005). Bien que ceci soit vrai, la prise en compte de l'évolution de l'espace au cours du temps est plus qu'une simple addition de ces deux concepts (Kontchakov, Kurucz et al. 2007). La définition d'une nouvelle méréologie sur base de concepts spatio-temporels est bien souvent plus riche et apporte des solutions répondant plus aux critères des utilisateurs (Muller 1999). Ces deux grandes approches sont utilisées comme division du reste de ce chapitre.

A. Combinaisons de logiques spatiales et temporelles

i. Wolter Zakharyschev

Wolter et Zakharyshev combinent le modèle du RCC-8 avec la logique temporelle propositionnelle (PTL) (Wolter and Zakharyashev 2000; Wolter and Zakharyashev 2001). Bien que les auteurs admettent qu'une combinaison avec le modèle temporel des relations d'Allen est conceptuellement plus proche du RCC-8 par l'approche d'intervalle de temps et de région comme primitive temporelle et spatiale, ils montrent par quelques exemples bien choisis que cette combinaison a tout son sens. La temporalisation s'effectue en considérant plusieurs opérateurs temporels Since (depuis) : S , Until (jusqu'à) : \cup , The next moment (vrai à l'instant suivant) O , Always in the future (Toujours vrai dans le futur) : \square^+ , some time in the future (Vrai à un instant dans le futur) : \diamond^+ . L'exemple suivant montre une série de prédicats combinant les deux algèbres. Les auteurs proposent plusieurs degrés de sophistication de leur formalisme. Le langage ST_0 est cependant suffisant pour permettre la représentation de la continuité spatiale du changement. \emptyset

$$\begin{aligned} &\square^+(DC(X,Y) \rightarrow O(DC(X,Y) \vee EC(X,Y))), \\ &\square^+(EC(X,Y) \rightarrow O(DC(X,Y) \vee EC(X,Y) \vee PO(X,Y))), \\ &\square^+(PO(X,Y) \rightarrow O(EC(X,Y) \vee PO(X,Y) \vee TPP(X,Y) \vee EQ(X,Y) \vee TPP^{-1}(X,Y))), \dots \end{aligned} \quad (2.38)$$

Le premier prédicat de cet exemple exprime qu'« il sera toujours vrai dans le futur que », si la relation actuelle est DC entre les objets X et Y, alors qu'à l'instant suivant les seules relations possibles sont DC ou EC. Il en est de même pour la seconde proposition qui exprime que, si la relation actuelle est EC, alors les seules relations suivantes possibles sont DC, EC ou PO. Ces prédicats sont en quelque sorte une axiomatisation des diagrammes conceptuels de voisinages (Freksa 1991) qui représentent de manière graphique les différentes transitions qu'il est possible d'avoir entre relations spatiales afin de respecter un critère de continuité.

ii. Spatio-temporal constraint calculus – SCC

Faisant suite à une première tentative de temporalisation du modèle RCC-8 proposée par Bennet (Bennett, Cohn et al. 2002), la première combinaison du RCC-8 et du modèle des intervalles temporels de Allen a été proposée par Gerevini et Nebel (Gerevini and Nebel 2002). Plus qu'une simple adaptation des formalismes, les auteurs ont effectué une analyse de la complexité de raisonnement de la combinaison des modèles et ont mis en évidence que les contraintes associées à ces deux modèles possédaient une solution NP-complète¹⁵. Sur base

¹⁵ Dans la théorie de la complexité, un problème NP-Complet est un problème dont la complexité peut être ramenée à un temps de calcul polynomial. Cela signifie que la complexité de ce modèle n'entraîne pas une impossibilité à le résoudre.

d'ensemble de contraintes à satisfaire d'un point de vue spatial et d'un point de vue temporel, les auteurs proposent une combinaison des deux modèles comme suit :

$$\begin{aligned} I: (X \{DC, EC\} Y), \quad I: (Y \{TPP\} Z), \\ J: (X \{PO\} Y), \quad J: (Y \{DC\} Z) \end{aligned} \quad (2.39)$$

Cette formulation signifie que, durant l'intervalle de temps I, les régions X et Y sont soit non connectées soit extérieurement connectées. Il s'agit là d'une représentation d'une contrainte spatiale sur les deux objets. Durant le même intervalle de temps I, l'objet est une partie propre de l'objet Z. De même, durant l'intervalle de temps J, les configurations spatiales sont différentes. L'objet X recouvre partiellement l'objet Y, et l'objet Y n'est plus connecté à l'objet Z. En formulant à présent une contrainte temporelle sur les deux intervalles, une inférence spatio-temporelle pourra être effectuée. Considérant que les intervalles I et J partagent une relation de rencontre :

$$I m J \quad (2.40)$$

Ce jeu de contraintes forme ce que les auteurs appellent le STCC (« *Spatio-Temporal Constraint Calculus* »). Cependant, l'analyse de ce problème révèle une certaine incohérence. En effet, pour autant que l'on considère une transition continue, il n'est pas possible de passer directement d'un état de partie propre à un état de connexion sans passer préalablement par un état de recouvrement ($Y \{PO\} Z$) et un état de connexion extérieure ($Y \{EC\} Z$). Ceci implique qu'il doit exister des intervalles de temps entre les intervalles I et J. Ces contraintes de transition continue et de passages par différents états seront plus expliquées par la suite lorsque nous aborderons les notions de graphe de voisinage et de théorie de dominance. Bien que ce modèle soit uniquement basé sur une axiomatisation temporelle en intervalles, il sera possible de montrer que la relation de connexion extérieure peut être instantanée et située à la rencontre des deux intervalles de temps I et J (Galton 2001).

iii. PLTL et l'algèbre des rectangles

Balbani et Condotta (Balbani and Condotta 2001; Balbani and Condotta 2002) proposent de combiner le langage de proposition temporelle avec le modèle de représentation spatiale de l'algèbre des rectangles. L'algèbre des rectangles est une extension du calcul sur les intervalles temporels d'Allen étendus à l'espace. Dans ce formalisme, deux axes orthogonaux sont pris en compte, et les objets modélisés sont des rectangles. Les bases et hauteurs des rectangles sont parallèles aux deux axes. La projection des rectangles est étudiée sur chacun des axes et une relation d'intervalle y est prise en compte. Une paire de relation, i.e. une relation sur chaque axe, qualifie la relation entretenue par deux rectangles. Comme dans le cas des 13 relations temporelles, l'ensemble des relations définies par l'algèbre des rectangles est un ensemble « *Jointly exhaustive and pairwise disjoint* » (JEPD), ce qui signifie que deux rectangles ne peuvent partager qu'un seul type de relation.

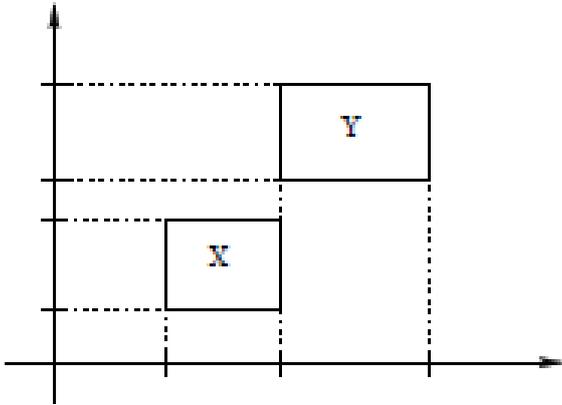


Figure II-19 Illustration de la relation $\langle m, b \rangle$ (meet, before) selon l'algèbre des rectangles. La relation « meet » est obtenue en effectuant la projection des rectangles x et y sur l'axe horizontal et la relation « before » est obtenue via une projection sur l'axe vertical. L'ensemble $\langle m, b \rangle$ qualifie une et une seule relation qualitative possible entre les objets x et y . La représentation est issue de Balbiani (Balbiani and Condotta 2001).

La temporalisation des relations de l'algèbre des rectangles se fait respectant l'axiomatisation suivante :

$$f \triangleq \{P(O^m x, O^n y), \neg f_1, f_1 \vee f_2, f_1 \cup f_2\} \quad (2.41)$$

Où P est une relation de l'algèbre des rectangles, f_1 et f_2 sont deux fonctions, m et n sont deux entiers positifs et x, y appartiennent à un ensemble de variables individuelles. D'autres opérateurs de la logique propositionnelle temporelle peuvent être utilisés tels que Ff, Gf symbolisant respectivement que f sera vraie à un instant futur et que f sera toujours vraie aux instants futurs.

iv. An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions

Claramunt et Jiang proposent un jeu de relations spatio-temporelles sur base de l'étude de régions évoluant dans le temps (Claramunt and Jiang 2001). Elle combine les relations topologiques entre régions avec les relations entre intervalles de temps convexes. Leur modèle s'appuie sur une représentation de la logique des intervalles de Allen en matrice d'intersection. Ils composent une table croisant les instants de départ et de fin des intervalles

en y attribuant une valeur qualitative en fonction de leur position temporelle relative. La règle régissant la matrice est la suivante :

$$Val(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } row(i) > col(j) \\ 0 & \text{si } row(i) = col(j) \\ -1 & \text{si } row(i) < col(j) \end{cases} \quad (2.42)$$

Cette notation leur permet de représenter les relations de Allen de la manière suivante :

$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
<i>equal</i>	<i>before</i>	<i>after</i>	<i>meets</i>	<i>met</i>
$\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$
<i>overlaps</i>	<i>overlapped</i>	<i>during</i>	<i>contains</i>	<i>starts</i>
	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	
	<i>started</i>	<i>finishes</i>	<i>finished</i>	

Figure II-20 Symbolisation des relations sur les intervalles temporels de Allen représentés de façon matricielle. La règle de composition est l'utilisation d'une valeur qualitative : -1 si $i < j$, 0 si $i = j$ et 1 si $i > j$. Le schéma est issu de Claramunt et Jiang (Claramunt and Jiang 2001)

La même représentation simplifiée est également utilisée pour la représentation des 8 relations topologiques du modèle des 9 intersections de Egenhofer et Herring. La règle de composition correspond à :

$$Val(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } row(i) \cap col(j) = \neg\emptyset \\ 0 & \text{si } row(i) \cap col(j) = \emptyset \end{cases} \quad (2.43)$$

$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ <i>equal</i>	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ <i>touch</i>	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ <i>in</i>	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ <i>contain</i>
$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ <i>cover</i>	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ <i>covered</i>	$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ <i>overlap</i>	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ <i>disjoint</i>

Figure II-21 Expression des 8 relations topologiques du modèle des 9 intersections sur base de la règle qualitative suivante : 1 si l'intersection entre la ligne de i et la colonne de j est non vide, 0 si l'intersection entre la ligne de i et la colonne de j est vide. Les lignes et colonnes représentent respectivement l'intérieur et la frontière des deux objets en présence.

Le résultat permet de modéliser les 8 relations topologiques via une matrice 4x4 comme représenté à la Figure II-21. Il s'agit en fait d'une sélection des premières et deuxième lignes et colonnes de la matrice des 9 intersections. En se basant sur ces nouvelles représentations, les auteurs proposent une symbolisation de leurs relations spatio-temporelles dans un « *espace temporel* » à trois dimensions. L'espace temporel est une représentation croisée d'une spatialité avec une temporalité. Nous reviendrons plus en détail par la suite sur ce genre de représentation. Retenons uniquement que ces représentations permettent de visualiser spatialement des histoires spatio-temporelles. Ce genre de représentation ne peut présenter graphiquement que des espaces temporels à deux dimensions spatiales et une dimension temporelle. Le résultat de leur recherche est le suivant :

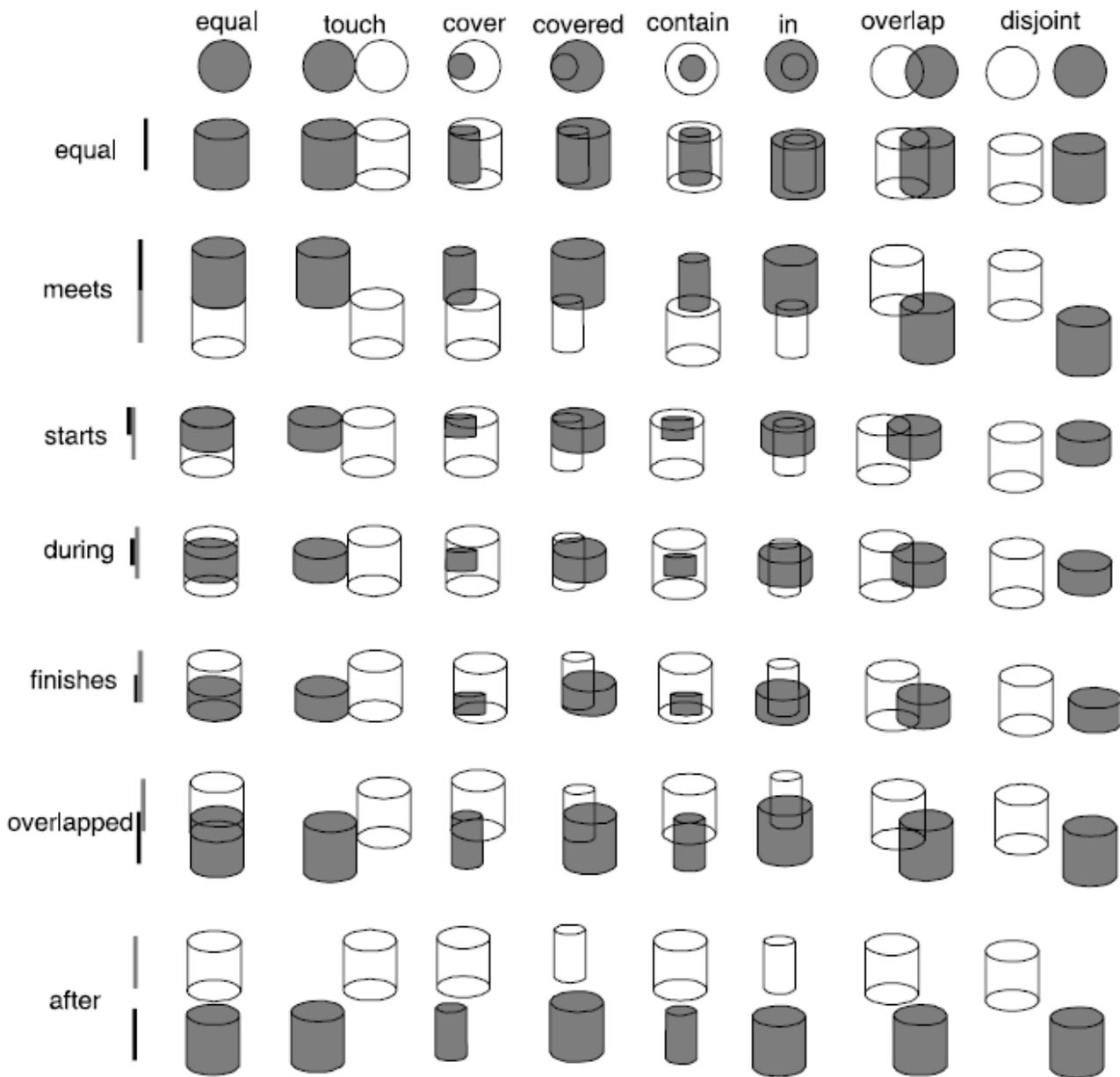


Figure II-22 Représentation des relations spatio-temporelles de Claramunt et Jiang dans un espace temporel à trois dimensions. Il s'agit du croisement des relations des intervalles temporels de Allen avec le modèle des 9-intersections de Egenhofer. La figure est issue de (Claramunt and Jiang 2001).

Bien que simple à concevoir, l'intérêt d'un tel modèle est qu'il est fondé sur deux principes admis comme référence en modélisation spatiale et temporelle, la plupart des systèmes actuels gérant ce type de relations. De plus, les auteurs étudient les transitions et semi-transitions entre les différentes relations qu'ils définissent. Ceci amène à la création de diagramme conceptuel de voisinage et une étude de l'évolution de ces relations spatio-

temporelles. L'exemple ci-après schématise les transitions possibles d'obtenir depuis l'état {finishes, touch}. Leur représentation des transitions se fait sur l'étude des relations entre les formes tridimensionnelles dans l'espace-temps, entre les relations temporelles et les relations spatiales uniquement. Une semi-transition n'aura lieu que dans un seul de ces trois domaines.

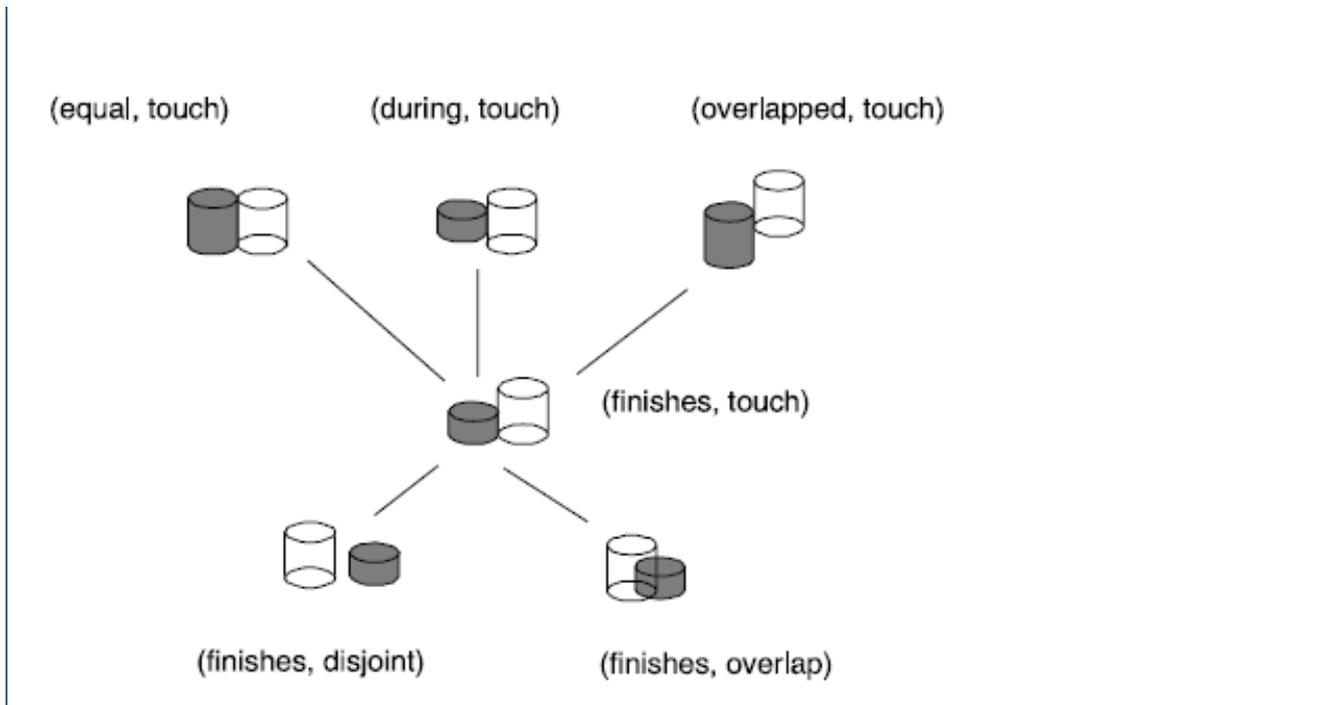


Figure II-23 Diagramme conceptuel de voisinage des transitions possibles depuis la relation spatio-temporelle (finishes, touch) selon le modèle de Claramunt et Jiang. Les relations sont d'abord données d'un point de vue temporel puis spatial. L'étude de ces transitions permet la définition de contraintes afin de vérifier l'intégrité d'un schéma de transition entre relations.

B. Nouvelles méréologies spatio-temporelles

i. Raisonnement spatial qualitatif sur le mouvement

Muller a établi, sur base des travaux de Asher et Vieu (Asher and Vieu 1995), une méréotopologie des différentes connexions possibles dans des histoires spatio-temporelles d'un point de vue topologique. La force de son modèle réside dans le fait qu'il ne combine pas a priori de logiques spatiales et temporelles afin de construire leur environnement de raisonnement. Il part de l'axiomatisation proposée par Vieu en ne gardant que les postulats nécessaires à la représentation de l'espace-temps. Il considère également la relation de connexion de Clarke qui est à la base du RCC-8. Il ajoute néanmoins une série de contraintes sur la représentation de l'espace-temps afin de rester cohérent avec une réalité physique du

monde modélisé. Sur base de cette axiomatisation, il est à même de définir toute une classe d'interactions entre les histoires spatio-temporelles d'objets évoluant dans le temps et dans l'espace. Dans ce cas, le raisonnement spatial qualitatif peut même être perçu comme une simplification de leur modèle via l'analyse d'une « tranche » temporelle.

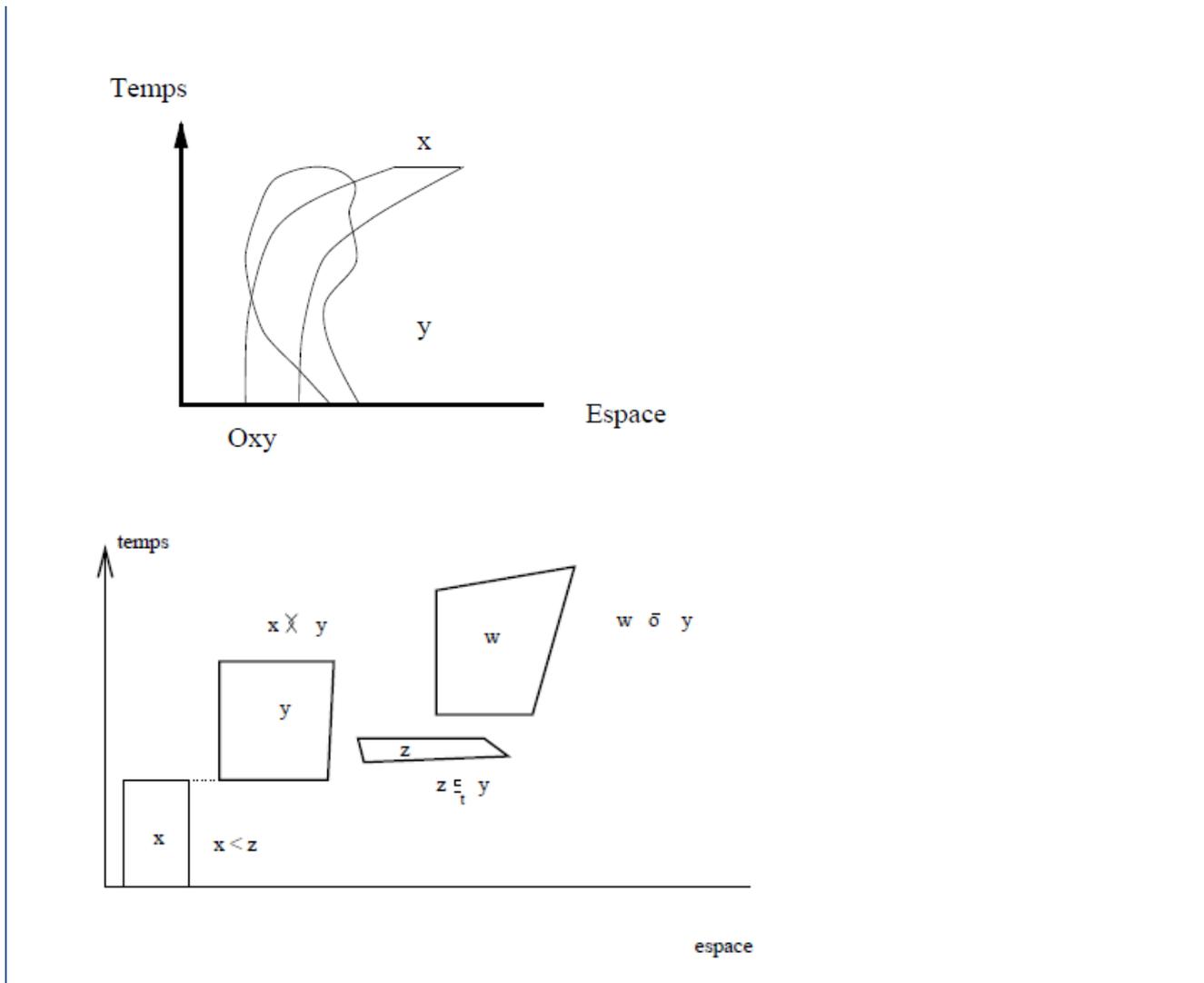


Figure II-24 Partie haute : Interprétation de la relation de recouvrement entre les histoires spatio-temporelles des objets x et y . La définition de la méreotopologie conduit au même 8 relations que le RCC entre régions mais pour des histoires spatio-temporelles.
Partie basse : Relations de connexions temporelles dérivées de la relation de connexion de Clarke proposée par Muller. Les différentes relations sont $x < z$ (x précède z), $x \ll y$ (x est connecté à y), $w \bar{\delta} y$ (w recouvre partiellement y), $z \sqsubseteq_t y$ (z est inclus temporellement dans y). Ces figures sont issues de Muller (Muller 1999)

Les propositions conduisent au même 8 relations que le RCC. Ceci est tout à fait logique, le formalisme présenté par Muller étant également fondé sur la relation de connexion de Clarke. Cependant, les relations sont ici définies non pas pour des régions spatiales, mais bien pour des entités spatio-temporelles. Ceci permet une utilisation formelle d'une topologie dans l'espace-temps. Une autre possibilité serait l'utilisation d'un espace-temps primitif tel que considéré dans d'autres travaux de Muller (Muller 1998). Nous reviendrons par la suite sur ces notions d'espace-temps primitif.

ii. Un modèle relationnel du mouvement

Balbani et Farinas (Balbani and Fariñas Del Cerro 1996) bien qu'un peu en dehors de la communauté géographique pure ont également travaillé sur une représentation et une formalisation du mouvement. Ils ont travaillé sur les relations entre deux objets se déplaçant à vitesse constante. Ils formalisent dans leur modèle les propositions suivantes : « parfois, les mobiles x et u se rencontrent quelque part », « la position de rencontre entre x et u et la position de rencontre entre y et v sont égales », « le moment de rencontre entre x et u précède le moment de rencontre entre y et v » (dans cette dernière proposition, le « moment » doit être lu comme l'instant selon la formalisation présentée précédemment).

Afin de formaliser leurs propositions, ils définissent un « space-time frame » (un cadre spatio-temporel) ainsi qu'un « frame of mobiles » (cadre de mobiles). Le croisement de ceux-ci permet la représentation selon l'algèbre relationnel des déplacements d'un mobile dans un cadre spatio-temporel. Les deux cadres correspondent à :

$$\underline{S} = (S, T, L, \leq_T, in) \quad (2.44)$$

- « S » étant un ensemble non vide de positions ;
- « T » étant un ensemble non vide de moments ;
- « L » un ensemble non vide de lignes spatio-temporelles
- « \leq_T » une relation binaire de précédence sur T . $i \leq_T j$ signifie « le moment i précède ou est égal au moment j »
- « in » est une relation ternaire reliant S, T et L . Il s'agit de la relation d'incidence entre le point spatio-temporel correspondant à $S \times T$ et la ligne spatio-temporelle L . En d'autres termes, si on a $\langle A, i \rangle in x$, cela précise que le point spatio-temporel créé par le croisement de $\langle A, i \rangle$ est en coïncidence spatio-temporelle avec la ligne spatio-temporelle x .

Notons que ce modèle est très intéressant et qu'il combine à la fois une définition d'un cadre de travail spatio-temporel avec un cadre de conceptualisation du mouvement. Cependant, les mobiles considérés sont des objets adimensionnels donc ne pouvant pas avoir de déformations ou de relations topologiques entre eux. De plus, le fait de travailler sur des

objets se déplaçant à vitesse constante permet une simplification de la représentation mais celle-ci reste souvent éloignée d'une modélisation proche de la perception réelle du mouvement.

iii. *Qualitative trajectory Calculus (QTC)*

Le « *Qualitative Trajectory Calculus* » (Calcul qualitatif de trajectoires) répond en quelque sorte aux remarques que nous venons de formuler quant au modèle relationnel du mouvement. Cette théorie proposée initialement par Van de Weghe dans sa thèse (Van de Weghe 2004) a ensuite été reprise et publiée sous de nombreuses formes avec plusieurs améliorations substantielles (Van de Weghe, Cohn et al. 2006). L'idée fondamentale de leur modèle est de comparer des valeurs qualitatives de deux objets en déplacement. Plusieurs versions ou niveaux de sophistication du QTC ont été définis en fonction du nombre de variables qualitatives qui sont prises en compte. Les évolutions du QTC concernent essentiellement sa mise en forme de graphe conceptuel de voisinage (Van de Weghe, Kuijpers et al. 2005), l'étude de ses tables de compositions (Delafontaine, Bogaert et al. 2011) et de sa restriction à un réseau fixe (Van de Weghe, Cohn et al. 2004; Van de Weghe, Cohn et al. 2004; Bogaert, Van de Weghe et al. 2006; Van de Weghe, Cohn et al. 2006) soit changeant sa topologie durant l'étude (Delafontaine, Van de Weghe et al. 2008).

Comme nous l'avons vu précédemment la modélisation qualitative de l'information spatiale n'est pas une réduction qui limite la compréhension de l'information. Bien au contraire, la représentation qualitative d'un phénomène géographique est plus souvent proche de la perception que nous pouvons avoir de ce phénomène par rapport à une représentation quantitative de celui-ci. Par exemple, lorsque deux véhicules se déplacent sur une route, nous décrivons le dépassement de l'un par l'autre, par une phrase du type : « le véhicule A circule plus vite que le véhicule B ». Cette phrase décrit en fait qualitativement la vitesse relative des deux véhicules. Une description quantitative du même événement serait du type : « le véhicule A circule à 110km/h tandis que le véhicule B circule à une vitesse de 100km/h ». On constate directement que l'utilisation d'une expression qualitative et d'une expression de vitesse relative est plus proche du phénomène perçu lors d'un dépassement. C'est sur base de ce constat que Van de Weghe propose de partir afin de développer son modèle de QTC.

Le modèle part de trois prédicats représentant la relativité d'une variable par rapport à une autre. Ils sont :

$$variable\ x = \begin{cases} -\text{si } x \in]-\infty, 0[\\ 0\ \text{si } x = 0 \\ +\text{si } x \in]0, +\infty[\end{cases} \quad (2.45)$$

Ces trois prédicats signifient respectivement que la variable est plus petite que celle à laquelle elle est comparée, égale ou plus grande. Dans le cadre du premier développement du

QTC, le « *QTC Basic* » (QTC de base), trois variables sont prises en considération. Il s'agit de la distance relative d'un objet A par rapport à un objet B, de la distance relative de l'objet B par rapport à l'objet A et enfin de la vitesse relative de l'objet A par rapport à l'objet B. L'idée principale qui permet la comparaison de ces valeurs est la notion de temps qui y est associée. En effet, la comparaison des différentes positions ne se fait pas au même instant. Une valeur de QTC correspond donc à un ensemble de trois valeurs définies pour 2 objets et correspondant respectivement au déplacement d'un objet k vers un objet l à un instant t, au déplacement d'un objet l vers un objet k à un instant t et de la vitesse relative de l'objet k à un instant t par rapport à un objet l à l'instant t.

$$\begin{aligned}
 & - : k \text{ se déplace vers } l \\
 & + : k \text{ s' éloigne de } l \\
 & 0 : k \text{ est stable par rapport à } l
 \end{aligned} \tag{2.46}$$

$$\begin{aligned}
 & - : l \text{ se déplace vers } k \\
 & + : l \text{ s' éloigne de } k \\
 & 0 : l \text{ est stable par rapport à } k
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

$$\begin{aligned}
 & - : v_k | t < v_l | t \\
 & + : v_k | t > v_l | t \\
 & 0 : v_k | t = v_l | t
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

Avec $v_k | t$ qui représente la vitesse instantanée de l'objet k à l'instant t. Les équations (2.47) et (2.46) sont obtenues sur base de l'axiomatisation suivante en considérant que la notation $d(k | t^-, l | t)$ représente la distance entre les objets k et respectivement aux instants t^- et t. L'instant t^- étant l'instant directement inférieur temporellement à l'instant t :

$$\begin{aligned}
 & \exists t_1 (t_1 \prec t \wedge \forall t^- (t_1 \prec t^- \prec t \rightarrow d(k | t^-, l | t) > d(k | t, l | t))) \wedge \\
 & \exists t_2 (t \prec t_2 \wedge \forall t^+ (t \prec t^+ \prec t_2 \rightarrow d(k | t, l | t) > d(k | t^+, l | t)))
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

$$\begin{aligned}
 & \exists t_1 (t_1 \prec t \wedge \forall t^- (t_1 \prec t^- \prec t \rightarrow d(k | t^-, l | t) < d(k | t, l | t))) \wedge \\
 & \exists t_2 (t \prec t_2 \wedge \forall t^+ (t \prec t^+ \prec t_2 \rightarrow d(k | t, l | t) < d(k | t^+, l | t)))
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

L'équation (2.49) axiomatise le rapprochement de l'objet k par rapport à l'objet l (2.46), et l'équation (2.50) représente l'éloignement de l'objet l (2.46). Afin d'alléger la présentation nous ne détaillerons pas tous les axiomes décrivant la stabilité d'un objet k par rapport à un objet l. Nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Van de Weghe, Cohn et al. 2006) pour l'axiomatisation complète. Notons cependant que, pour tous les autres cas, la valeur (2.46) est nulle. Le déplacement peut être envisagé dans un espace unidimensionnel mais également à

deux dimensions. Une représentation des différents mouvements possibles dans un espace à une dimension est proposée à la Figure II-25. Comme on peut le constater, certaines possibilités n'ont pas d'interprétation dans le monde réel. En effet, il n'est pas envisageable d'avoir un objet a, qui se rapproche d'un objet b qui lui est stable par rapport à un objet a, tout en ayant une vitesse de l'objet b plus grande que celle de l'objet a. Notons que, dans le cadre d'une représentation dans un espace à deux dimensions, des cas particuliers peuvent se produire. Il s'agit par exemple du déplacement circulaire ou en spirale d'un objet par rapport à un autre. Dans ces cas, il peut y avoir des vitesses de déplacements relatives qui varient ou sont constantes alors que les distances ne varient pas.

1a --- ○ — ○	1b --0 ○ — ○	1c --+ ○ — ○
2a -0-	2b -00	2c -0+ ○ ●
3a -+- ○ ○	3b -+0 ○ ○	3c -++ ○ ○
4a 0-- ● — ○	4b 0-0	4c 0-+
5a 00-	5b 000 ● ●	5c 00+
6a 0+- ● ○	6b 0+0	6c 0++
7a +-- ○ — ○	7b +-0 ○ — ○	7c +-+ ○ — ○
8a +0-	8b +00	8c +0+ ○ ●
9a +++ ○ ○	9b ++0 ○ ○	9c +++ ○ ○

Figure II-25 Interprétation spatiale des cas possibles du QTC-B dans un espace 1D. Les trois valeurs qualitatives représentent respectivement le déplacement du premier objet par rapport au second, le déplacement du second par rapport au premier et la vitesse relative du premier par rapport au second. La schéma est issu de (Van de Weghe, Cohn et al. 2006).

Les auteurs ont par la suite contraint le déplacement de leurs objets à un réseau. En effet, l'idée d'un tel modèle est surtout de pouvoir représenter des mobiles conceptualisés en points. Une des applications les plus intéressantes d'un tel modèle est dès lors la représentation d'agents sur un réseau. Notons que, dans ce cadre, certains points d'inflexion apparaissent sur le réseau. Il s'agit en fait de positions particulières pour lesquelles on observe un changement de valeur de QTC dans le temps. Les autres évolutions du QTC prennent en compte notamment les accélérations relatives des deux mobiles. Bien que ce modèle soit très

précis quant à la description du mouvement de deux objets, son cadre d'application doit au préalable être défini. Le modèle ne s'applique qu'à des objets considérés comme ponctuels. De plus, ce modèle ne permet pas de gérer le fait que deux points se situent spatialement au même endroit. Initialement conçu pour une recherche et une détection de collisions, cette limitation peut entraîner des limitations importantes pour son application dans d'autres cadres. Enfin, nous noterons que ce modèle considère des objets dont la phase d'existence temporelle est continue ; il ne peut qualifier de relations avec un objet qui n'aurait pas d'extension spatiale durant un intervalle de temps. Finalement, remarquons que ce formalisme manque, aux dires des auteurs, d'une implémentation afin de le mettre en œuvre pour des applications réelles.

iv. Représentation relative de trajectoires

Pour terminer notre panorama des modèles de raisonnement spatio-temporels, nous nous focaliserons sur un modèle de représentation relative de trajectoires spatio-temporelles. Ce modèle a été initialement conçu pour la représentation de navires en mouvement afin de prévenir d'éventuelles collisions. Dans un cadre, comme un milieu maritime, les points de repères ne sont pas nombreux. L'utilisation d'un système de référence absolu perd dès lors de son intérêt. Ce modèle proposé par Noyon (Noyon, Claramunt et al. 2007) utilise le point de vue de l'observateur comme référence pour qualifier de manière relative le déplacement de navires. D'une manière similaire au QTC dont ce modèle se rapproche par l'approche ontologique, les auteurs utilisent des indicateurs qualitatifs pour représenter les positions relatives ainsi que les vitesses des objets en mouvement. L'utilité d'une telle représentation doit être vue dans le fait qu'elle peut aider à détecter rapidement de possibles intersections entre histoires spatio-temporelles. Le déplacement de deux objets se dirigeant l'un vers l'autre représenté uniquement à l'aide d'histoires spatio-temporelles telles des lignes ne fournit pas d'information quant à la vitesse relative des deux objets. L'utilisation et la prise en compte des vitesses relatives permet d'identifier de manière plus sûre les possibles intersections. Ce modèle se veut donc prédictif de l'information spatio-temporelle. Il se base sur deux prédicats et utilise les relations topologies du modèle des 9 intersections. Le point duquel est effectué l'observation est appelé le point de référence, et l'objet observé la cible. Notons que, dans ce formalisme, la cible peut être soit un point, une ligne ou un polygone sans trous.

- Dans le cas d'une cible polygonale B :

$$p_{AB} = \begin{cases} +\sqrt{(x_A - x_{B'})^2 + (y_A - y_{B'})^2} & \text{ssi } B \text{ est disjoint de } A \\ 0 & \text{ssi } B \text{ est en contact avec } A \\ -\sqrt{(x_A - x_{B''})^2 + (y_A - y_{B''})^2} & \text{ssi } B \text{ contient } A \end{cases} \quad (2.51)$$

Avec $(x_{B'}, y_{B'})$, les coordonnées du point B' du polygone B qui sont les plus proches du point de référence A et $(x_{B''}, y_{B''})$ les coordonnées du point B'' de la frontière δB du polygone B le plus proche du point de référence A.

- Dans le cas d'une cible linéaire B :

$$p_{AB} = \begin{cases} +\sqrt{(x_A - x_{B'})^2 + (y_A - y_{B'})^2} & \text{ssi } B \text{ est disjoint de } A \\ 0 & \text{ssi } B \text{ est en contact avec } A \end{cases} \quad (2.52)$$

Avec $(x_{B'}, y_{B'})$, les coordonnées du point B' de la droite B qui sont les plus proches du point de référence A.

- Dans le cas d'une cible ponctuelle :

$$p_{AB} = \begin{cases} +\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} & \text{ssi } B \text{ est disjoint de } A \\ 0 & \text{ssi } B \text{ est égal à } A \end{cases} \quad (2.53)$$

Avec (x_B, y_B) les coordonnées du point cible B.

Par convention et afin de correspondre au jeu de valeurs qualitatives $\{-, 0, +\}$, il est convenu les notations suivantes :

- Si et seulement si B contient A, alors :

$$A(p^-)B \quad (2.54)$$

- Si et seulement si B rencontre A lorsque B est un polygone ou une ligne, et B est égal à A si B est un point, alors :

$$A(p^0)B \quad (2.55)$$

- Si et seulement si B est disjoint de A, alors :

$$A(p^+)B \quad (2.56)$$

Les équations (2.54) à (2.56) représentent les trois primitives utilisées dans la suite du modèle auxquelles viennent s'ajouter les informations relatives à la vitesse. Notons que la vitesse est prise selon la formulation traditionnelle de la norme vectorielle du vecteur de vitesse :

$$\begin{aligned}
 A(v^-)B \text{ ssi } v_{AB}(t) < 0 \\
 A(v^0)B \text{ ssi } v_{AB}(t) = 0 \\
 A(v^+)B \text{ ssi } v_{AB}(t) > 0
 \end{aligned}
 \tag{2.57}$$

Finalement, la combinaison de ces deux indicateurs qualitatifs permet de représenter l'ensemble des configurations possibles entre les deux objets analysés. Avec respectivement A comme référence et B comme cible, le résultat est présenté Figure II-25.

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

Figure II-26 Table symbolisant les configurations primitives de trajectoires entre deux objets A et B. L'objet A est considéré comme référence et l'objet B comme cible. Les trois valeurs qualitatives v^-, v^0, v^+ représentent qualitativement la vitesse relative entre les deux objets et les valeurs qualitatives p^-, p^0, p^+ les distances relatives entre les deux objets. Cette représentation est issue de (Noyon, Claramunt et al. 2007)

Un autre intérêt de cette recherche est la structuration de la formalisation qu'ont utilisée les auteurs. Afin de rendre leur modèle utilisable par un raisonnement spatio-temporel, ils ont défini les étapes principales à la réalisation d'un réel « *calculus* ». Pour ce faire, et comme remarqué dans (Balbiani and Condotta 2001), ils proposent d'une part un graphe conceptuel de voisinage (Freksa 1991), une justification de celui-ci (Galton 2001) ainsi que, d'autre part, des tables de composition (Egenhofer 1994) aidant à l'inférence de nouvelles connaissances. Dans une volonté de concision, nous ne présenterons pas tous ces résultats ici. Le lecteur intéressé peut se référer à la thèse de Noyon (Noyon 2007).

C. Approches complémentaires

Comme il n'est pas possible pour nous d'aborder l'ensemble des modèles de raisonnement spatio-temporel que nous avons eu l'occasion de remarquer dans la littérature, nous terminons cette section avec quelques références supplémentaires afin de guider le lecteur aventureux vers d'autres voies. Nous avons volontairement sélectionné les modèles présentés du fait de l'influence qu'ils auront sur la suite de nos travaux. Bien qu'il ne soit peut-être pas les plus représentatifs de l'ensemble de la recherche dans le domaine du spatio-temporel, le jeu de modèles présentés a le mérite de balayer les différentes approches possibles quant à la formalisation du domaine ainsi que de s'étendre sur une grande période (ou intervalle temporel) de recherche afin de montrer l'évolution du domaine depuis la dernière décennie.

Une des références dans la modélisation du temps en géographie est certainement Hägerstrand (Hägerstrand 1967) qui dès la fin des années 60 imagine un concept de représentation de l'espace-temps via un prisme et limite la vision d'un objet et ses déplacements à ce qu'il peut parcourir durant un temps donné. Bien que plus connu pour ses graphes de voisinages, Freksa par ses modèles de raisonnement spatial a également proposé des réflexions quant au déplacement d'un objet par rapport à un autre. Son Double-Cross calculus en est un exemple parlant (Freksa 1992; Freksa 1992; Zimmermann and Freksa 1996). L'étude du domaine spatio-temporel passe également par l'étude du changement de la forme des objets. En effet, en fonction de la géométrie spatiale prise en compte, la modification de la forme d'un objet modélisé peut au cours du temps modifier les relations qu'il va entretenir avec son entourage ou d'autres objets. Plusieurs auteurs ont consacré des recherches en ce sens (Billen and Clementini 2006; Billen and Kurata 2008; Dupenois and Galton 2009). La modification d'objets pose évidemment question sur la continuité de tels changements. Même si nous reviendrons sur ces notions de transitions qualitatives à la section 7.C, nous n'y citerons pas tous les auteurs ayant abordé le sujet (Cohn, Gotts et al. 1994; Galton 1995; Cohn, Gotts et al. 1997; Galton 1997; Galton 2001; Hazarika and Cohn 2001; Hazarika 2005; Stell and Webster 2007). Enfin, jusqu'à présent, nous avons beaucoup travaillé avec uniquement des relations binaires entre deux objets. Certains auteurs dont Billen et Clementini (Billen and Clementini 2004; Billen and Clementini 2005; Clementini and Billen 2006) ont abordé des relations ternaires alors que d'autres tels que Laube étudient le comportement de groupe de plusieurs objets en mouvement (Claramunt, Jiang et al. 2000; Laube, Kreveld et al. 2005; Praing and Schneider 2007; Hornsby and King 2008).

7. Outils d'aide à la formalisation et au traitement de l'information qualitative

Afin de compléter notre tour d'horizon de la recherche dans le domaine de l'information géographique spatio-temporelle, nous abordons finalement quelques outils d'aide à la modélisation. Comme nous avons pu le constater précédemment, beaucoup de modèles de raisonnement utilisent des représentations d'objets évoluant dans l'espace et le temps. En plus d'une formalisation ou d'une axiomatisation propre à chaque modèle, une représentation graphique de l'évolution des objets modélisés est bien souvent parlante pour aider à la compréhension des phénomènes mis en exergue. C'est à cette fin que nous décrivons la représentation de l'espace-temps via les espaces temporels et les espaces-temps primitifs (Muller 1998).

L'étude de l'évolution d'un objet dans le temps passe par le changement des relations spatiales que celui-ci partage avec d'autres objets. Afin de vérifier l'intégrité des données mises en œuvre et de prédire les différentes étapes par lesquelles l'objet devra passer, l'utilisation des diagrammes conceptuels de voisinage, ou graphes de voisinage, s'avèrent être un outil très précieux. De plus, ils participent également à une représentation schématique des relations spatiales, temporelles ou spatio-temporelles et aident au groupement sémantique de celles-ci.

Finalement, l'utilisation de descripteurs qualitatifs induit une perte de la continuité dans les transitions entre états. Cette perte de continuité est directement induite par l'utilisation de variables qualitatives. Le passage, par exemple, d'un indice – à un indice + pour représenter l'ensemble des nombres réels coupe de toute continuité lors du passage d'une valeur à une autre, bien qu'elle continue d'être perçue comme telle par l'utilisateur. Afin de réintroduire une continuité dans les transitions entre états qualitatifs, Galton (Galton 1997; Galton 2001) propose une théorie de la dominance entre états. Sur base de cette théorie, il est possible de retrouver les différentes transitions continues possibles pour un jeu de relations qualitatives. Cet outil est également très utilisé pour la justification et la recherche de graphes de voisinages pour des relations complexes (Galton 2001; Noyon 2007; Bogaert 2008).

A. Représentation de l'espace-temps

L'utilisation d'un espace temporel pour représenter l'espace-temps est une des représentations les plus intuitives que nous avons pu observer. Ce type de représentation est présente dès les prémices de la modélisation spatio-temporelle avec Hägerstrand (Hägerstrand 1967). Notons que ce type de représentation ne se limite pas au domaine de l'information géographique ; en effet, toute représentation d'un objet en mouvement, que cela soit en physique ou en mathématique, dresse souvent un système d'axes dont un de ceux-ci est dédié au temps. Cependant, comme vu précédemment, le postulat d'une relation d'ordre est quasi

omniprésent dans les structures temporelles. La représentation en espace-temps peut ne pas autoriser de retour dans le passé. Pour aller plus loin, nous pourrions également dire que le déplacement d'un objet dans ce type de représentation doit être effectué avec la plus grande vigilance lorsqu'il s'agit d'axes gradués. Comme précisé par la théorie de la relativité (Einstein, Infeld et al. 1951), nous pouvons raisonnablement postuler qu'un objet du monde physique ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière (c). Par conséquent, si l'on représente un espace-temps à deux dimensions, soit un espace possédant une dimension spatiale unique (1D) et une dimension temporelle (1D), nous obtenons la représentation suivante pour laquelle la pente de la droite créée par le déplacement d'un objet ponctuel ne pourra jamais excéder celle de c . D'autres phénomènes impossibles peuvent être observés dans un espace-temps pour des objets du monde physique. Il s'agit principalement du retour dans le passé. Du moment où l'on considère l'axiome d'ordre temporel ($<$), il est impossible pour un objet de se situer à deux positions spatiales différentes à un instant identique. D'autre part, comme on peut le constater sur la Figure II-27 partie (II), un retour dans le passé impliquerait un passage où la pente de l'histoire spatio-temporelle serait supérieure à celle de la constante c . Une autre manière de vérifier la réalité physique de l'histoire spatio-temporelle est de projeter celle-ci sur l'axe temporel et de vérifier si la relation entre chaque instant de l'histoire spatio-temporelle est bien univoque avec l'instant correspondant sur l'axe temporel. Cette définition de l'espace-temps précise déjà une partie des postulats sous lesquelles cette recherche est envisagée. Nous détaillerons plus loin les conditions et restrictions propres au modèle proposé.

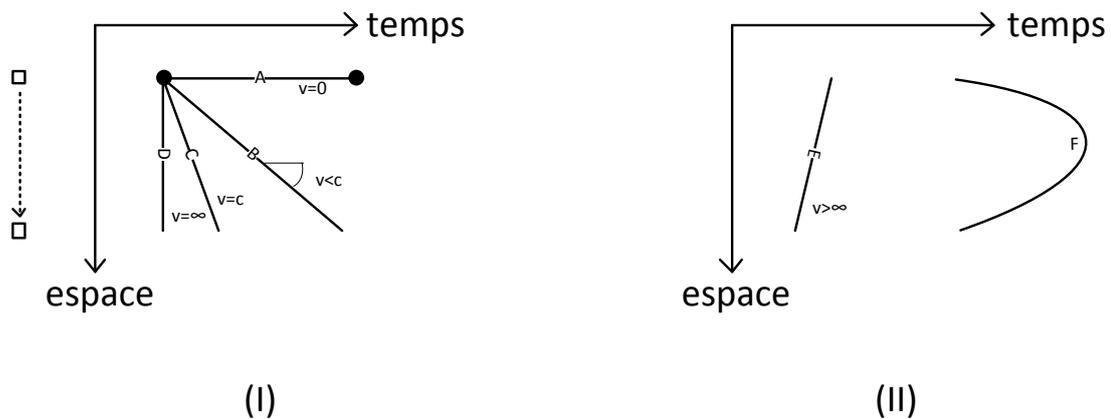


Figure II-27 Espace temporel à 2 dimensions (1 spatiale et 1 temporelle). (I) L'objet ponctuel A ne se déplace pas, B se déplace à vitesse constante toujours inférieure à celle de c , C se déplace à la vitesse c , et D se déplace instantanément soit à une vitesse infinie. (II) L'objet ponctuel E retourne dans le passé, bien que cela soit impossible, il devrait avoir une vitesse supérieure à ∞ . F se déplace à une vitesse variable mais en effectuant un retour dans le passé, ce qui est impossible. On peut également constater que ce retour dans le passé impliquerait d'avoir une vitesse de déplacement supérieure à celle de la lumière durant la partie courbée de l'histoire spatio-temporelle.

Jusqu'à présent, nous avons considéré le déplacement de points dans un espace temporel, la représentation de toute autre primitive spatiale pourrait également l'être. Notons que, dans ce cas, la représentation de l'histoire spatio-temporelle associée sera toujours de dimension $n+1$ pour un objet de dimension n (Claramunt, Thériault et al. 1997). La représentation de l'évolution d'un objet tridimensionnel dans un espace temporel n'a donc pas de représentation possible. Remarquons cependant que tous les concepts énoncés restent valables pour cet espace temporel à quatre dimensions. Les concepts de calcul étant valables quel que soit le nombre de dimensions envisagées.

Une autre méthode de représentation de l'espace-temps a été mentionnée par Muller. Il s'agit d'une représentation dans un espace-temps primitif. Cette représentation (Muller 1998) consiste en fait en une représentation de l'espace et du temps préalable à la conception des concepts de temps et d'espace. Dans ce cadre, il n'y a pas de différenciation entre les dimensions. Bien que cette approche soit couramment utilisée en philosophie, elle n'est pas légion dans le domaine de l'information spatiale. Muller regrette cette limitation, car la construction d'une méréotopologie sur ce type d'espace permet une plus grande souplesse dans la définition des concepts qui y sont associés. L'idée d'une telle représentation n'est cependant pas neuve, Hayes (Hayes 1990) dans son manifeste sur la physique naïve propose

déjà de considérer uniquement la géométrie des formes créées par les objets se déplaçant dans l'espace et le temps. Il s'agit en fait d'une analyse géométrique des formes spatio-temporelles dans un espace dégénéré. Ce n'est qu'en considérant ce cadre d'espace-temps primitif qu'il est juste de parler de relations spatiales (ou géométriques) entre des histoires spatio-temporelles. L'utilisation d'opérateurs spatiaux ne peut pas se faire tel quel sur des objets composés d'espace et de temps. Il existe d'autres bonnes raisons de considérer l'espace-temps comme domaine primitif. En effet, dans le cadre de la modélisation des objets du monde et des événements d'un point de vue ontologique, il y a une distinction entre les objets qui persistent (un chat, une table) au cours du temps et d'autre part les objets limités dans le temps (un repas, une sieste). La distinction au niveau temporel de ces entités n'est pas aisée, surtout lorsqu'on considère la notion de changement. Cette vision impliquerait de considérer que les objets physiques ont une existence indépendante du temps et que les événements sont essentiellement caractérisés par leur extension temporelle. L'identification de tels objets durant les événements est alors compliquée. Une discussion plus profonde des concepts liés à la représentation primitive peut être trouvée dans Muller et Heller (Heller 1990; Muller 1998; Muller 1999).

Nous choisirons de représenter les espaces-temps primitifs simplement en n'indiquant pas de distinction entre les différentes dimensions de l'espace considéré. Ainsi, la Figure II-27 (II) devient :

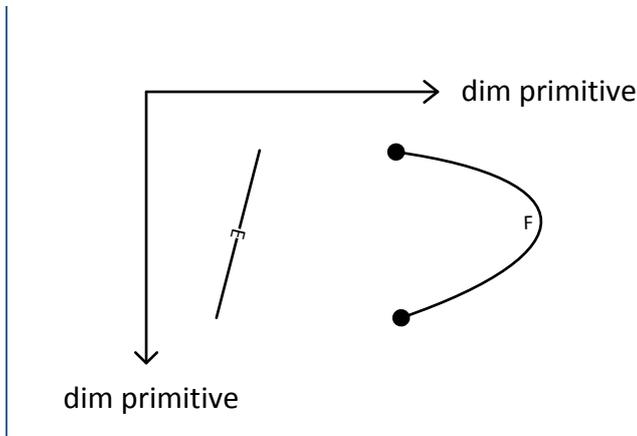


Figure II-28 Représentation des déplacements observés dans la Figure II-27 (II) projetés dans un espace-temps primitif où les dimensions spatiales et temporelles ne sont pas différenciées. Dans ce type de représentation, un calcul géométrique peut être réalisé sans postulat de départ quant à la particularité de la dimension spatiale, le calcul s'effectue sur des entités spatio-temporelles.

B. Diagrammes conceptuels de voisinages

Les diagrammes conceptuels de voisinages établis pour la première fois par Freksa (Freksa 1991) concernent l'inférence relative au domaine temporel. L'idée de ce type de représentation est de pouvoir retrouver une partie de connaissances incomplètes ou de détailler une connaissance dont le niveau d'attraction serait trop élevé. Ce type de diagrammes permet de représenter des transitions conceptuelles, logiques d'un point de vue de l'utilisateur, entre différents états d'une relation. Bien que ce type d'inférence puisse également être obtenu à partir de tables de compositions, la visualisation des transitions possibles est plus claire et rapide. La première application des diagrammes conceptuels de voisinage a été établie pour les 13 relations sur les intervalles de temps proposées par Allen. Cependant, l'application aux relations spatiales a directement été montrée par Freksa (Freksa 1991). Le voisinage conceptuel est défini de la manière suivante : « deux relations paires d'un événement sont voisines conceptuellement si elles peuvent être directement transformées l'une en l'autre par une transformation continue des événements ». En d'autres termes et d'une manière également applicable au domaine spatial : « deux relations sont voisines conceptuellement si le passage le plus court d'une à l'autre n'implique pas le passage par une troisième relation ». La représentation du diagramme conceptuel de voisinage des relations temporelles de Allen est présenté Figure II-14. La Figure II-29 représente le diagramme conceptuel de voisinage des 8 relations topologiques du modèle des 9 intersections d'Egenhofer et Herring.

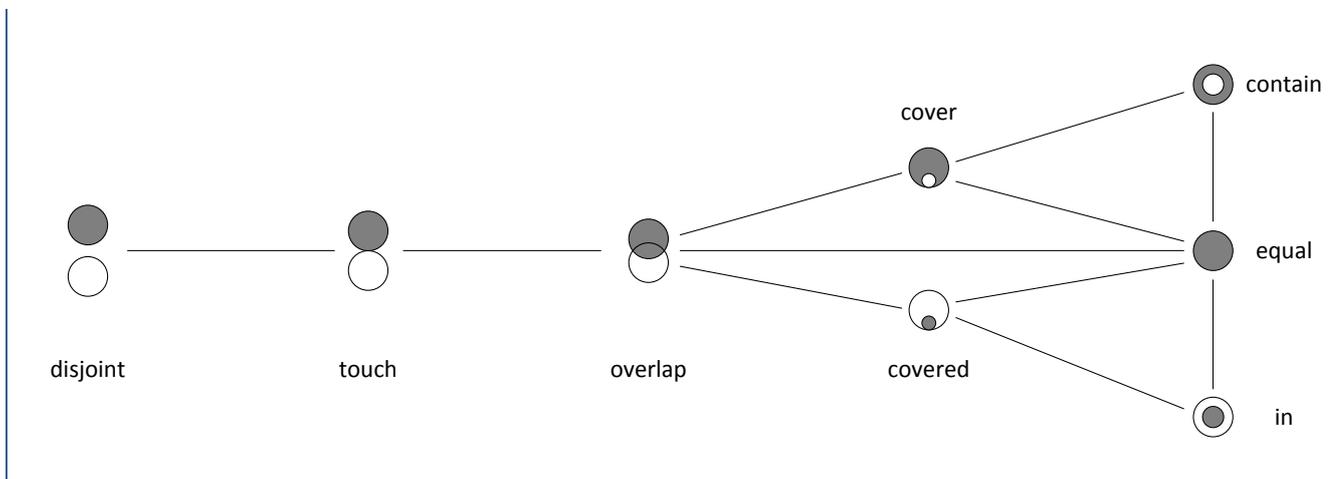


Figure II-29 Diagramme conceptuel de voisinage des 8 relations topologiques du modèle des 9 intersections. Les droites représentent les voisinages conceptuels. Le passage via une déformation continue d'une relation « disjoint » à une relation « overlap » impose le passage via une relation « touch »

Dans la figure précédente, la lecture du diagramme informe par exemple que le passage d'une relation « disjoint » (à un instant t_1) à une relation « overlap » (à un instant t_2) doit

obligatoirement passer via un état de « *touch* » (à un instant compris entre t_1 et t_2). Si ces informations font partie d'un système spatio-temporel, ce type de diagrammes permet de vérifier la cohérence de l'information, notamment que les instants t_1 et t_2 ne sont pas directement successifs. Les diagrammes conceptuels de voisinage font aujourd'hui partie intégrante de la définition d'un calculus, preuve en est que tous les modèles présentés ont ou tentent d'élaborer ce type de représentation (Worboys 2001; Randell and Witkowski 2004; Worboys, Duckham et al. 2004; Van de Weghe, Kuijpers et al. 2005; Duckham, Lingham et al. 2006; Klippel, Worboys et al. 2006; Noyon, Claramunt et al. 2007; Delafontaine, Bogaert et al. 2011).

Cette approche de la transition entre états de relation fait appel à une recherche plus vaste sur la continuité spatiale et temporelle. Beaucoup d'auteurs cherchent à définir ce qu'est une continuité du déplacement ou d'une transformation dans l'espace, le temps et l'espace-temps. Nous renvoyons le lecteur intéressé à Hazarika (Hazarika and Cohn 2001; Hazarika 2005) ou à (Freksa 1991; Egenhofer and Mark 1995; Randell and Witkowski 2004; Klippel, Worboys et al. 2006). Nous détaillerons cependant une approche de cette recherche de continuité dans un espace qualitatif. Cette méthode est proposée par Galton et fait l'objet de du point C du présent chapitre.

C. Théorie de la dominance

Galton (Galton 1997; Galton 2000; Galton 2001) part de la constatation que, lors de la modélisation d'une variable continue via une variable qualitative (et un jeu de valeurs qualitatives possibles que peuvent prendre la variable), la continuité est perdue. En effet, si l'on s'en réfère à la définition de la continuité d'une fonction, on a que la fonction $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ est continue au point $x_0 \in \mathbb{R}$ si pour chaque réel $\varepsilon > 0$, il existe un réel $\delta > 0$ tel que pour chaque $x \in \mathbb{R}$, si $x_0 - \delta < x < x_0 + \delta$ alors $f(x_0) - \varepsilon < f(x) < f(x_0) + \varepsilon$.

L'utilisation d'une variable qualitative pour décrire la fonction peut être interprétée comme une relation « many-to-one » (plusieurs à un), chaque état qualitatif représentant plusieurs états quantitatifs distincts. Par ce regroupement et suivant la définition précédente, deux états voisins d'une variable quantitative changent de manière continue, alors que deux états voisins d'une variable qualitative ne le font pas nécessairement. Si l'on décrit l'ensemble des nombres réels à l'aide d'une variable qualitative pouvant être -, 0, +, la continuité signifie que, lors de l'augmentation continue d'une variable d'un nombre négatif à un nombre positif, l'état passera de - à + tout en passant obligatoirement par l'état 0. Cet état sera alors instantané. Le passage continu d'une variable d'une valeur négative à 0 puis à une valeur

négative donnera quant à elle la possibilité d'avoir l'état 0 de la variable qualitative qui est juste durant un intervalle de temps.

Les graphes de dominance permettent également de retrouver d'une manière théorique la représentation des graphes de voisinage conceptuels. En effet, il sera montré par la suite qu'un voisinage conceptuel correspond à un chemin de dominance dans un graphe de dominance. Enfin la dominance fournit toute une série d'informations complémentaires quant à la transition entre états. Elle indiquera en effet quels états peuvent ne durer qu'un instant et lesquels ne peuvent durer que des intervalles de temps. Cette constatation est également très utilisée lors de la vérification de la cohérence de données ou de l'énonciation de contraintes pour un modèle.

La théorie de la dominance considère un espace temporel dirigé, dense, d'ordre linéaire strict et continu ayant pour primitive les instants. Cet ensemble est isomorphe à l'ensemble des nombres réels à la relation d'ordre linéaire strict près. Les intervalles de temps sont construits à partir d'une paire d'instant. L'ensemble des intervalles \mathcal{I} est noté comme :

$$\begin{aligned} i &= \langle t_1, t_2 \rangle \quad \text{où } t_1 < t_2 \\ i &\in \mathcal{I} \end{aligned} \quad (2.58)$$

Les prédicats suivant sont définis sous la condition :

$$i = \langle t_1, t_2 \rangle \quad \text{et} \quad j = \langle t_3, t_4 \rangle \quad (2.59)$$

- Limite d'un intervalle :

$$Lim(t, i) \rightarrow t = t_1 \vee t = t_2 \quad (2.60)$$

- Division d'un intervalle :

$$Div(t, i) \rightarrow t_1 < t < t_2 \quad (2.61)$$

- Rencontre de deux intervalles :

$$Meets(i, j) \rightarrow t_2 = t_3 \quad (2.62)$$

- Sous intervalle propre :

$$In(j, i) \rightarrow j \neq i \wedge t_1 \leq t_3 \leq t_4 \leq t_2 \quad (2.63)$$

Une théorie des états est surimposée à la théorie temporelle. Cette théorie des états est très proche de la PLT. Les états sont des éléments primitifs notés comme S, S' . Les prédicats suivants sont définis :

- Holds-at – relie les états aux instants. Il signifie que l'état S tient durant l'instant t.

$$\text{Holds-at}(t, i) \triangleq \forall t (\exists i) \quad (2.64)$$

- Holds – relie les états aux intervalles. Il signifie que l'état S tient durant tout l'intervalle i.

$$\text{Holds}(S, i) \triangleq \forall t (\text{Div}(t, i) \rightarrow \text{Holds-at}(S, t)) \quad (2.65)$$

- La conjonction d'états pour deux états S et S' donnés :

$$\text{Holds-at}(S \sqcap S', t) \triangleq \text{Holds-at}(S, t) \wedge \text{Holds-at}(S', t) \quad (2.66)$$

- La perturbation est définie comme :

$$\begin{aligned} & \text{Holds}(S, i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds-at}(S', t) \\ & \vee \\ & \text{Holds}(S', i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds-at}(S, t) \end{aligned} \quad (2.67)$$

Si seulement la première situation se produit, alors nous dirons que S' domine S : $S' \succ S$. Par contre, si la seconde situation se produit, S' sera dominé par S : $S' \prec S$. Notons enfin que deux états qui peuvent survenir en toutes circonstances sont des perturbations d'eux-mêmes et de tous les états qui peuvent tenir au même moment que lui. Dans certains cas, deux états sont incompatibles. Dans ce cas, ils se « disputent » afin de dominer l'instant ou l'intervalle sur lequel ils sont en compétition. C'est de ce phénomène que la théorie de la dominance tire son nom. Elle va résoudre ce problème de perturbation propre pour deux états incompatibles sur un instant ou un intervalle.

Dans ce contexte, un espace de dominance sera défini comme la paire (\mathcal{S}, \succ) , où :

- \mathcal{S} est un ensemble fini d'états ;
- \succ est une relation non réflexive et asymétrique portant sur \mathcal{S} , et où $\mathcal{S}_1 \succ \mathcal{S}_2$ est lu comme « \mathcal{S}_1 domine \mathcal{S}_2 » ;
- Et pour lequel la règle d'incidence temporelle suivante est vraie :

$$\forall S, S' \in \mathcal{S} (\text{Holds}(S, i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds-at}(S', t) \rightarrow S' \succ S) \quad (2.68)$$

Un atout important de la théorie de la dominance est qu'un ensemble d'espaces dominants peut être combiné en un espace composé qui est également un espace de dominance. Soit :

$$\forall (\mathcal{S}_x, \succ_x), (\mathcal{S}_y, \succ_y) \left((\mathcal{S}_x, \succ_x) \times (\mathcal{S}_y, \succ_y) \rightarrow (\mathcal{S}_x \times \mathcal{S}_y, \succ) \right) \quad (2.69)$$

Cette notion est fondamentale et extrêmement utile. En termes clairs, cela signifie que pour créer un espace de dominance, il suffit de décomposer le problème en sous-analyses qualitatives qui, une fois combinées, représentent le modèle complet. La dominance s'étudie donc sur de petits espaces qualitatifs et l'ensemble du problème est rarement modélisé directement via cette pratique. Les démonstrations des théorèmes (2.68) et (2.69) sont disponibles dans Galton (Galton 2001). Le résultat de l'espace de dominance composite peut être représenté sous forme graphique, on parle alors de graphe de dominance. Cette représentation symbolise les différents états qualitatifs modélisés et les relie sur base d'une flèche indiquant quel état domine un autre. Les flèches pleines représentent un changement unique dans tous les sous-espaces qualitatifs, une flèche tiretée symbolise une transition dans un seul des sous-systèmes. Un état dominant sera un état qui peut être valable uniquement durant un instant alors qu'un état dominé existera obligatoirement durant un intervalle de temps. La Figure II-30 présente le graphe de dominance des 8 relations entre régions du RCC. Elle est le résultat de la combinaison de trois espaces qualitatifs assez simple :

- La proportion de surface de la région A dans la région B :

$$\alpha = \frac{\text{aire de A dans B}}{\text{aire de A}} \quad (2.70)$$

$$\mathcal{S}_1 = (\text{none} \succ \text{some} \prec \text{all}, \succ)$$

- La proportion de surface de la région B dans la région A :

$$\beta = \frac{\text{aire de B dans A}}{\text{aire de B}} \quad (2.71)$$

$$\mathcal{S}_2 = (\text{none} \succ \text{some} \prec \text{all}, \succ)$$

- Le fait de partager ou pas un point de frontière commun :

$$\gamma = \text{distance minimale de } \delta A \text{ à } \delta B$$

$$\gamma = 0 \text{ ou } \gamma > 0 \quad (2.72)$$

$$\mathcal{S}_3 = (0 \succ, \succ)$$

Ce qui une fois combiné donne les 18 possibilités représentées à la figure suivante. Notons que seules 8 ont une interprétation réelle.

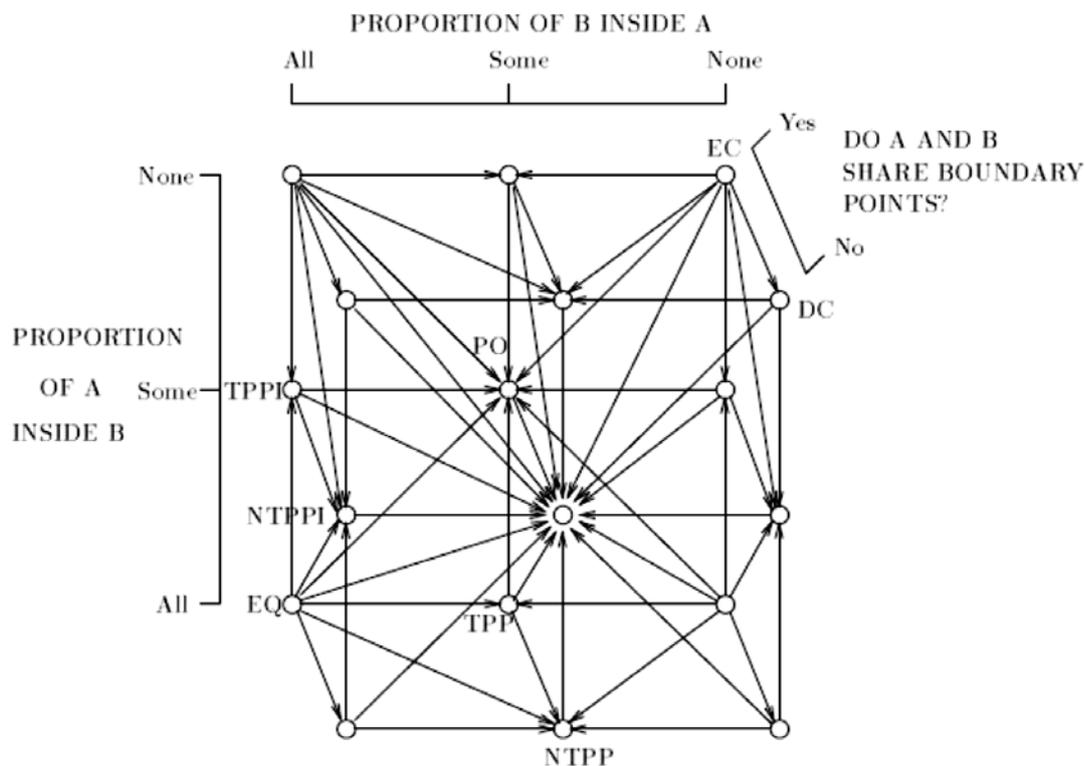


Figure II-30 Espace de dominance créé à partir de trois variables qualitatives qui sont la proportion de B dans A, la proposition de A dans B et le fait de partager un point de frontière ou non. Cet espace de dominance représente les 8 relations spatiales du RCC. Il exprime également quels états peuvent exister durant un instant ou un intervalle de temps. Certains nœuds ne sont pas nommés car ils ne représentent pas une réalité dans le monde physique. Cette représentation est tirée de (Galton 2001).

En transformant cette figure, on voit que les chemins de dominance représentent en fait les voisinages conceptuels tels que définis par Freksa. Notons cependant qu'ils sont ici déterminés de manière théorique et non de manière intuitive. En effet, l'étude des transitions de dominance tient compte de la transition temporelle possible ou pas entre les différents états. Elle fournit même plus d'informations quant à la durée et la possibilité de combiner ces différents états dans un système complexe.

Chapitre III.

Objectif de la recherche

*Vous ne pouvez jamais résoudre
un problème en restant au niveau où il a été créé
Albert Einstein*

Comme nous avons pu le constater tout au long de l'état de la recherche, la modélisation des phénomènes géographiques passe par la manipulation d'objets localisés dans l'espace et dans le temps. Le suivi de ces éléments se fait premièrement via la gestion de leur identité et ensuite via la manipulation de leur extension spatiale. Bien que nous focalisons essentiellement notre recherche sur des phénomènes géographiques, il est à noter que le modèle proposé dans cette recherche n'est pas limité à de telles applications. La gestion de l'identité peut être généralisée à d'autres domaines d'information. En effet, comme nous le montrons dans la suite du travail, le suivi de l'identité d'objets n'est pas toujours effectué dans un espace géographique mais par exemple dans d'autres espaces conceptuels tels que l'Internet, les réseaux sociaux, des espaces mathématiques, des espaces de taxation, des espaces juridiques... L'évolution d'un objet qu'il soit géographique ou non est rarement linéaire. Nous avons tous en tête le schéma classique de l'existence d'un objet qui évolue d'une apparition ou d'une naissance, ensuite il évolue vers une période d'existence durant laquelle il se déplace ou effectue plusieurs événements et qui se termine par une extinction, une disparition ou encore une mort. Cette vision bien qu'elle puisse être qualifiée de simpliste est à la base de nombreux modèles de raisonnements spatiotemporels, d'analyses de trajectoires et d'études de comportements d'objets. Il existe néanmoins toute une série d'exemples où la gestion de l'identité d'un objet n'est pas en adéquation avec le schéma précédent et par conséquent non linéaire. Considérons l'exemple suivant : « Adrien se

promène dans la rue, il marche à la rencontre d'Arnaud. Il tourne à droite au niveau de l'ancienne gare des Guillemins, continue tout droit puis entre dans un centre commercial. Il en ressort via l'entrée arrière et rencontre alors Arnaud ». La Figure III-1 schématise ce déplacement intra-urbain, le déplacement spatio-temporel d'Adrien y est figuré par une flèche.

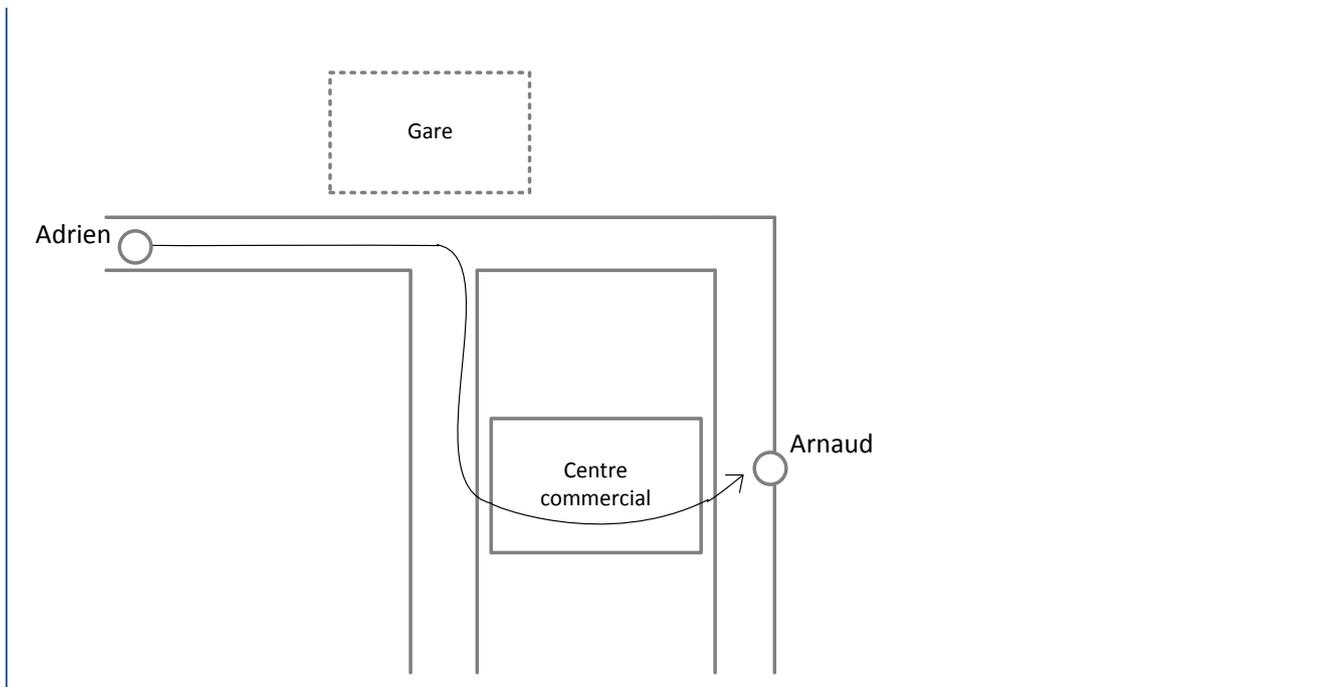


Figure III-1 Exemple de déplacement intra-urbain pour une personne. La flèche indique le parcours effectué par Adrien pour aller à la rencontre d'Arnaud. Celui-ci se déplace dans une rue jusqu'à une ancienne gare où il tourne à droite. Il entre ensuite dans un centre commercial où il ressort par la seconde entrée.

Si nous analysons le déplacement de ces intervenants dans un espace géographique, nous pouvons les assimiler à deux points évoluant dans un espace à deux dimensions. Les individus sont localisés via un récepteur GNSS¹⁶. Bien que très simple à concevoir cet exemple met en lumière deux phénomènes liés à l'évolution de l'identité d'objets auxquels peu de réponses ont été apportées jusqu'ici. Le premier événement dans cette analyse est donné par la phrase : « *Adrien tourne face à l'ancienne gare détruite depuis quelques années* ». Ceci indique que la gare, bien que détruite, continue de persister dans l'esprit commun et sert de point de repère à une navigation. Il en est de même pour un lieu dans lequel deux interlocuteurs ont vécu un événement commun, par exemple se donner rendez-vous « *là où tu m'as rencontré pour la première fois* », « *devant l'endroit de ton premier accident de voiture* ».

¹⁶ Global Navigation Satellite System ou Système Global de Positionnement par Satellite.

Ces lieux ou faits n'existent plus mais ils persistent dans la mémoire commune et sont encore souvent utilisés dans des réflexions de positionnement. A l'heure actuelle il n'existe pas de modèle de raisonnement qui gère complètement cette relation à un objet n'existant plus et par conséquent ayant perdu son identité géographique. Bien que quelques tentatives aient été étudiées par Campos (Campos, Egenhofer et al. 2003; Campos, Hornsby et al. 2003) et Hornsby (Hornsby and Egenhofer 1997; Hornsby and Egenhofer 1998; Hornsby and Egenhofer 2000), ces solutions ne sont pas directement dédiées à l'analyse spatio-temporelle et peu de formalisation est donnée à ces concepts. Par ailleurs, ces travaux n'expriment pas la relation qu'il peut exister entre un objet qualifié d'« existant » avec un objet qualifié de « non existant ».

L'événement suivant est l'entrée d'Adrien dans le centre commercial. En toute logique, comme Adrien est suivi via un récepteur GNSS, le signal cessera d'être reçu par son récepteur et sa position ne sera plus connue. Il est évident que celui-ci existe toujours et qu'il n'est pas détruit par le fait de ne plus avoir connaissance de sa position spatiale. Le système doit pouvoir continuer à gérer son identité bien qu'il ne soit pas visible temporairement par le système dans la zone d'analyse. Il en est de même avec l'extension spatiale. Celle-ci comme expliqué par Smith (Smith and Mark 1998) est une composante primordiale dans l'analyse géographique. C'est par elle que sont appréhendés les objets géographiques. L'extension spatiale ou les frontières, qu'elles soient « *fiat* » ou « *bona fide* », doivent être connues même avec un certain taux d'imprécision. Cette non-connaissance de l'extension spatiale d'objets géographiques n'est pas gérée au niveau des systèmes de raisonnements spatio-temporels. Il ne faut cependant pas confondre ce concept avec une recherche sur des données floues ou incomplètes. En effet, dans ce cas, l'information n'est pas manquante, nous savons que l'objet existe toujours et nous savons également que nous n'avons plus d'information quant à son extension spatiale. Nous proposons dans ce travail de formaliser ce concept et de décrire les relations possibles entre des objets tant présents qu'absents, existant ou non-existant. Nous pensons que cette formalisation apporte un outil primordial à la réflexion spatio-temporelle en aidant à la qualification et à la relation entre objets évoluant dans l'espace et dans le temps de manière complexe. L'approche que nous proposons de réaliser se situe dans une perspective de modélisation conceptuelle de l'information. En effet, l'étude de l'identité que nous abordons n'est pas réalisée au niveau des mécanismes propre à l'implémentation de données dans un système de données géographiques.

Notre premier objectif de recherche consiste en la définition et la formalisation de ces états d'identités particuliers d'objets. La recherche actuelle ne s'attachant pas à la formalisation d'états complexes de l'existence d'objets, nous proposons de répondre à cette lacune via une formalisation structurée de l'identité d'un objet évoluant dans un espace géographique. Nous tenterons également de donner une formalisation complète du concept d'identité d'un objet et de vérifier l'évolution de celui-ci dans l'espace et le temps.

Par cette recherche relative à l'identité d'objets géographiques, nous pensons également qu'une réflexion sur les modèles de raisonnement spatio-temporels actuels est nécessaire. L'analyse spatio-temporelle manque d'une *vision identitaire étendue*. Cette approche peut conduire à proposer de nouvelles pistes pour l'analyse spatio-temporelle. Les modèles de raisonnement spatio-temporels actuels sont souvent limités à des applications précises telles que l'analyse des caractéristiques des trajectoires d'objets, l'analyse de vision relative entre deux objets en mouvement, le suivi d'une flotte de véhicules sur un réseau, l'analyse des comportements de plusieurs objets se déplaçant ensemble, etc... De plus, la plupart des modèles de raisonnement spatio-temporels se limitent à une description ou une formalisation des relations entre deux objets simultanément existants et présents. Nous qualifions cet intervalle temporel de zone de cooccurrence. Mais qu'en est-il lorsqu'un objet quitte cette zone ? Peu de réponses sont apportées à cette question à l'heure actuelle.

Pour répondre à cette limitation et aider au choix du modèle adéquat en fonction de l'application souhaitée, nous proposons d'établir un modèle de raisonnement spatio-temporel général qui s'applique quel que soit le cas d'étude. *L'application d'un niveau d'abstraction supplémentaire sera notre ligne de conduite afin d'effectuer un raisonnement spatio-temporel*. D'autre part, la sélection de fenêtres spatiales et temporelles, i.e. les zones de cooccurrences dans lesquelles peuvent être appliqués d'autres modèles de raisonnement spatio-temporels n'est à l'heure actuelle pas une chose aisée. Nous tenterons également de définir une base générale commune aux possibilités d'analyse spatio-temporelles. Plus qu'un modèle général, dans la suite de ce travail, nous rechercherons à proposer une formalisation des concepts utilisés en raisonnement spatio-temporel et ce pour permettre de comparer les modèles de raisonnement actuels sur base d'une base commune et d'un langage commun.

La Figure III-2 représente la position des recherches spatio-temporelles actuelles en fonction de l'évolution spatio-temporelle d'un objet et de la complexité des modèles. Comme on peut le constater, les modèles actuels s'appliquent généralement uniquement à la zone de cooccurrence spatiale et temporelle entre deux objets. Hormis quelques tentatives, il n'existe pas à l'heure actuelle un modèle général qui ne s'appliquerait pas exclusivement aux zones de cooccurrences spatiales et temporelles entre deux objets mais bien à l'ensemble de l'évolution spatio-temporelle de ceux-ci. De plus, l'analyse première des relations d'objets dans une phase de cooccurrence est directement assez complexe et limité à des applications précises (déplacement qualitatif d'objets, prédiction de positions futures,...). La recherche d'un modèle fondateur permettrait de rendre compte d'une information plus générale quant à l'évolution ou le déplacement d'objets (voir Figure II-1).

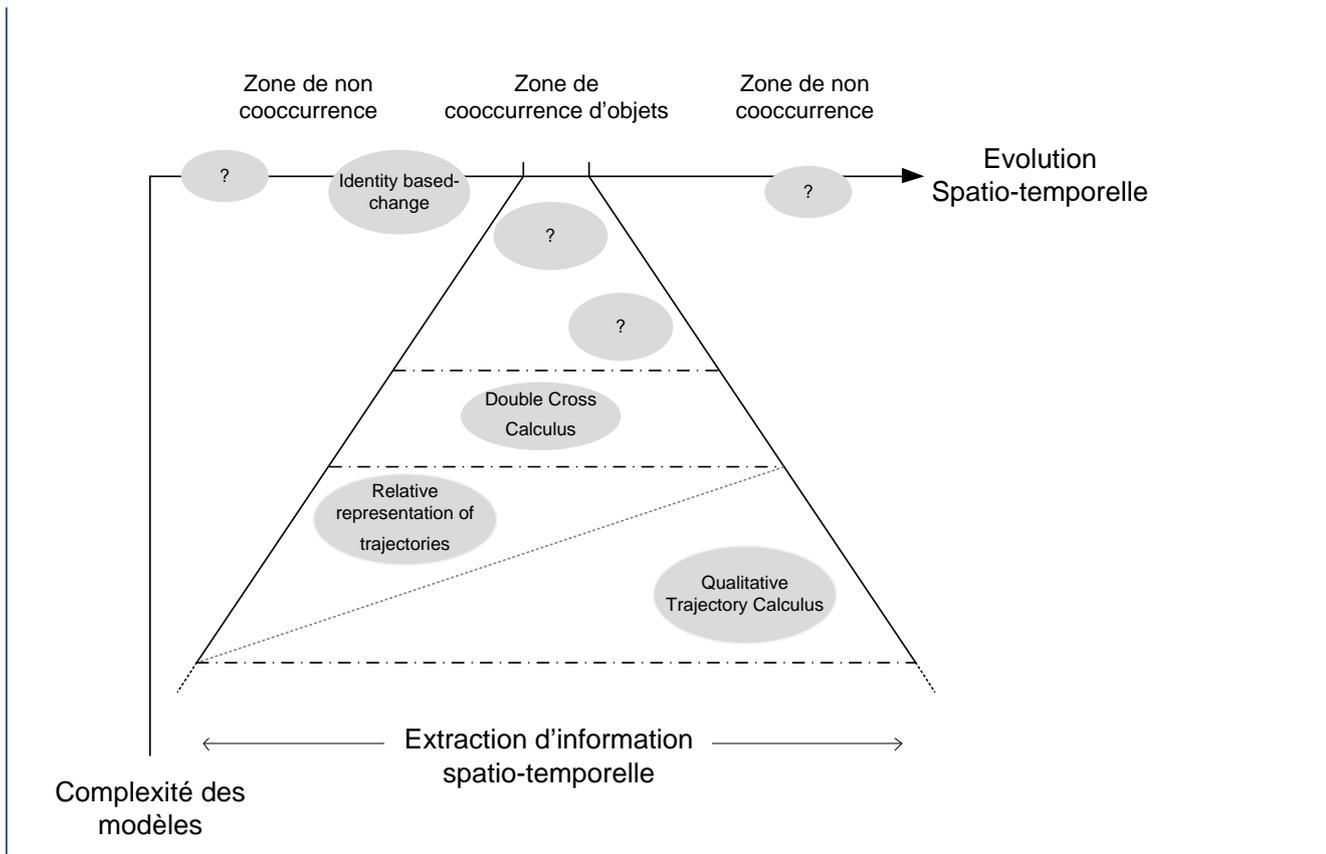


Figure III-2 Représentation pyramidale d'une classification des différents modèles de raisonnement spatio-temporel étudiés. Cette représentation aide à positionner la recherche actuelle par rapport aux autres modèles de raisonnement spatio-temporel. Il n'existe pas de formalisation complète de cas de non cooccurrence spatiale et temporelle entre deux objets, ainsi qu'une approche généralisée de la relation entre deux objets en phase de cooccurrence spatio-temporelle. Inspiré de (Hallot and Billen 2009).

Notre second objectif de recherche consiste en la proposition d'un modèle de raisonnement spatio-temporel généralisé basé sur l'identité et la présence d'objets géographiques. L'idée principale d'un tel modèle est de formaliser les relations entre objets n'étant pas en phase de cooccurrence spatio-temporelle. Par ce modèle, nous souhaitons également proposer une possibilité de mise en commun de l'ensemble des modèles de raisonnement spatio-temporels via une base commune. Un tel modèle offrirait alors la possibilité de dériver de nouvelles approches spatio-temporelles globales à l'information géographique.

Les données relatives aux déplacements d'objets géographiques dans l'espace et le temps sont importantes. En effet, la multiplication de l'enregistrement de positions spatiales dans le temps entraîne la multiplication et bien souvent la duplication d'une partie importante des données spatiales représentées. Comme nous avons pu le constater, bien que la recherche

tente de limiter au maximum cette duplication, une part importante de la taille des données est due à cette répétition. La conséquence de cette duplication est la manipulation de jeux de données importants qui limitent le travail et l'extraction de connaissances sur ceux-ci. Une part importante de la conception de modèles de raisonnement est la création de modèles de relations spatiales ou temporelles entre deux ou plusieurs objets. Que cela concerne exclusivement la spatialité comme dans le cas des modèles du RCC (Randell, Cui et al. 1992), des 9 intersections (Egenhofer 1989), des relations projectives (Clementini and Billen 2006) ou de la temporalité comme dans les modèles de Allen (Allen 1983) ou Peuquet (Peuquet 1994), ces modèles de relations sont la base des raisonnements. La recherche d'un modèle de relation focalisé sur l'identité d'objets nous semble être nécessaire dans le domaine du raisonnement spatio-temporel. L'avantage qu'apporterait un tel modèle serait de ne pas être limité par la taille et l'importance des jeux de données la spatialité n'étant pas directement prise en compte.

Notre troisième objectif consiste en l'étude des relations identitaires entre objets au travers de l'espace et du temps. Cette analyse vise à proposer un modèle de relations spatio-temporelles identitaires. Un tel modèle pourrait alors prétendre à l'analyse rapide d'une grande quantité de données et permettrait également l'identification d'une série de relations importantes dans la recherche spatio-temporelle.

La représentation de l'information spatio-temporelle a toujours été un enjeu principal de la recherche du domaine. En effet, il n'est pas aisé de présenter l'évolution d'objets au travers de l'espace et du temps. Lorsque l'on manipule des objets complexes ou de dimensions élevées (par exemple l'évolution d'objets tridimensionnels), on est vite confronté à une représentation qui n'est plus visualisable dans le monde physique (une représentation de quatre dimensions). A notre connaissance, il n'existe pas encore de définition de principe simple de représentation de l'évolution d'objets dans l'espace et le temps tout en tenant compte de l'identité des objets. Dès lors que l'on souhaite gérer l'identité et des situations complexes d'identités d'objets, il est également nécessaire de les représenter dans l'espace et le temps. La définition d'un formalisme permettant de répondre à ce constat fera l'objet de notre objectif suivant. Il s'agit également d'une première application d'un modèle général de relations spatio-temporelles identitaires.

La représentation de l'évolution d'objets dans l'espace et le temps d'un point de vue identitaire ne fait pas encore l'objet d'un mode de représentation cohérent. Plusieurs méthodes de représentation d'objets existent à l'heure actuelle mais aucune ne permet la visualisation simple de l'information spatio-temporelle. Cela conduit souvent à une modélisation sans représentation de l'information spatio-temporelle. L'objectif de cette recherche sera donc de répondre à ce manque et de proposer une représentation via un formalisme simple de l'évolution spatio-temporelle identitaire d'objets dans l'espace-temps.

L'interprétation des relations spatiales a fait l'objet d'études poussées. Comme nous l'avons montré précédemment, le lien entre des relations et le langage naturel est important (Klippel, Worboys et al. 2006; Cai 2007; Kurata 2007). En effet, le but des relations est de correspondre à une demande d'analyse précise. Ces relations doivent donc être proches de la perception humaine et répondre à ses attentes. Il a été démontré que des modèles comme le RCC-5 (Clementini, Di Felice et al. 1993) est en phase avec la perception de la spatialité au niveau du cerveau humain. Définir un jeu de relations trop compliquées à l'interprétation ne sera utilisé que par des opérateurs expérimentés et peu diffusé. La démarche que nous proposons d'adopter est fortement liée à ce constat. A partir de l'analyse d'événements uniques ou de relations spatio-temporelles telles que « la rencontre », « la génération », « la disparition », nous proposons de définir une méthode d'identification spatio-temporelle de ces prédicats. L'idée qui sous-tend cette approche n'est donc plus de générer une relation et de tenter de lui donner un sens par la suite, mais de partir d'une proposition du langage naturel et de rechercher formellement à quelle relation ou conceptualisation elle correspond dans l'espace-temps.

Notre dernier objectif de recherche se focalisera sur l'analyse et l'application d'un formalisme de représentation spatio-temporel afin d'une part de proposer un jeu de relations spatio-temporelles identitaires mais également de donner du sens à celles-ci. L'interprétation en langage naturel basé sur l'analyse de fonctions spatio-temporelles proches de la perception humaine fait partie de cet objectif.

Afin d'aider au positionnement de notre recherche, nous proposons de classer les différents modèles de raisonnement actuels en deux tables. La première représente l'analyse de relations unitaires. C'est-à-dire, de description d'objets uniques. La description d'une forme géométrique en carré, rond ou triangle est en fait la description d'une relation unitaire sur cet objet. La Table 1 croise d'une part l'identité et la spatialité d'un objet avec la description statique dans le temps et sa description dynamique (évoluant dans le temps). L'observation des différentes possibilités de cette table montre qu'il existe beaucoup plus de modèles consacrés à la spatialité d'un objet qu'à son identité. Notre objectif de recherche se positionne plus dans la première colonne par la définition d'un modèle décrivant l'identité et l'évolution de celle-ci dans l'espace-temps.

Objet	Identité	Spatialité
Statique	Modélisation de l'identité d'un objet (Khoshafian and Copeland 1986); <i>Objectif 1</i> <i>Chapitre IV</i>	Modèles de données spatiales; Description de données spatiales; Géométrie euclidienne, géométrie projective, géométrie topologique <i>Chapitre II</i>
Dynamique	Identity base change <i>Chapitre IV</i> (Hornsby and Egenhofer 2000) <i>Objectif 1</i> <i>Chapitre IV</i>	Evolution de forme; Transformations spatiales (projections, déformations, transformations affines, ...) <i>Chapitre II</i>

Table 1 : Représentation de l'identité et de la spatialité d'un objet par rapport à la staticité ou la dynamité de sa description. On constate qu'il existe plus de méthodes de formalisation de la spatialité d'objets que de l'identité de ceux-ci.

La seconde table (Table 2) croise quant à elle les relations entre objets par rapport à leur identité et spatialité vis-à-vis de leur évolution dans le temps. En d'autres termes, cette table compare les modèles de relations spatiaux, temporels et identitaires. Comme on peut le constater, il n'existe pas à l'heure actuelle de modèles décrivant l'évolution de relations identitaires entre deux objets au travers du temps. Notre objectif de recherche s'attardera donc à la définition d'un modèle répondant à ce manque.

Relations entre objets	Identité	Spatialité
Statique	<i>Objectif 2 Chapitre VI</i>	RCC, 9-i, CBM (Egenhofer and Franzosa 1991), (Clementini <i>et al.</i> 1993)...
Dynamique	<i>Objectif 3 Chapitre VII</i>	QTC (Van de Weghe, Cohn et al. 2004; Van de Weghe, Kuijpers et al. 2005; Van de Weghe, Cohn et al. 2006; Delafontaine, Van de Weghe et al. 2008), relative trajectories (Noyon, Devogele et al. 2005; Noyon 2007; Noyon, Claramunt et al. 2007) <i>Chapitre II</i>

Table 2

Table représentant la formalisation des relations entre objets. Cette table croise la représentation d'identité et de spatialité avec l'évolution statique ou dynamique des relations. La table met en évidence le manque de formalisation de l'évolution de l'identité au travers du temps.

La suite du document est structurée de façon linéaire par rapport aux objectifs de recherche. Premièrement, nous décrivons dans le chapitre IV l'état spatio-temporel d'un objet. Par une définition formelle de l'état identitaire d'un objet, nous y proposerons une représentation complète de l'identité et de la spatialité de celui-ci. Le chapitre V quant à lui proposera une formalisation de la relation entre deux objets comme présenté dans la Table 2. L'évolution de la relation identitaire au travers du temps sera débattue dans le Chapitre VI. La fin du document propose par la suite plusieurs applications du modèle établi. D'une part, la proposition d'un jeu de relations spatio-temporelles identitaires comme définies préalablement dans cette section (Chapitre VII) et, d'autre part, l'interprétation en langage naturel et la recherche de formalisation sur base de prépositions linguistiques (Chapitre VIII).

Chapitre IV.

État spatio-temporel d'un objet

*Un être humain est une partie du tout que nous appelons "Univers"...
Une partie limitée dans le Temps et dans l'Espace.
Albert Einstein*

Notre premier objectif consiste à proposer une définition et une formalisation de l'état spatio-temporel d'un objet. Cette définition doit également rendre compte de la complexité de l'évolution d'un objet dans un espace géographique. Nous visons également à répondre à trois questions fondamentales dans ce travail. Comment formaliser la prise en compte d'un objet qui n'a pas encore d'extension spatiale ? Comment formaliser la prise en compte d'objets dont l'identité persiste après leur disparition ? Et enfin, comment formaliser l'évolution d'un objet qui, durant son existence, passe par une phase de non-visibilité ? Pour répondre à ces trois interrogations, cette section réalise la modélisation de l'état spatio-temporel d'un objet. Cependant, avant d'arriver à une réelle définition des différents états spatio-temporels, il est nécessaire de poser les différents concepts que nous utiliserons afin de modéliser l'état spatio-temporel d'un objet. Ceci implique le cheminement suivant : s'interroger sur le pourquoi d'une telle modélisation, poser la définition du cadre formel dans lequel elle est établie. Il sera ensuite nécessaire d'établir un diagramme de voisinage et un arbre de décisions. Poser un concept (ou une définition) est à la portée de tous, mais faut-il encore qu'il soit correctement énoncé et vérifié afin d'être utilisé. La justification des diagrammes de voisinages, arbres de

décisions que nous proposerons seront ensuite vérifiées à l'aide d'une théorie de transition qualitative.

1. Hypothèses de travail et postulats

Le modèle proposé est défini selon certaines hypothèses de travail. La motivation de celles-ci sera débattue dans les chapitres suivants. Certaines hypothèses peuvent néanmoins déjà être énoncées. Premièrement, le paradigme géographique que nous proposons de considérer est une vision attributaire de la géométrie par rapport à l'objet. Nous pensons cependant qu'une vision de la géométrie indépendante de l'objet peut se justifier par la suite notamment dans le cadre des relations entre objets ne possédant pas d'extensions spatiales.

A. Retour dans le passé

D'une façon générale, nous posons qu'un objet ne peut pas retourner dans le passé. Comme nous l'avons montré, la majeure partie, pour ne pas dire tous, les modèles de conceptualisation du temps proposent une vision ordonnée. Considérer un retour dans le passé d'un objet soulève beaucoup de questionnements et peut conduire à des incohérences. Par exemple, comment traiter un objet qui en retournant dans le passé se détruirait lui-même ou détruirait les objets qui vont l'engendrer ? De même, imaginons une table de billard possédant un passage temporel entre deux trous de la table. Qu'advient-il si une bille roule vers l'entrée du passage temporel, qu'elle en ressort plus tôt dans le temps par le second et qu'elle se percute elle-même l'empêchant ainsi d'arriver dans le passage temporel. Cette restriction implique que certaines formes spatio-temporelles ne pourront être admises dans une représentation de l'espace-temps. C'est notamment le cas lors de la visualisation d'une histoire spatio-temporelle dans un espace temporel (voir Chapitre II.7.A).

B. Déplacements instantanés

La modélisation que nous proposons, bien qu'essentiellement dédiée à des objets géographiques, peut néanmoins concerner tout autre objet dans un espace conceptuel. Dans le cas d'objets en déplacement dans un monde physique, il n'est pas possible d'arriver à un déplacement instantané. La relation entre la position spatiale et le temps ne serait plus univoque. Un objet se déplaçant de façon instantanée est en relation avec plusieurs positions spatiales pour un même instant. Le modèle que nous développons par la suite peut néanmoins être affranchi de cette hypothèse. En effet, il existe des cas où la gestion d'un déplacement instantané peut être nécessaire. Cette notion dépend également de la granularité temporelle à laquelle est perçue l'information. On peut raisonnablement penser qu'un objet qui se déplace plus vite que deux intervalles de mesure aura plusieurs positions spatiales pour ces intervalles

de temps. Si l'on considère maintenant des exemples moins proches de notions géographiques, le déplacement instantané dans l'espace conceptuel devient alors plus probable. Bien que ces exemples nécessitent rarement une spatialisation (ou une représentation dans un espace de leurs composantes thématiques), on peut citer le cas d'un réseau social ou chaque objet en présence est accessible par n'importe quel autre. Ils sont à la fois tous en contact et à la fois tous en disjonction.

C. Résurrection

La notion de résurrection sera débattue plus longuement par la suite. Nous pouvons, d'ores et déjà, apporter quelques informations quant à ce sujet. La gestion de la résurrection telle que nous la concevons symbolise le fait qu'un objet totalement détruit puisse réapparaître dans la même forme au cours du temps. A nouveau, le cadre fonctionnel dans lequel le modèle proposé est appliqué va définir si, oui ou non, cette notion doit être prise en compte. On peut raisonnablement penser qu'une modélisation de personnes en mouvement dans un espace de travail professionnel n'admettra pas de résurrection tel que définie. Une étude archéologique, quant à elle, aura tendance à tenir compte d'une possibilité de « réapparition » des objets qu'elle modélise. Par exemple, la découverte d'un site archéologique aura tendance à rechercher l'identité des objets découverts.

2. Pourquoi étendre l'état identitaire d'un objet ?

Si l'on s'en réfère à nos objectifs de recherche, on peut, premièrement justifier ce travail en se basant sur les deux tables (Table 1 et Table 2) du Chapitre III. Celui-ci met en évidence un concept non modélisé dans les théories de modélisations que nous avons consultées. En effet, l'étude de l'évolution de la relation d'identité entre deux objets n'a pas encore été prise en compte. On pourrait également s'interroger sur l'intérêt de combler ce manque ? Il nous semble important de répondre à cette question et ce pour deux raisons. Deuxièmement, nous pourrions « simplement » parler de « *recherche fondamentale* ». Présenter un concept non étudié dans un cadre formel et en proposer une modélisation aide à la compréhension du monde qui nous entoure. Mieux comprendre les mécanismes de formation et d'évolution de l'identité d'un objet en fait partie. La seconde raison qui nous pousse à effectuer cette modélisation est qu'elle représente un problème actuel auquel nous sommes tous confrontés dans notre vie quotidienne. Nous utilisons tous des récepteurs GNSS couplés à un système d'information géographique dans nos déplacements quotidiens. Nous avons également tous vécu la mauvaise expérience d'emprunter un tunnel et d'espérer ne pas devoir changer de direction durant la traversée de celui-ci, ou, que le signal GNSS soit à nouveau rapidement disponible à sa sortie afin d'être averti au plus vite d'un éventuel changement de direction... Lorsqu'un de nos collègues n'est pas présent au bureau, nous ne paniquons pas en pensant

que celui-ci n'existe plus. Nous postulons simplement que celui-ci est absent et qu'il existe toujours. Cependant, pour un système de suivi des employés d'une société, de suivi de passagers sur un paquebot, de clients d'un centre commercial, le fait de quitter l'endroit analysé peut être assimilé à la fin de l'existence de celui-ci. Or ce n'est que très rarement le cas. Nous pensons qu'il serait préférable d'intégrer un raffinement de ces périodes de non-existence ou d'existence afin de mieux rendre compte des phénomènes réels qui se produisent lorsqu'un objet n'est, soit pas visible, soit non présent, soit absent pour un certain temps.

Lors de la construction d'un immeuble, nous effectuons déjà un raisonnement spatial vis-à-vis de celui-ci, même si les travaux n'ont pas encore commencé réellement. Un exemple parlant à ce propos est la rénovation de la Gare des Guillemins à Liège. Quoique peut-on parler de rénovation dans ce cas ? Une nouvelle gare complètement neuve a été érigée à un endroit différent de l'ancienne gare. Cependant, elle conserve son identité de « Gare des Guillemins » alors que son extension spatiale a été fortement modifiée. D'autre part, nous utilisons toujours l'ancienne gare comme repère pour nos déplacements. Beaucoup utilisent toujours ce repère pour décrire un itinéraire ou proposer un lieu de rendez-vous. Il en a été de même pour le nouveau bâtiment. Alors même que les travaux de celui-ci étaient toujours à l'étude, l'ensemble de la population pouvait déjà utiliser son futur lieu comme repère spatial afin de raisonner. Dans un cadre plus restreint, il en est de même pour d'autres éléments plus temporaires. Qu'il s'agisse d'une foire, d'un marchand ambulant, lorsque deux personnes se donnent rendez-vous, elles peuvent utiliser un point de repère temporaire comme « devant la grande roue ». Ce qui est intéressant à remarquer est que ce point de repère continue d'exister alors même que la foire est terminée et qu'elle n'est plus présente physiquement devant le lieu de rencontre. Certains éléments même beaucoup plus éphémères peuvent également être assimilés à des lieux de raisonnements spatiaux, par exemple le lieu d'un accident automobile, un lieu de rencontre qui a marqué les deux personnes, etc... Cette démarche peut même être constatée pour des éléments ayant disparu depuis plusieurs siècles. Si nous proposons de rencontrer un habitant de la ville de Liège dans le chœur de l'ancienne cathédrale Saint-Lambert, il est évident qu'il repérera un seul endroit sur une place où, hormis son nom et quelques symboles historiques, il n'y a plus aucun édifice religieux.

A. Relations identitaires étendus

Les quelques exemples précédents nous amènent à une réflexion plus structurée quant aux différents états identitaires que nous souhaitons modéliser. Ces différents états feront, par la suite, l'objet d'une modélisation via le formalisme proposé. Il nous semble important de détailler les différents cas dans lesquels notre modèle apporte une nouvelle approche de modélisation spatio-temporelle. La Figure IV-1 représente les différentes situations que nous proposons de modéliser. Ce graphique représente l'évolution de l'identité d'un objet au cours du temps. Pour chaque instant modélisé, le cercle représentant l'identité est soit blanc soit gris. Les cercles blancs représentent un objet dont l'identité est considérée mais ne possédant

pas d'extension spatiale ou de réalité physique. Les cercles gris quant à eux représentent des objets dont l'identité est modélisée et ayant une spatialité. Lors de l'évolution spatio-temporelle d'un objet, on peut observer des phases où son identité est prise en compte alors qu'il ne possède pas de réalité physique. Trois situations se présentent : la gestion de l'identité d'un objet non encore existant (symbole 1 sur le graphique), d'un objet n'existant plus (symbole 3 sur le graphique) et la gestion de l'identité d'un objet ne possédant pas de réalité physique (symbole 2 sur le graphique). Notons que, hors de ce graphique, l'identité et l'extension spatiale des objets n'existent pas. On peut les qualifier d'inconnus (dans le futur) ou d'oubliés (dans le passé). Nous verrons par la suite que cette situation peut prendre une forme conceptuelle intéressante.

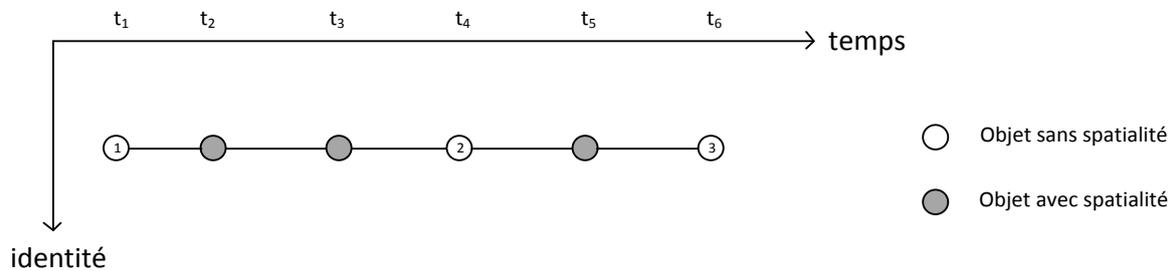


Figure IV-1 Evolution de l'identité d'un objet au travers de 6 états temporels. A l'instant t_1 , l'objet possède déjà une identité mais pas encore de spatialité ou d'extension physique. En t_2 et t_3 , l'objet existe et possède une extension spatiale. En t_4 , celui-ci perd son extension spatiale mais pas son identité. En t_5 , l'objet cesse définitivement d'avoir une extension spatiale mais conserve son identité.

i. Identité d'objets non encore existants

Dans l'esprit commun, nous raisonnons régulièrement vis-à-vis d'objets n'existant pas encore. Ces objets, qu'ils soient géographiques ou non, font déjà l'objet de relations et sont déjà pris en compte dans notre quotidien. Toute une série d'exemples relatifs à la vie humaine pourraient être exposés. Cependant, au vu des questions éthiques qu'ils soulèvent, nous ne les présenterons que très brièvement par la suite. Nous préférons en effet des exemples géographiques, architecturaux ou, d'une manière générale, des objets « non vivants ».

Lorsqu'un couple attend un enfant, il lui attribue déjà une identité. Cet « objet » ou personne fait déjà l'objet de relations vis-à-vis d'elle. Pourtant, nous ne pouvons pas dire que cette personne « existe » au sens de personne ayant une indépendance spatiale et étant maître de ses actions et de ses déplacements. Cet exemple expose la difficulté de traiter de

l'identité de personnes vivantes avant ou ne vivant plus. Ce débat est plus de l'ordre philosophique que relatif au domaine de la science de l'information spatiale.

Un autre exemple plus parlant est l'établissement d'un projet de construction. Dans ce cas, bien que le projet n'ait pas encore de réelle extension spatiale, nous lui attribuons déjà une identité. Que ce soit pour les diverses demandes de permis préalablement nécessaires à sa réalisation, pour les différentes étapes de dialogue lors de sa modélisation ou même vis-à-vis des corps de métiers concernés par les travaux, l'identité de la construction est déjà prise en compte. On voit qu'il est nécessaire de dissocier l'extension spatiale de l'identité d'un objet. Le traitement de son identité est indépendant du traitement de sa spatialité. Bien que par la suite ces deux concepts soient reliés et gérés conjointement, un traitement, uniquement relatif à l'identité, peut être proposé. Des modèles comme le « *identity based change* » (Hornsby and Egenhofer 2000) présenté précédemment fait partie de ce type de raisonnement. Dans cette approche, les auteurs travaillent sur les changements possibles de l'identité d'objets bien qu'ils ne possèdent pas systématiquement d'extension spatiale directement reliée à cette identité. C'est typiquement le cas d'immeubles en construction, de projets en cours de modélisation tels des véhicules, prévisions d'encombrements, prévisions de travaux... Toute une série d'exemples dont l'extension n'est pas comprise dans un espace géographique peuvent également être cités. En effet, si nous travaillons dans un espace virtuel comme le serait un espace juridique, une loi en cours de réflexion n'a pas encore d'identité propre (que nous pouvons postuler être son numéro d'article dans un code particulier). Pourtant elle fait déjà l'objet de réflexions, de contestations et d'aménagements. Un second exemple peut être le cas d'une personne créant un site ou un profil sur un réseau social. Celui-ci peut également déjà faire l'objet de relations et de raisonnement vis-à-vis de son identité virtuelle alors même que son profil n'est pas en ligne, ou que le site n'est pas disponible sur le réseau.

La représentation d'une telle situation spatio-temporelle à l'aide d'un espace temporel ne peut se faire à l'aide de la représentation d'une histoire spatio-temporelle. En effet, la base même de ce type de situation est que l'objet représenté n'a pas encore d'extension spatiale. Il n'est donc pas possible, bien que dans certains cas on sache où l'objet prendra place, de représenter celui-ci. Cependant, si l'on représente l'identité de l'objet au cours du temps, alors il est possible de présenter une représentation. La Figure IV-2 propose une représentation de ces diverses possibilités. L'exemple montre un phénomène dont l'identité existe avant son extension spatiale. L'objet A n'existe pas encore en t_1 mais son identité est déjà prise en considération. Il apparaît dans le monde physique en t_2 et reste dans celui-ci jusqu'en t_3 . La représentation de l'évolution spatio-temporelle de cet objet ne peut se faire parfaitement via un espace temporel. Comme le montre le schéma, il y a une impossibilité d'attribuer une position spatiale à un objet qui ne possède pas encore de réalité physique. La représentation de l'identité au cours du temps permet, quant à elle, de schématiser l'évolution d'une telle situation. Une distinction entre des objets statiques qui composent l'environnement et des objets dynamiques en mouvement dans cet environnement. Cette approche peut être utilisée

pour différencier les cas où l'identité n'est pas en relation avec une spatialité future et les cas où elle l'est. Les objets statiques pourraient se voir attribuer leur future position spatiale alors que les objets dynamiques ne pourraient pas.

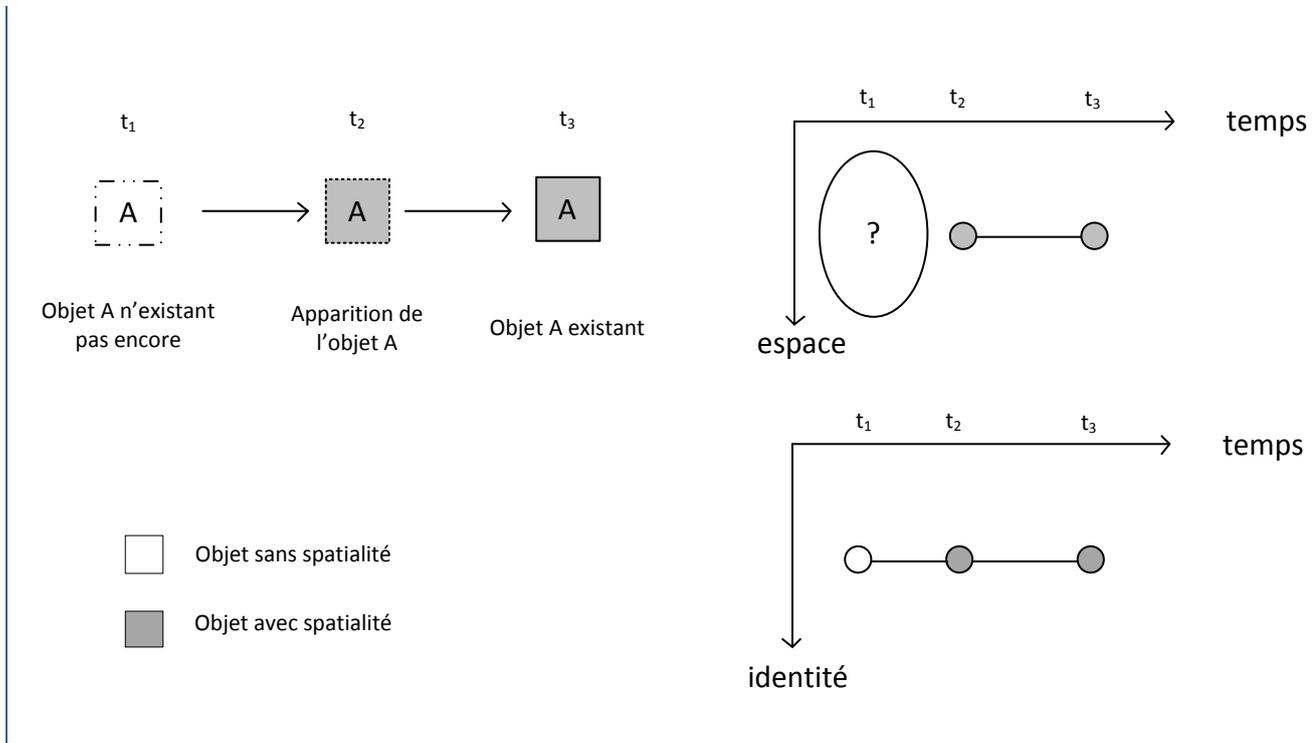


Figure IV-2 Représentation de la modélisation de l'identité d'un objet n'existant pas encore. L'identité de l'objet existe en t_1 , l'extension physique de l'objet apparaît en t_2 et perdure jusqu'en t_3 . Dans le cadre d'une représentation dans un espace temporel, la position de l'histoire spatio-temporelle avant son extension physique est inconnue. Par contre, dans le cadre d'une représentation de l'identité et du temps, l'objet peut être représenté.

Pour aller plus loin, nous pourrions nous interroger quant au commencement de ce type de représentation. Autrement dit, quand dans le temps faut-il commencer à gérer l'identité d'un objet avant qu'il n'ait une réalité physique. Si l'on considère la modélisation de l'identité d'un objet alors qu'il n'existe pas encore physiquement, nous devrions modéliser une infinité d'objets. Tous les objets qui existeront dans le futur pourraient donc déjà avoir une identité. Ceci est bien évidemment impossible. La question revient donc à se demander à partir de quand (temporellement parlant) doit-on attribuer une identité à un objet. Trois possibilités sont envisageables :

- Considérer qu'un objet possède une identité du moment où il existera un jour entraîne plusieurs problèmes. D'une part, comment prévoir et attribuer un objet

à une identité qui existera et n'existe pas encore. Cela est évidemment impossible. D'autre part, le nombre d'objets dans cette situation est extrêmement élevé voir infini.

- Considérer l'identité d'un objet dès l'instant où celui-ci est conçu mentalement, ou imaginé comme projet. Dans ce cas, le nombre d'identités à attribuer est sensiblement réduit. Cependant, rien n'empêche alors d'imaginer un objet qui n'aura jamais d'extension spatiale. Cela reviendrait à modéliser l'identité d'un objet qui n'aura jamais de réalité physique. Bien que cela semble ne pas avoir d'intérêt dans la modélisation de phénomènes géographiques, ce genre de situation peut se produire dans le monde réel. Imaginons l'exemple d'un projet non abouti de construction d'une maison. Celui-ci possède déjà une identité, il sert de point de réflexion entre l'architecte et le maître d'œuvre. Son identité est utilisée afin d'effectuer des demandes de permis, etc... Si l'aventure de l'entrepreneur tombe en faillite ou si le maître de l'ouvrage se rétracte, alors l'objet n'aura jamais de réalité physique. Son identité est gérée un temps alors que l'objet n'aura jamais d'extension spatiale. Ceci entraîne néanmoins un grand nombre de cas à considérer. Et, de plus, comment alors différencier les conceptions mentales qui n'ont pas d'intérêt de celles qui le sont suffisamment pour être prises en compte. En d'autres termes, comment faire la part des choses entre toutes les idées qui naissent de l'esprit avec celles qui sont suffisamment solides pour nécessiter la gestion de leur identité. L'utilisation d'une durée temporelle de gestion d'identité pourrait être un critère. La durée serait alors définie en fonction du type de phénomènes observés. Ainsi une idée qui ne resterait que temporairement dans l'esprit de son concepteur ne serait pas prise en compte, et une idée pérenne, qui par conséquent a beaucoup de chance d'être modélisée un jour, serait prise en compte. Ce critère de durée temporelle reste néanmoins une vision arbitraire. Cette notion arbitraire entraîne un certain nombre de problèmes au cours de la modélisation. De plus, ce n'est pas parce qu'une idée existe dans l'esprit de son auteur qu'elle est connue du monde. Nous préférons la proposition suivante.
- Considérer l'identité d'un objet du moment où il participe à une relation avec un autre objet. Cette proposition peut être vue comme la combinaison des deux propositions précédentes. Elle entraîne un nombre fini d'identités à attribuer. Des idées qui n'auront pas d'extension physique ne seront prises en compte que si elles participent à une relation avec un autre objet. Comme ces idées sont à la base d'un raisonnement, elles ont un intérêt à être modélisées. Dans le cas des entités qui auront une extension spatiale, le fait de commencer à gérer leur identité dès qu'elles entretiennent une relation, facilite la détermination du début de leur gestion. La limite temporelle du début de modélisation correspond alors à un fait sensible qui est formellement modélisable. La dernière question que l'on peut se poser reste le nombre de relations

qu'entretient l'objet. En effet, est-il nécessaire de gérer l'identité d'un objet lorsqu'il ne possède qu'une seule relation avec un autre objet ? Y-a-t-il des relations vers des objets plus importants que d'autres en fonction du type d'analyse ? Nous pensons que la réponse à cette dernière question se trouve dans l'expérience. En effet, en fonction de la modélisation, l'importance relative des objets en relation sera plus ou moins élevée. Si on traite le problème d'une description d'itinéraire entre deux personnes, l'identité d'un lieu de rendez-vous n'existant pas encore peut être prise en compte à partir du moment où cet objet est connu des deux personnes. Si, maintenant, l'idée est de proposer un modèle de navigation intégré dans un terminal mobile, la gestion de l'identité d'un objet n'existant pas encore n'aura d'intérêt que si les relations vers son identité sont suffisamment nombreuses. En d'autres termes, l'intérêt de gérer ce type d'objet n'a d'utilité que s'il est assez connu dans l'esprit commun afin de servir de point de repère. Deux exemples explicitant les situations précédentes sont d'une part la construction d'une maison unifamiliale et, d'autre part, la construction d'une nouvelle gare. La première n'est connue que des personnes discutant de l'itinéraire à prévoir. Par exemple, deux personnes peuvent s'informer ainsi : « Tourne à gauche juste après notre future maison ». La seconde doit déjà être connue d'une grande partie de la population pour être utilisable. Un système pourrait informer ainsi : « Continuez tout droit jusqu'à l'emplacement de la future gare puis tournez à gauche (même si celle-ci n'est pas encore construite) ».

Par cette description des différents cas de gestion d'identité d'objets n'existant pas encore, nous montrons toute la complexité de l'étude de cas particuliers d'évolution spatio-temporelle. Bien que la description des différentes possibilités de gestion identitaire d'objets n'existant pas encore ne soit pas formalisée, nous nous baserons sur cette discussion pour nos définitions ainsi que pour l'énonciation de critères de restrictions. Enfin, il est à noter que cette approche de gestion d'identité conditionnée à des relations permet de spécifier s'il sera utile ou pas de gérer une relation entre l'identité et la spatialité future d'un objet. En effet, la relation qu'un objet peut entretenir avec un autre peut être, soit d'ordre spatial, soit d'ordre identitaire. Si la relation concerne la spatialité, alors il sera nécessaire de relier l'identité à la spatialité. Si la relation ne concerne que l'identité, alors il ne sera pas nécessaire de prendre en compte une relation de l'identité vers une spatialité pour l'objet.

ii. Identité d'objets n'existant plus

Le raisonnement vis-à-vis d'objets n'existant plus est plus simple à concevoir. En effet, il n'y a pas de doute quant à la gestion ou pas de l'identité de tels objets car ils ont existé. Si l'on veut pouvoir prendre en compte une relation vers un objet ne possédant plus d'extension spatiale mais bien une identité, alors il faut traiter une identité pour tous les objets qui n'existent plus. Nombre d'exemples mettent ce concept en lumière. Il s'agit typiquement de

bâtiments ou de lieu détruits mais dont la présence dans l'esprit commun persiste, de personnes physiques disparues, de lois ou de taxes abrogées. Ces objets, bien que n'ayant plus de réalité physique ou d'extension spatiale, sont toujours utilisés comme points de repères, ou possèdent encore une série de relations qui pointent vers eux. Sans entrer dans le débat relatif à la fin de l'existence d'une personne, si on prend comme base qu'une personne cesse d'exister lorsqu'elle décède, alors un jeu de relations pointant vers son identité persiste. Cette personne reste redevable de taxes, d'impôts divers, de dettes contractées, de lieux lui étant associés, etc... Si l'on considère des exemples géographiques, nous pouvons citer :

- d'anciennes frontières (le mur de Berlin, le mur de l'Atlantique),
- d'anciens pays (la Birmanie, l'Indochine, la Perse, la Yougoslavie,...),
- d'anciens points marquants (le WTC, la Cathédrale Saint-Lambert),
- des lieux où ont eu lieu des événements marquants (la plaine de Waterloo, le site d'escalade de Marche-les-Dames, ...),

Ces lieux servent tous d'éléments structurants de l'espace géographique, à tout le moins pour des relations spatiales de positionnement, de prévision d'itinéraires, historiques, de planification, etc...

De la même manière que précédemment, ce type d'état d'identité peut être représenté dans un espace temporel (Figure IV-3). Dans ce cas, une distinction entre l'histoire spatio-temporelle de l'objet durant sa phase d'existence avec celle de l'objet durant sa phase de non existence doit être faite. Une question persiste quant à la spatialité de tels objets. Quelle spatialité attribuer à un objet n'existant plus ? Et donc, quelle spatialité représenter d'un objet ne possédant plus de réalité physique ? Deux approches sont envisageables. Premièrement, pour des objets physiques pérennes, comme des constructions, des frontières ou pays, il semble logique que, bien que l'objet non existant n'ait plus réellement de spatialité physique, l'identité de l'objet reste en relation avec la dernière spatialité de son existence. Les relations pointant vers ces objets sont de l'ordre du positionnement géographique plus qu'identitaire et l'association d'une spatialité à ceux-ci est donc intéressante. Mais qu'en est-il des objets plus éphémères ou de ceux dont la spatialité était changeante lors leur existence ? Ces objets sont typiquement des personnes, des véhicules, etc... L'approche la plus simple consiste à les traiter comme les cas précédents et à garder leur dernier lieu de présence spatiale en relation avec leur identité. La seconde possibilité consiste à ne plus gérer de spatialité de tels objets. Dans ce cas, des relations spatiales ne pourront plus être réalisées vers ces objets et l'intérêt de les gérer à des fins de raisonnement spatial devient tout relatif. La Figure IV-3 propose la représentation d'une telle situation via un espace temporel et via la schématisation de l'identité de l'objet au cours du temps.

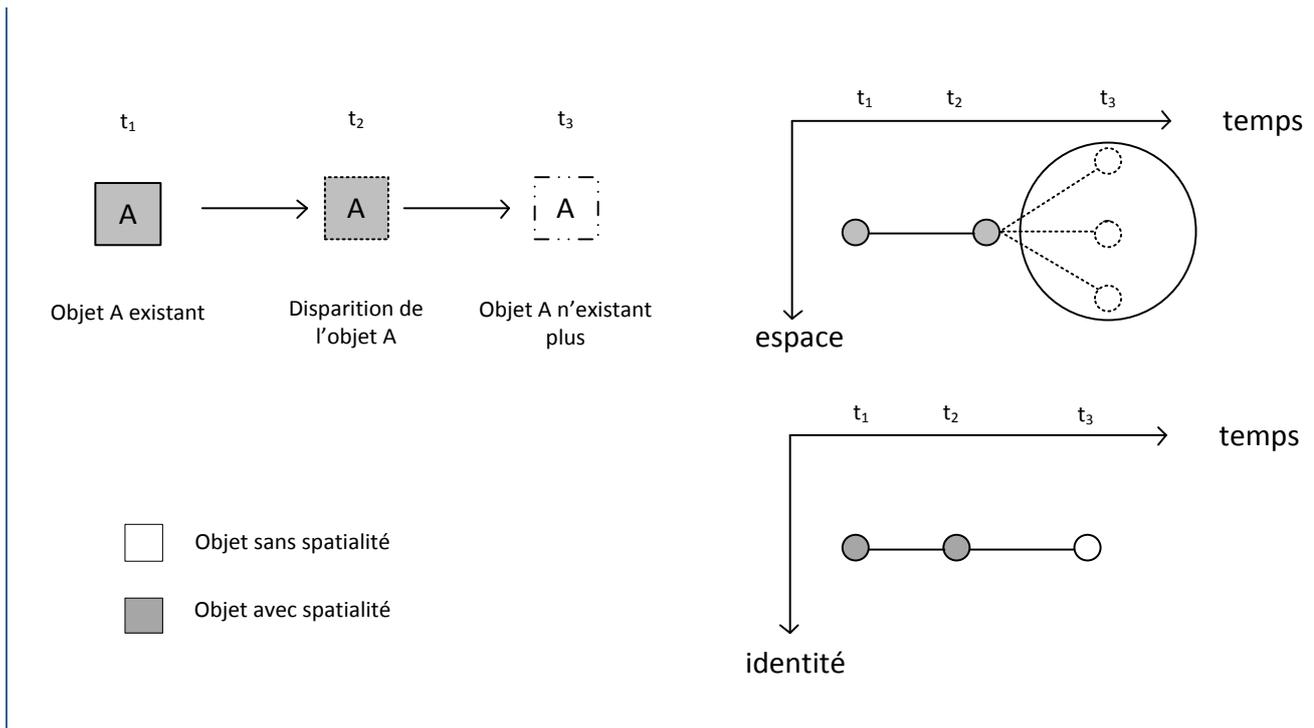


Figure IV-3 Schématisation de l'évolution spatio-temporelle d'un objet existant puis n'existant plus dont on continue à gérer l'identité. En t_1 , l'objet A existe, il cesse d'exister en t_2 et n'existe plus en t_3 . La représentation de cette évolution via un espace temporel conduit à une interrogation quant à la spatialité à attribuer à l'objet A en t_3 . La représentation de son identité au cours du temps permet de visualiser le phénomène.

La question de la durée pendant laquelle gérer ce type d'objet ne possédant plus d'extension physique peut alors être abordée. La question pourrait être traitée exactement comme l'inverse de la situation des objets ne possédant pas encore de réalité physique. Ce cas fait appel à un concept bien plus connu : « l'histoire ». Nous enregistrons l'ensemble de l'information passée et n'existant plus comme mémoire de nos civilisations. Nous gardons ainsi en quelque sorte l'identité de tous les événements et objets qui semblent importants à nos yeux. Le critère qui définit si un objet ou un événement doit faire l'objet d'un travail de mémoire est à nouveau lié au nombre de relations que cet objet a entretenues ou entretient toujours avec son entourage. En effet, plus un objet ou un événement possède de relations, plus celui-ci sera important. Un objet comme la « station spatiale MIR » a entretenu durant son histoire une relation de connaissance avec un très grand nombre de personnes. De plus, sa position spatiale a été longuement étudiée. Bien que n'existant plus physiquement, l'identité de celle-ci continue à perdurer dans l'esprit commun. L'ensemble de ces relations perdurant dans le temps forment ce que l'on nomme communément l'« histoire » de l'objet. Certains événements ou objets qui n'ont pas suffisamment de relations ne peuvent pas être considérés comme faisant partie de l'histoire connue. En effet, si on brûle un objet tel une feuille de papier, l'identité de celle-ci sera rapidement oubliée (il n'y aura plus de relations vers l'objet)

et donc non gérée. L'objet possède au moment de son envoi une relation de connaissance entre la personne qui l'écrit et celle qui la reçoit. La destruction de l'extension physique de l'objet favorise la rupture des relations qui pointent vers cet objet. Bien que nous conservions la mémoire, donc l'histoire de cette lettre durant un certain temps, nous finirons par l'oublier. Son identité sans son extension spatiale n'a donc pas d'intérêt à être gérée et est oubliée. Nous montrerons par la suite que l'objet entre dans ce que l'on nomme « *la boucle de l'oubli* ». L'oubli de l'identité de la lettre est également dû au fait que peu de gens ont connaissance de cet objet. Par contre, si l'on considère un objet très célèbre tel le « *World Trade Center* » de New York, l'objet et l'événement qui a entraîné sa disparition fait l'objet d'une véritable connaissance commune. L'esprit commun de l'ensemble de la population entretient des relations vis-à-vis de cet objet et de cet événement. Il y a donc tout intérêt à modéliser l'identité d'un tel objet même une dizaine d'années après sa disparition. La destruction de celui-ci n'entraîne qu'une disparition très lente des relations qui pointent vers celui-ci.

Notons que, dans un cadre tout à fait abstrait, une identité détruite, ou oubliée d'un objet pourrait être reconstruite. L'objet sortirait alors de la boucle de l'oubli. Il s'agit typiquement du cas des découvertes archéologiques. Elles mettent en lumière des objets géographiques ou non qui ont fait l'objet d'une extension spatiale ou d'une réalité physique dans le passé et qui après leur destruction ont été oubliés. Ce n'est que par la suite de recherches et de fouilles que l'histoire de ces objets est redécouverte. Il est donc à nouveau nécessaire de gérer une identité pour ces objets disparus. Cependant, nous pouvons nous questionner quant à la valeur de l'identité à leur attribuer. Est-ce que l'on attribue une nouvelle identité à ces objets ou est-ce qu'on leur attribue à nouveau exactement la même identité ? Dans le cadre strict de notre travail, nous n'aurons pas à gérer ce type de cas archéologiques. Une solution conceptuelle sera néanmoins énoncée par la suite. Cette réflexion nous amène à un critère de restriction supplémentaire qu'est la non-résurrection d'objets. Nous détaillerons cette notion à la section H.

Ces différentes approches de modélisation pourraient être partiellement résolues à l'aide des modèles actuels travaillant sur des relations spatio-temporelles identitaires tel que celui proposé par Hornsby. Cependant, nous pensons que les critères utilisés dans ces travaux sont trop restrictifs et qu'une réelle explication des phénomènes observés n'y est pas donnée. De plus, nous proposons également de gérer des cas supplémentaires d'évolution d'identité spatio-temporelle.

iii. Identité d'objets « non présents »

Certains objets n'ont pas une présence continue dans le temps. Si l'on s'en réfère aux premières modélisations de la course du Soleil, les hommes considéraient que celui-ci mourait tous les soirs et qu'il renaissait tous les matins. L'évolution spatio-temporelle du Soleil était donc vue comme une succession d'états d'existence et d'états de non-existence. De plus, ces civilisations déifiaient le soleil. On peut donc raisonnablement supposer qu'il était vu avec une identité unique. Une nouvelle identité n'était alors pas attribuée quotidiennement à chaque

« nouveau » soleil. Sans le savoir, ces civilisations étendaient déjà le concept d'identité. Afin d'expliquer conceptuellement cette situation, un concept de résurrection doit être pris en compte. Le soleil possède la même identité, il ressuscite tous les matins après une phase de non-existence durant la nuit. Les savants grecs de l'antiquité puis, au cours du XV^{ème} siècle, Nicolas Copernic puis Galilée ont montré que le soleil ne « mourait » pas chaque soir. Leur recherche nous apprend que notre champ de vision est simplement dirigé ailleurs du fait de la rotation de la terre et que en conséquence, le soleil nous est masqué. Un concept de résurrection quotidienne n'est plus nécessaire afin de modéliser cette situation. Dès lors, nous proposons d'introduire le concept de « *présence* » et, son contraire, le concept d'« *absence* » (ou « *non-présence* »). Le soleil possède une succession de phases de présence durant le jour et de phases d'absence durant la nuit. L'astrophysique nous apprend qu'en plus de ces phases d'absence et de présence, il faut considérer un réel commencement d'existence du soleil (lors de sa création) et une phase de non-existence (lors de son explosion future). Il s'agit bien de phénomènes différents qu'il faut conceptualiser de façons différentes.

Un autre exemple, plus géographique, de ce type d'existence est le cas d'un marchand ambulante. Supposons que celui-ci s'installe trois soirs par semaine sur une place. Dans l'esprit commun, celui-ci peut être utilisé comme point de repère à un itinéraire, alors même que l'itinéraire ne prévoit pas de passer au moment où il est présent. Certaines personnes ne connaissant pas bien les horaires de ce marchand peuvent le croire présent et planifier d'y acheter quelque chose alors qu'il n'est pas présent. Cet exemple met en avant des phénomènes périodiques dont la répétition est suffisante pour pouvoir être traités comme des cas d'existences particuliers. Le fait que le marchand ambulante ne soit pas présent n'entraîne pas sa fin d'existence et sa résurrection chaque fois qu'il revient en place. D'autres situations similaires peuvent être montrées. Certains événements n'ont pas besoin d'avoir une périodicité pour être considérés comme cas d'existence particuliers. Si un avion quitte la zone dans laquelle il est suivi par un radar, il sera considéré comme absent mais pas comme n'existant plus. Le contact radio avec l'avion peut ne pas être interrompu et être suffisant pour gérer son identité. Seule son extension spatiale n'est pas connue durant une période.

La Figure IV-4 représente ce type d'évolution spatio-temporelle avec phase de non-présence spatiale. L'objet A existe et possède une réalité physique en t_1 . En t_2 , l'information de son existence est toujours connue, l'objet possède toujours son identité. Cependant, l'information quant à sa réalité physique ou son extension spatiale n'est pas connue, ou elle n'existe pas. A l'instant t_3 , l'objet existe et possède à nouveau une extension spatiale. La représentation en espace temporel de ce type de situation pose problème à l'instant t_2 , la spatialité de l'état ne pouvant être représentée. La représentation de l'identité au cours du temps permet quant à elle de modéliser toute cette situation.

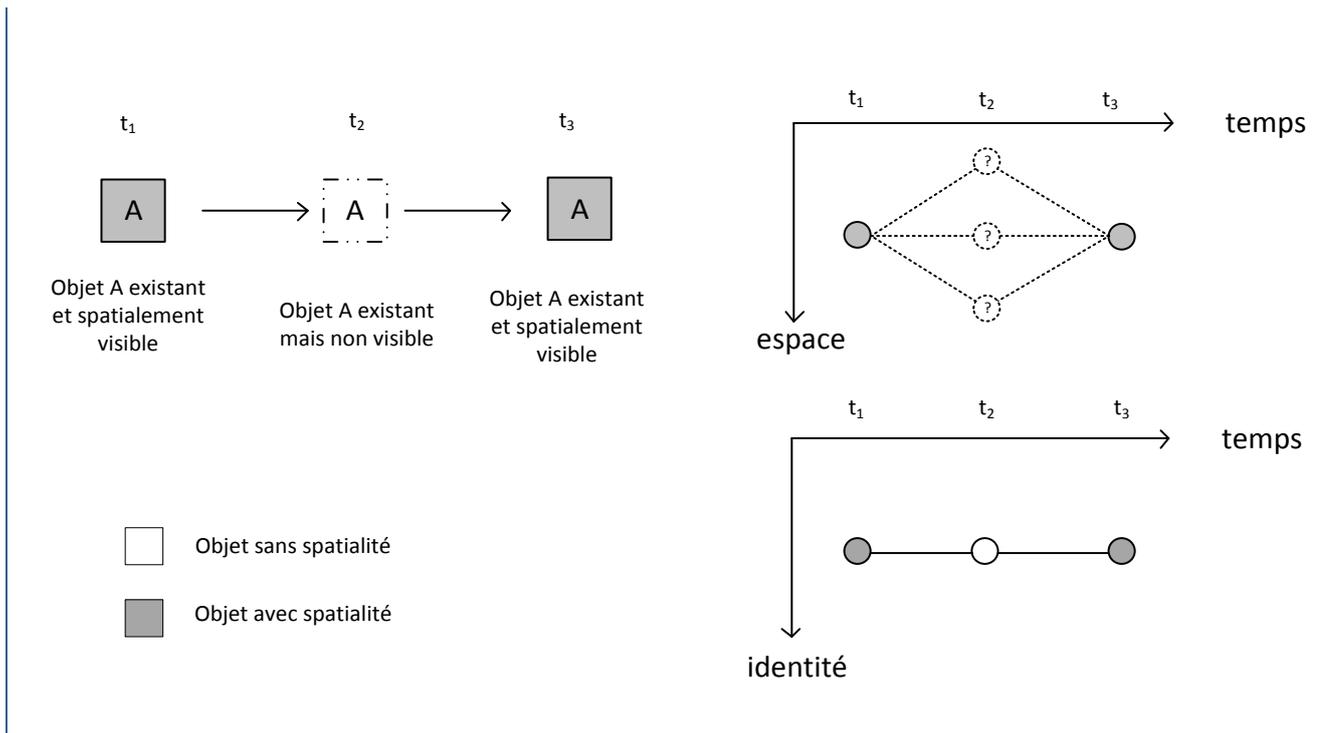


Figure IV-4 Représentation de l'évolution spatio-temporelle d'un objet A avec une phase d'existence et de non-présence en t_2 . La représentation à l'aide d'un espace temporel ne peut représenter la spatialité de l'objet en t_2 car elle n'est pas connue. La représentation de l'identité au cours du temps quant à elle permet la visualisation de l'identité de l'objet sans spatialité.

Pour aller plus loin dans l'analyse de ce phénomène, regardons plus en détail ce qui entraîne ces phénomènes de présence et de non-présence. Plaçons-nous premièrement dans une perspective d'omniscience. Dans ce cas, il est concevable d'imaginer un système pour lequel l'ensemble de l'information des objets est connue. Si l'on effectue un suivi d'un commerce ambulante, nous avons la connaissance que, lorsque celui-ci n'est pas en stationnement sur son emplacement de vente, c'est soit qu'il est en déplacement, soit qu'il est à son domicile. Si on se place maintenant dans le cadre d'une situation de connaissances traditionnelles, alors le suivi d'un véhicule peut aboutir à des situations particulières. Plaçons-nous dans l'hypothèse du suivi d'un véhicule ou d'une personne via un récepteur GNSS ; la conséquence d'une perte de signal n'entraîne pas la fin de l'existence de l'objet mais simplement le passage dans une zone (spatiale ou temporelle) où le récepteur n'est plus en mesure de recevoir le signal. *On voit donc que, en fonction de la zone d'analyse d'une personne ou d'un système, la restriction consécutive soit aux possibilités de connaissances soit à la zone d'analyse considérée entraîne des phénomènes de présence et d'absence. Ces phénomènes peuvent être vus de différents points de vue. La non-présence d'un objet dans un espace d'analyse peut être due à différentes circonstances.*

L'objet analysé est masqué par un autre. Ce genre de phénomènes bien que peu observé dans une modélisation géographique allocentrique est plus souvent observé dans des modèles égocentriques. Ces modèles sont cependant également utilisés lors de modélisations géographiques. Citons simplement le modèle de description de trajectoires proposé par Noyon (Noyon, Claramunt et al. 2007). Ce type d'analyses, souvent basé sur la vision d'un opérateur ou d'un point de vue, conduit régulièrement au masquage d'un objet par un autre durant un intervalle de temps. L'objet suivi ne cesse pas d'exister par le fait qu'il est masqué par un autre. Citons également le cas de l'analyse d'images satellitaires où certains éléments peuvent être masqués par un voile nuageux.

L'information quant à son extension spatiale n'est pas connue. Ces cas pourraient être vus comme une situation de manque d'informations. Cependant, cette situation ne peut être assimilée à des données manquantes ou erronées. En effet, nous continuons à avoir une information quant à l'existence de l'objet. Son identité existe toujours, et l'information de sa spatialité inconnue durant un intervalle de temps est quant à elle bien connue. La seule information inconnue est celle liée à sa forme et sa position. Enfin, nous savons qu'il n'est pas possible, dans certains de ces cas, de reconstruire cette information spatiale.

L'objet ne se situe pas dans la zone d'analyse. L'exemple le plus parlant de cette catégorie est le cas où l'analyse géographique est limitée à un territoire. Un objet en déplacement dans cette zone sort alors tout simplement de l'espace d'analyse et réapparaît, soit à une autre position spatiale et temporelle, soit à la même position spatiale et à une autre position temporelle (toujours dans le futur si l'axiome de succession reste considéré).

Afin de formaliser les notions de présence et de non-présence, nous introduisons le concept de « *workspace* » (espace de travail) dans le cadre de la modélisation d'états spatio-temporels. Un objet présent est défini comme inclus dans l'espace de travail, un objet non-présent est défini comme étant hors de l'espace de travail.

Les exemples spatiaux sont les plus simples à concevoir. Le masquage d'un objet par rapport à un autre, le fait qu'un objet quitte sa zone de travail sont des phénomènes que nous rencontrons couramment. Chacun des cas d'absence se présente durant un intervalle de temps, à tout le moins en fonction de la logique temporelle considérée. En toute vraisemblance, les phénomènes de non-présence peuvent être assimilés à des événements et ne sont en conséquence jamais instantanés.

B. Espace de travail (Workspace)

Comme nous venons de le montrer, la définition d'un espace de travail ou « *workspace* » permet de prendre en compte des cas de présence ou de non-présence. Cet espace de travail est chaque fois défini en fonction du phénomène observé ou du sujet de l'analyse. La définition formelle de cet espace de travail sera précisée à la section 3.C du présent chapitre.

L'espace de travail est défini à l'aide d'une ou plusieurs « *fonctions de présence* ». Ces fonctions dépendent de la modélisation en cours.

Si cette modélisation concerne un phénomène à caractère spatial ou géographique, la fonction de présence sera principalement composée d'une relation binaire précisant si la position de l'espace fait, ou pas, partie de l'espace de travail. Par exemple, dans le cas de la modélisation d'itinéraires de véhicules suivis par GPS, l'espace sous les tunnels ne fait pas partie de l'espace de travail. Le signal ne pouvant être reçu par les mobiles à cet endroit, il ne pourrait pas être transmis au système de gestion. Les fonctions décrivant l'espace de travail sont alors un ensemble de fonctions binaires renvoyant si oui ou non l'objet est dans l'espace de réception du signal GPS. Un autre exemple est celui d'une société qui suit l'évolution de ses collaborateurs en son sein. Le fait qu'un employé quitte le building de l'entreprise ne le détruit pas pour autant. Lorsqu'il est hors de l'espace de travail, il est en état de non-présence.

Comme nous l'avons déjà précisé, la modélisation en états spatio-temporels que nous proposons n'est pas exclusivement limitée à des phénomènes spatiaux. On pourrait tout à fait concevoir l'espace de travail comme un espace conceptuel pour des applications de l'Internet, de visibilité informatique, d'espace juridique, d'espace historique, d'espace mathématique, etc... Un exemple parlant à ce sujet est sans doute le phénomène des réseaux sociaux. L'identité informatique est aujourd'hui une question très discutée. Cette identité représente, en quelque sorte, le pendant de notre identité physique vue sous l'angle de sa visibilité informatique dans l'Internet. Cette visibilité passe également par la présence ou l'absence de l'inscription à des réseaux sociaux tels Facebook®, LinkedIn®... Dans ce cas, l'espace de travail peut être vu comme l'espace virtuel sur lequel une personne est présente ou non présente. Le fait de ne pas être présent dans l'environnement de réseau social tel Facebook® ne conduit pas pour autant à la destruction de son identité informatique et encore moins à son identité physique. En considérant une vision plus restreinte, si l'on considère uniquement le cas d'un seul réseau social, le fait de publier sur ce réseau ou d'y être connecté peut être vu comme le fait d'y être présent. Ne pas être connecté ou ne pas réagir aux événements se produisant sur ce réseau ne fait pas pour autant disparaître l'identité de la personne en question. On peut raisonnablement considérer que la fin de l'existence d'une personne sur un tel réseau correspond à sa désinscription du site ou du réseau social. Notons que comme on l'a vu précédemment, et en effectuant un parallèle entre l'espace spatial et l'espace informatique, la désinscription du réseau n'induit pas nécessairement la destruction de l'identité de la personne. Elle peut être conservée comme histoire ou plus exactement dans ce cas comme « *mémoire* ». Il est évident que les concepts de résurrections dans le cadre d'espaces informatiques ne régissent pas aux mêmes lois que celles de l'espace physique.

L'inclusion de l'espace de travail dans l'espace-temps entraîne une modification de celui-ci dans le temps. En effet, l'étude d'objets spatio-temporels dans une situation statique n'influence pas la définition des fonctions de présence et de l'espace de travail. Travailler avec des données temporellement étendues implique une modification de l'espace de travail et de

la définition de celui-ci. Imaginons, par exemple, un système d'information propre à l'île de la Réunion. Bien que le phénomène soit spatialement limité dans ce cas, l'évolution temporelle de l'île implique l'agrandissement de celle-ci à chaque nouvelle éruption du « Piton de la Fournaise ». L'espace de travail est donc en perpétuel changement. Il existe évidemment d'autres cas où l'espace de travail se modifie plus rapidement que celui d'une île. Les modifications de l'espace de travail peuvent être discrètes, comme dans le cas de l'achat d'un nouvel espace de travail pour une société, ou continues comme dans le cas d'une érosion d'une plage etc... Si l'on examine le cas des systèmes égocentriques, où l'espace de travail est défini comme la vision d'un opérateur, à chaque mouvement de celui-ci, l'espace de travail sera redéfini afin de correspondre à son champ de vision, champ d'audition, champ olfactif... Cette notion de temporalité de l'espace de travail implique deux choses. Premièrement, il est nécessaire de considérer le temps dans les fonctions des définitions de l'espace de travail. Deuxièmement, si la temporalité de l'espace de travail est mal définie, il peut arriver que des phénomènes ne soient pas observés. Une restriction trop forte tant spatiale que temporelle de l'espace de travail peut avoir des conséquences néfastes pour l'analyse. Certains objets peuvent être exclus de la zone d'analyse alors qu'ils y sont réellement.

C. Spatialité des états spatio-temporels

La définition de l'état spatio-temporel d'un objet existant et possédant une extension spatiale pourrait également prendre en compte une primitive géométrique. Cette possibilité est cependant plus intéressante lors de la modélisation de relations entre états spatio-temporels tels qu'abordés au Chapitre I. Notre définition de l'état spatio-temporel d'un objet restera donc à un niveau d'abstraction qui n'inclut pas de primitives géométriques. De cette manière, les états spatio-temporels peuvent être appliqués sans modification préalable à d'autres domaines que l'analyse géographique. Nous introduirons un modèle de relation spatiale lors de la combinaison d'états spatio-temporels. De cette manière, nous serons en mesure d'analyser la relation spatiale entre deux objets durant leur phase de présence commune. Cependant, nos définitions des états spatio-temporels étant basées sur la théorie des ensembles, elles peuvent être facilement adaptées à la représentation géométrique la plus primitive que sont les ensembles.

3. Définition formelle de l'état d'un objet

Les différentes notions relatives à l'évolution d'un objet et de son identité au travers de l'espace et du temps doivent être formalisées. Cette formalisation passe par l'écriture mathématique des différents axiomes et prédicats que nous utilisons afin de représenter l'état spatio-temporel d'un objet. Cependant, la définition de ces états ne peut être effectuée sans préciser au préalable dans quel cadre elle est réalisée. Plusieurs étapes sont, dès lors,

nécessaires avant de fournir une définition formelle d'un état spatio-temporel. Ces étapes consistent premièrement en la définition d'une logique temporelle et d'une logique d'objet. Ces deux logiques jettent les bases de notre modélisation. Elles vont définir notre vision du temps et notre vision de la représentation d'un objet. Il est évident que nous ne créons pas une nouvelle logique temporelle et d'objet pour notre travail ; nous partons de logiques déjà reconnues au niveau scientifique. Une fois ces deux logiques exposées, il est nécessaire de définir notre concept d'espace de travail (workspace). Finalement nous aborderons les axiomes définissant les états spatio-temporels identitaires d'un objet.

A. Logique temporelle

La logique temporelle utilisée est principalement reprise des travaux de Galton (Galton 1995), eux-mêmes inspirés de l'axiomatisation de Van Benthem (voir Chapitre II.4.B.i). En effet, Galton propose une modélisation temporelle hybride entre les logiques basées sur des instants et des intervalles de temps. Cette logique permet donc d'être appliquée quels que soient les prédicats de base de la représentation temporelle. La primitive temporelle considérée est l'instant. Posons que \mathcal{T} est un ensemble des instants T . La relation $<$ porte sur les instants et signifie la succession temporelle des instants. L'ensemble est défini comme :

$$\mathcal{T} = (T, <) \quad (4.1)$$

De plus, posons également que si t , u et v sont des instants alors :

$$\begin{aligned} t \leq u &\triangleq (t < u) \vee (t = u) \\ t < u < v &\triangleq (t < u) \wedge (u < v) \end{aligned} \quad (4.2)$$

La définition (4.2) exprime le sens du prédicat \leq comme, soit la précédence temporelle, soit l'égalité temporelle de deux instants. Elle exprime également la combinaison possible du prédicat $<$ sur plus de deux instants.

Les propriétés temporelles que nous considérons sont les suivantes :

- L'irréflexivité (IRR). Aucun instant ne se précède :

$$\forall t \neg(t < t) \quad (4.3)$$

- La transitivité (TRA). Si un instant t précède un instant u , qui lui aussi précède un instant v , alors t précède v :

$$\forall t, u, v ((t < u < v) \rightarrow (t < v)) \quad (4.4)$$

- La linéarité (LIN). Pour chaque jeu de deux instants distincts, un précède l'autre :

$$\forall t, u ((t \neq u) \rightarrow (t < u) \vee (u < t)) \quad (4.5)$$

- La non-limite (UNB). Pour chaque instant, il existe un instant qui le précède et un instant qui le suit :

$$\forall t \exists u, v (u < t < v) \quad (4.6)$$

- La densité (DEN). Entre deux instants, il existe toujours un instant qui ne leur est pas égal :

$$\forall t, u ((t < u) \rightarrow (t < v < u)) \quad (4.7)$$

La notion d'intervalle de temps est définie sur base des instants. Ils sont définis à l'aide d'un couple de deux instants. Les propriétés courantes que l'on observe pour les instants peuvent être dérivées des axiomes précédents. Il s'agit du fait qu'un intervalle peut précéder, débiter, diviser, terminer ou suivre un autre intervalle. Ces notions sont en réalité les différentes possibilités de relations entre intervalles définies dans le formalisme temporel de Allen. Un intervalle i est donc une paire ordonnée d'instants t et u tels que :

$$i \triangleq \forall t, u (t < u) \rightarrow \langle t, u \rangle \quad (4.8)$$

Les prédicats propres aux intervalles de temps sont :

- Débute (BEG). Qui représente l'instant à partir duquel l'intervalle débute :

$$\forall i = \langle t, u \rangle \rightarrow Beg(i) = t \quad (4.9)$$

- Termine (END). Qui représente l'instant à partir duquel l'intervalle est terminé :

$$\forall i = \langle t, u \rangle \rightarrow End(i) = u \quad (4.10)$$

- Limite (LIM). Qui représente soit l'instant qui débute ou qui termine l'intervalle. On dira que l'instant t limite l'intervalle i :

$$\forall i = \langle u, v \rangle, t (Lim(t, i) \rightarrow (t = Beg(i) = u) \vee (t = End(i) = v)) \quad (4.11)$$

- Divise (DIV ou \sqsubset). Représente le fait qu'un instant divise un intervalle en deux sous-intervalles. On dira que l'instant t divise l'intervalle i :

$$\begin{aligned} \forall i = \langle u, v \rangle, t (Div(t, i) \rightarrow (Beg(i) < t < End(i))) \\ \forall i = \langle u, v \rangle, t (t \sqsubset i \rightarrow (Beg(i) < t < End(i))) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Dans ce cas, l'intervalle est divisé en deux sous-intervalles contigus et on a que :

$$\forall i = \langle u, v \rangle, t (t \sqsubset i \rightarrow \exists \langle Beg(i), t \rangle \wedge \exists \langle t, End(i) \rangle) \quad (4.13)$$

L'intervalle de temps compte une infinité d'instant, il peut également être défini comme l'ensemble des instants qui le divisent. D'autres prédicats peuvent s'appliquer aux intervalles de temps. Notamment les différents types de successions qu'il peut exister entre deux intervalles de temps :

- La succession immédiate, au cours de laquelle le premier intervalle de temps « touche » le second.

$$\langle t, u \rangle | \langle v, w \rangle \triangleq u = v \quad (4.14)$$

- La succession retardée, au cours de laquelle le second intervalle succède au premier avec un intervalle de temps entre les deux.

$$\langle t, u \rangle < \langle v, w \rangle \triangleq u < v \quad (4.15)$$

- La succession générale, qui reprend les deux possibilités ci-dessus.

$$\langle t, u \rangle \triangleleft \langle v, w \rangle \triangleq u \leq v \quad (4.16)$$

Les relations temporelles établies par Allen peuvent être représentées à l'aide de ce formalisme. En effet, la description des relations entre les instants composants les limites d'intervalles de temps suffisent à rendre compte des 13 relations temporelles. En considérant les intervalles de temps i et j et les instants t, u, v, w on a que :

$$\begin{aligned} i \text{ before } j &\triangleq i < j \\ i \text{ meets } j &\triangleq i | j \\ i \langle t, u \rangle \text{ overlaps } j \langle v, w \rangle &\triangleq t < v < u < w \\ i \langle t, u \rangle \text{ starts } j \langle v, w \rangle &\triangleq t = v \wedge u < w \\ i \langle t, u \rangle \text{ during } j \langle v, w \rangle &\triangleq t \sqsubset j \wedge u \sqsubset j \\ i \langle t, u \rangle \text{ equals } j \langle v, w \rangle &\triangleq Beg(i) = v \wedge End(i) = w \end{aligned} \quad (4.17)$$

Les relations « before », « meets », « starts », « during » peuvent être inversées afin d'obtenir les 13 relations de Allen. La relation « equal » est quant à elle symétrique.

B. Logique objet

De la même manière que nous avons défini une logique temporelle, il est nécessaire de définir une logique de modélisation d'objets afin de rendre compte de l'état spatio-temporel de ceux-ci. La logique que nous adoptons est également assez répandue en intelligence artificielle, elle fait suite aux travaux de Allen (Allen 1984) et de Galton (Galton 1995; Galton 2000). Les objets considérés dans le cadre de ce travail sont soit des éléments physiques du monde réel, qui sont également appelés des « objets physiques », soit des objets abstraits qui n'ont pas de réalité dans le monde physique. Il s'agit notamment de frontières, de limites administratives, etc. Ces éléments existent par la volonté de l'homme bien qu'ils soient souvent matérialisés physiquement dans le monde ; ces limites sont appelées « objets abstraits ». Nous nous basons sur la différenciation proposée par Smith afin d'établir la différence entre ces deux types d'objets « *fiat* » et « *bona fide* » (voir Chapitre II.2.A). La modélisation que nous proposons ne se limite pas à des objets géographiques. Elle reste valable dans n'importe quel cadre de modélisation d'information. C'est une des raisons pour lesquelles nous n'incluons pas directement de définition de spatialité dans les états spatio-temporels d'un objet. Nous nous contentons d'agir sur l'identité de ceux-ci. Ce choix est également effectué par nombre de raisonnements sur les objets. Citons notamment Hornsby qui précise que « *la connaissance minimale afin de raisonner sur des objets est leur identité*¹⁷ » (Hornsby and Egenhofer 2000).

Une logique d'état est également surimposée à notre logique temporelle. Cette logique d'état permet de relier les concepts d'objets et de temps. A cette fin, nous définirons deux prédicats qui lient une propriété soit à un intervalle de temps, soit à un instant. Ces deux prédicats sont présents notamment dans le « *Situation Calculus* » (voir Chapitre II.4.C.i). Posons les deux prédicats suivants :

$$\text{Holds} - at(S, t) \triangleq t \rightarrow S \quad (4.18)$$

Ce qui signifie que l'état S est valide à l'instant t. La connaissance de ce prédicat permet de savoir qu'à l'instant t l'objet possédera l'état S. Un objet peut avoir plusieurs états. Certains états seront cependant incompatibles les uns avec les autres. Dans ce cas, la « théorie de la dominance » (Chapitre II.7.C) permet d'établir quel état prend le pas sur l'autre. Le second prédicat relie l'état à un intervalle de temps :

$$\text{Holds}(S, i) \triangleq \forall t \sqsubset i (\text{Holds} - at(S, t)) \quad (4.19)$$

La relation entre l'état et l'intervalle de temps est définie comme la relation entre l'état et l'ensemble des instants composants l'intervalle. On voit donc la raison pour laquelle notre définition temporelle est basée sur une primitive instantanée et pourquoi nous avons

¹⁷ Traduction libre.

reconstruit les intervalles sur base des instants. D'autres propriétés peuvent être dérivées de ces deux définitions. En effet, on peut montrer que tout sous-intervalle de temps j aura le même état que l'intervalle i à partir duquel il est défini. La réciproque de cette propriété est fausse. En effet, si l'intervalle j n'est pas défini sur base de l'intervalle i , rien n'indique que celui-ci possédera le même état.

$$\text{Holds}(S, i) \wedge i \sqsubseteq j \rightarrow \text{Holds}(S, j) \quad (4.20)$$

Un objet peut, durant un instant ou un intervalle de temps, posséder deux états. Cette propriété s'appelle la conjonction d'états. Cette notion, bien qu'elle puisse ne pas être possible dans certains cas, sera fortement influencée par la définition de l'état d'un objet. Si l'on considère que l'état décrit la couleur d'un objet, les états ne pourront être en conjonction. En effet, un objet ne peut être à la fois noir et blanc (pour autant que l'on décrive un objet avec une couleur unique). Si l'état décrit par exemple la fonction d'un objet, alors il peut avoir plusieurs états en conjonction. En effet, un ordinateur portable peut à la fois servir de bloc note et d'agenda personnel. Ces deux états ne sont pas incompatibles. Lorsque des relations ou des états entre objets sont définis, on recherche souvent à ce qu'elles soient mutuellement exclusives. Ceci permet d'inférer plus facilement de nouvelles connaissances sur base de ceux-ci. On constate donc que deux états sont plus souvent incompatibles l'un avec l'autre. La conjonction de deux états est notée comme $S \sqcap S'$:

$$\begin{aligned} \text{Holds}(S \sqcap S', i) &\rightarrow \text{Holds}(S, i) \wedge \text{Holds}(S', i) \\ \text{Holds-at}(S \sqcap S', t) &\rightarrow \text{Holds-at}(S, t) \wedge \text{Holds-at}(S', t) \end{aligned} \quad (4.21)$$

C. Définition de l'« espace de travail » (Workspace)

Comme expliqué précédemment l'espace de travail représente la zone dans laquelle un objet sera considéré comme présent. Dans le cadre d'une modélisation géographique, l'espace de travail sera une portion de l'espace. Cependant, d'une manière générale, lors de la modélisation d'informations, l'espace de travail pourra prendre d'autres formes en rapport avec le sujet traité. Ceci explique pourquoi notre définition de l'espace de travail se fait à l'aide de fonctions de présence et non pas directement via une fonction de présence spatiale. L'espace de travail est posé comme l'ensemble des positions de l'espace répondant à une fonction et à un instant donné. L'espace de travail est donc défini comme dépendant du temps. Comme nous l'avons montré, celui-ci peut évoluer en fonction de critères tels que la visibilité d'un opérateur ou simplement l'agrandissement ou le rétrécissement d'une zone géographique.

$$W_t \triangleq \forall x \in \mathcal{S} \rightarrow \{P_{1-N}(x, t)\} \quad (4.22)$$

L'équation (4.22) exprime que, pour tout point de l'espace, l'espace de travail est défini comme l'ensemble des points répondant aux fonctions P_{1-N} à l'instant t . Les fonctions de présence P_{1-N} peuvent être définies comme un ensemble de fonctions binaires renvoyant uniquement la position des points compris dans l'espace de travail. L'écriture mathématique d'une fonction décrivant un espace géographique n'est pas aisée. Dans ces cas, l'espace de travail sera pris comme une région géographique. La primitive spatiale que l'on peut considérer dans ce cas est le point, car l'espace \mathcal{S} est défini comme un ensemble infini de points.

Les fonctions de présence peuvent également s'appliquer à d'autres concepts que l'espace. Dans ce cas, le terme « *space* » (\mathcal{S}) ne doit pas être vu comme l'ensemble de l'espace géographique mais bien comme l'espace conceptuel dont la modélisation fait l'objet. Par exemple, si l'on modélise la présence sur un réseau social ou une présence informatique, l'ensemble des fonctions de présence peuvent être un jeu de fonctions binaires renvoyant si oui ou non l'utilisateur est connecté à un site. La définition de l'espace de travail telle que proposée s'applique également à d'autres modélisations spatio-temporelles présentées. Hornsby donne l'exemple d'un convoi passant sous un couvert forestier. Pour elle, la non-existence temporaire de ce convoi est due au fait qu'il quitte le « *domaine visuel* » de l'opérateur. Le domaine visuel correspond donc à notre vision de l'« *espace de travail* ». Dans le modèle proposé par Campos et Noyon, la visibilité d'un objet dépend du champ de vision d'un opérateur. L'espace de travail peut également rendre compte de ces situations lorsque le jeu de fonctions de présences est mis à jour en fonction du champ de vision d'un mobile.

Ceci nous amène à définir les notions de présence et d'absence. Un objet présent est un objet contenu dans l'espace de travail, un objet absent ne l'est pas :

$$\begin{aligned} \text{présence}_t &\triangleq \text{objet} \in W_t \\ \text{absence}_t &\triangleq \text{objet} \notin W_t \end{aligned} \quad (4.23)$$

L'équation (4.23) décrit les notions de présence et d'absence. Les notions d'états spatio-temporels de présence et d'états spatio-temporels d'absence sont définies à la section suivante.

D. Formalisation des états spatio-temporels d'un objet

L'état spatio-temporel identitaire d'un objet ou « *spatio-temporal states of identity* » (STS-i) peut être défini en combinant les différentes étapes que nous venons de franchir. Le STS-i est formellement défini comme « *la combinaison de l'état d'existence et de présence d'un objet dans un espace de travail à un instant donné* ». Le moyen que nous avons choisi pour appréhender ces combinaisons est une vision étendue de l'identité de l'objet. Ainsi nous proposons de gérer plus de situations identitaires afin de mieux rendre compte des différents

états d'un objet qu'il est possible de rencontrer durant son évolution spatiale et temporelle. Il existe 4 STS-i. La définition des STS-i se fait sur base de sélections à partir de l'ensemble d'identité \mathcal{I} et de l'espace de travail W_t . Ceux-ci sont définis comme :

- La non-existence. L'objet A n'existe pas à l'instant t si et seulement si, à l'instant t, il possède une identité, au moins une relation vers un objet B dans un état spatio-temporel identitaire et s'il ne possède pas d'extension spatiale dans l'espace conceptuel.

$$\#_t A \triangleq \exists \mathcal{I}, \exists \mathcal{S} (A_t \subset \mathcal{I} \wedge A_t \not\subset \mathcal{S} \wedge \exists B (r(A, B))) \quad (4.24)$$

- La non-présence. L'objet A est non présent à l'instant t si et seulement si, à l'instant t, il possède une identité et s'il n'est pas inclus dans l'espace de travail.

$$npA \triangleq \exists \mathcal{I}, W_t (A_t \subset \mathcal{I} \wedge A_t \not\subset W_t) \quad (4.25)$$

- La présence. L'objet A est présent à l'instant t si et seulement si, à l'instant t, il possède une identité et s'il est inclus dans l'espace de travail.

$$pA \triangleq \exists \mathcal{I}, W_t (A_t \subset \mathcal{I} \wedge A_t \subset W_t) \quad (4.26)$$

- La transition. L'objet A est dit en état de transition si et seulement si à l'instant t se produit la situation suivante :

$$tA \triangleq \exists \mathcal{I}, i, j, S, S' \left(A \subset \mathcal{I} \wedge \exists (i < j), \exists t \left((holds - at(A, \lim(t, i) \wedge \lim(t, j))) \wedge (holds(S, A) \wedge holds(S', A)) \right) \right) \quad (4.27)$$

La définition de l'état de transition est telle qu'un objet A est en état de transition à l'instant t si l'objet A est dans un autre état à l'instant u tel que $u < t$ et dans un autre état à l'instant v tel que $v > t$. Cette notion de transition instantanée sera démontrée lors de l'application de la théorie de la dominance.

Les états (4.24) à (4.26) ne sont pas des états instantanés. Bien qu'ils soient définis sur la base d'un instant, nous verrons qu'ils doivent nécessairement avoir une durée. Seul l'état de transition peut ne pas avoir de durée dans le temps. En effet, par la définition (4.11), $\lim(t, i) \wedge \lim(t, j)$ représente un instant. Il peut cependant être valable durant un intervalle de temps.

La définition du concept de STS-i répond à deux interrogations fondamentales que nous avons posées lors de la définition des objectifs de notre recherche. La première question qui est « comment modéliser l'état d'un objet possédant une identité mais n'ayant pas encore ou

plus d'extension spatiale ou de réalité conceptuelle » est solutionnée via l'introduction du concept de non-existence de l'objet A. La seconde question qui est « *comment modéliser l'état d'un objet perdant temporairement son extension spatiale ou sa réalité conceptuelle* » est également solutionnée via le concept de non-présence. L'introduction de l'espace de travail et la définition de la non-présence comme un suivi d'identité avec une perte de réalité physique ou conceptuelle permet d'asseoir ces différents concepts.

E. Visualisation conceptuelle

Bien que la définition des STS-i soit le meilleur moyen d'expliquer les concepts qu'ils représentent, il est possible d'en donner une vision conceptuelle. Une vision conceptuelle est une représentation géométrique des différents états spatio-temporels que peut prendre un objet durant son évolution. Si un seul objet est représenté sur le diagramme, alors les distances et tailles des sections de la droite peuvent représenter le temps. Si plusieurs objets sont représentés, alors il s'agit d'une vision conceptuelle. Cette représentation sera utilisée par la suite lors de l'application de la théorie de la dominance (voir section 4). De plus, cette représentation est également utilisée afin de dériver une représentation de « pattern » aidant à l'utilisation des STS-i.

L'évolution d'un objet peut être visualisée sur une ligne temporelle. Si l'on ne considère pas, dans un premier temps, de possibilité de non-présence, l'évolution d'un objet passe toujours par une étape de non-existence, une étape d'existence suivie elle-même par une étape de non-existence. Les étapes précédant et suivant ce cheminement sont des étapes d'oubli ou de non-connaissance. Durant ces deux étapes, l'objet n'est pas modélisé du tout. Ce schéma de vie peut être expliqué facilement par le fait que, comme l'on considère un temps infini dans le passé et le futur, il existera toujours un intervalle de temps pour lequel l'objet n'existe pas encore et pour lequel il n'existe plus. Il existe donc des points caractéristiques sur la ligne temporelle de l'évolution d'un objet. Ceux-ci sont symbolisés à la Figure IV-5.

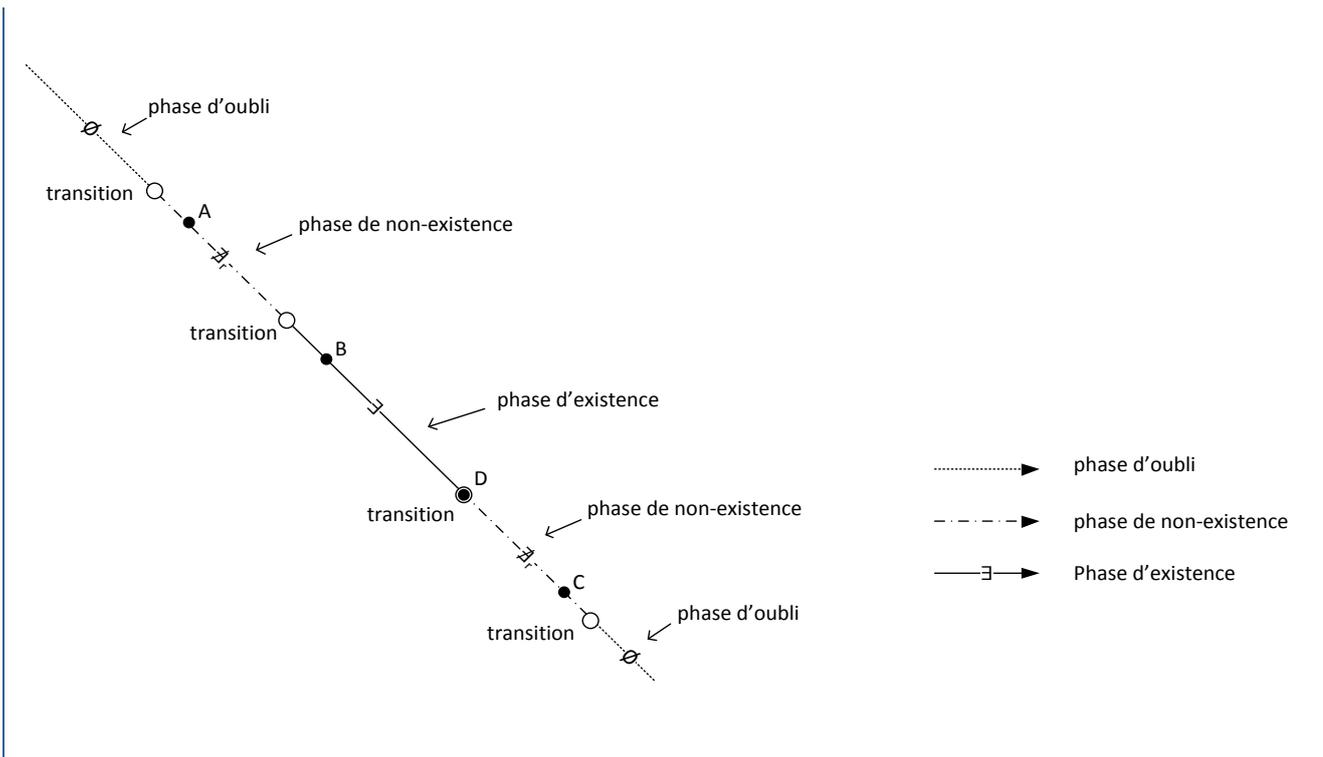


Figure IV-5 Représentation conceptuelle des différents états de l'évolution d'un objet dans un contexte spatio-temporel. Les STS-i considérés ne prennent pas en compte la présence et la non-présence. L'objet A n'existe pas encore, l'objet B existe, l'objet C n'existe plus. L'objet D est en phase de transition. Les phases d'oubli sont les périodes durant lesquelles l'objet n'est pas modélisé.

La représentation de l'évolution d'un objet montre les différentes situations par lesquelles un objet passe au cours de son évolution. L'objet A n'existe pas encore, l'objet B existe, l'objet C n'existe plus. L'objet D quant à lui est en phase de transition, il passe d'un état d'existence à un état de non-existence. Comme nous l'avons déjà précisé, cet état est instantané, c'est pourquoi il est représenté par un point sur la droite conceptuelle de l'évolution d'un objet. La droite d'évolution est orientée car, comme précisé dans notre logique temporelle, l'ordonnancement des instants rend impossible le retour dans le passé. La figure présente quatre points de transition. Par définition, ces points sont identiques, ils symbolisent uniquement le passage instantané d'un état à un autre. Les deux points de transition des phases d'existence vers les phases de non-existence étant identiques, il n'est pas logique de les représenter comme deux entités distinctes. La représentation bien qu'orientée peut donc être bouclée autour de ces deux points afin de les rendre uniques. La Figure IV-6 représente cette boucle.

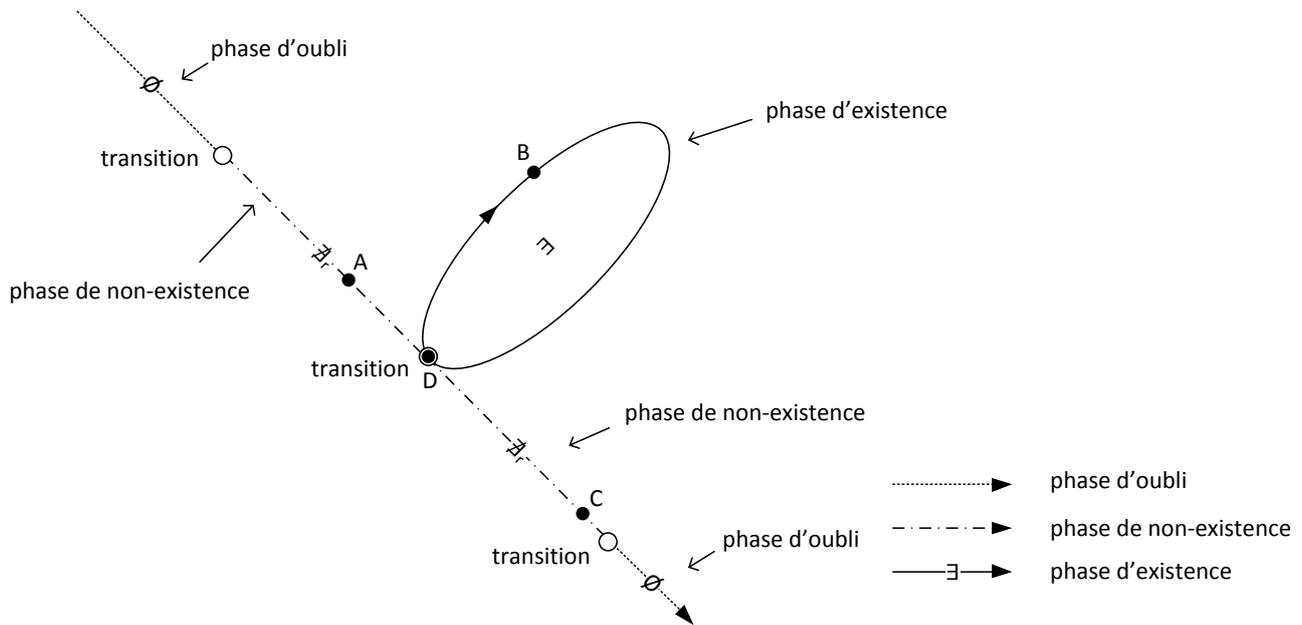


Figure IV-6 Représentation conceptuelle des différents états spatio-temporels de l'évolution d'un objet. Dans cette représentation, un seul point de transition est représenté. Celui-ci permet de passer de l'état de non-existence vers la boucle d'existence. L'objet D est en état de transition, l'objet A n'existe pas encore, l'objet C n'existe plus et l'objet B est dans la boucle d'existence. Les phases d'oubli représentent les périodes durant lesquelles les objets ne sont plus modélisés.

L'état d'existence forme, dès lors, une boucle orientée sur laquelle peut circuler l'objet B. L'objet A n'existe pas encore et va y arriver. On peut considérer que la distance conceptuelle qui sépare l'objet A du point de transition représente le temps qu'il reste avant que l'objet A n'apparaisse. L'état d'existence est ici considéré comme le regroupement des deux états de présence et de non-présence. Si l'on prend en compte cette distinction, on peut diviser la boucle d'existence en deux entités distinctes dont le point de passage reste l'état de transition. La représentation symbolise le sigle infini (∞) afin de montrer qu'il est possible pour un objet de circuler un grand nombre de fois sur les deux boucles. Notons qu'il n'est pas possible de considérer un changement infini d'état d'un objet. D'une part parce que seule la considération temporelle que nous appliquons est infinie et, de plus, selon Wolter (Wolter and Zakharyashev 2000), afin de raisonner sur des objets spatio-temporels il est nécessaire de prendre en compte un « *finite change assumption* » (un postulat de changement fini).

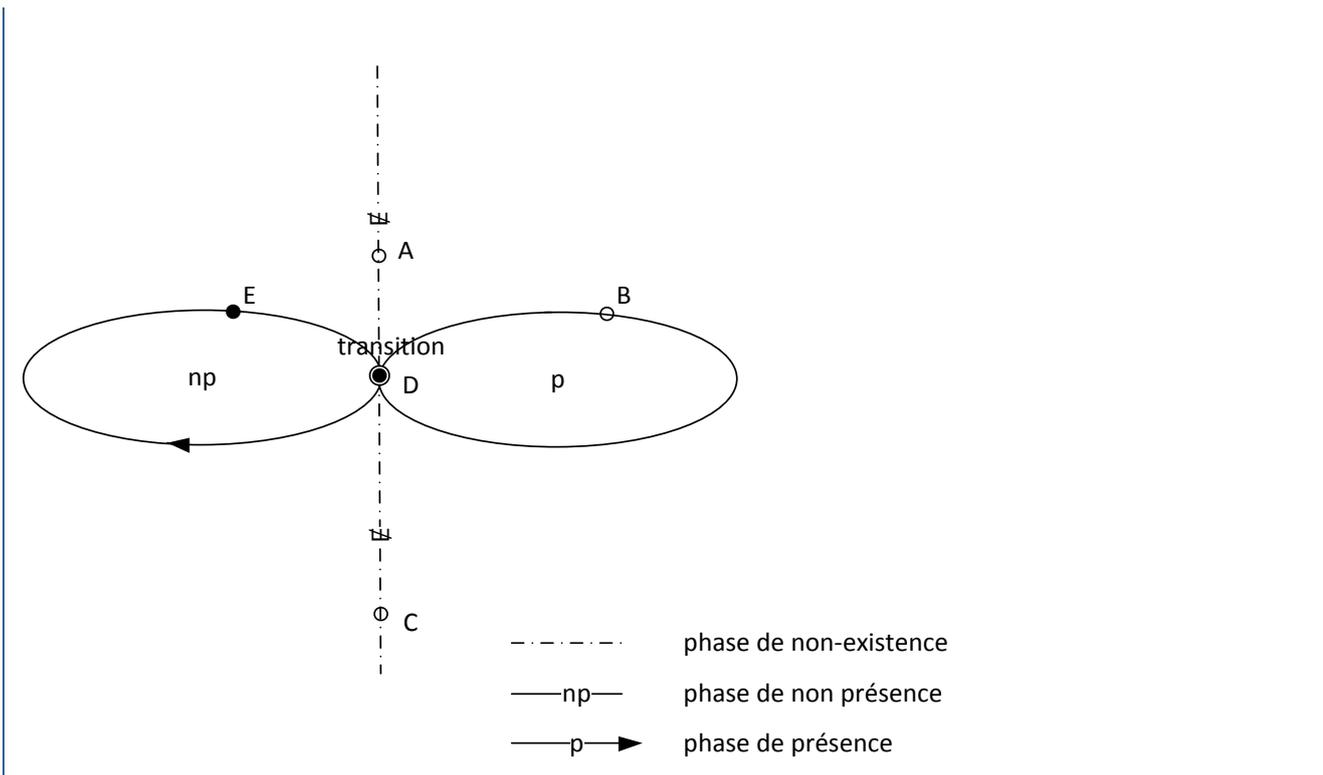


Figure IV-7 Représentation conceptuelle des différents états spatio-temporels possibles pour un objet. La figure symbolise le sigle infini afin de montrer la possibilité de traverser un grand nombre de fois les boucles de présence et de non-présence. L'objet E est en état de non-présence et l'objet B est en état de présence. Les objets A et C n'existent pas tandis que l'objet D est en état de transition. Une rotation est effectuée par rapport aux figures précédentes afin d'aider à la réalisation des patterns présentés à la section suivante.

Si l'on pousse la réflexion plus loin, d'autres représentations conceptuelles sont possibles. En effet, en tenant compte de la phase d'oubli, il est possible de modéliser les situations telles que montrées aux Figure IV-8, Figure IV-9 et Figure IV-10. La prise en compte d'une « réincarnation » possible des objets implique de représenter l'état de non-existence telle une boucle. Ainsi un objet peut retrouver une spatialité tout en gardant la même identité. La réincarnation nous apparaît comme le meilleur concept pour représenter ce phénomène. En effet, rien n'indique que l'objet possédera la même spatialité lors de son retour dans la phase d'existence, seule son identité est conservée.

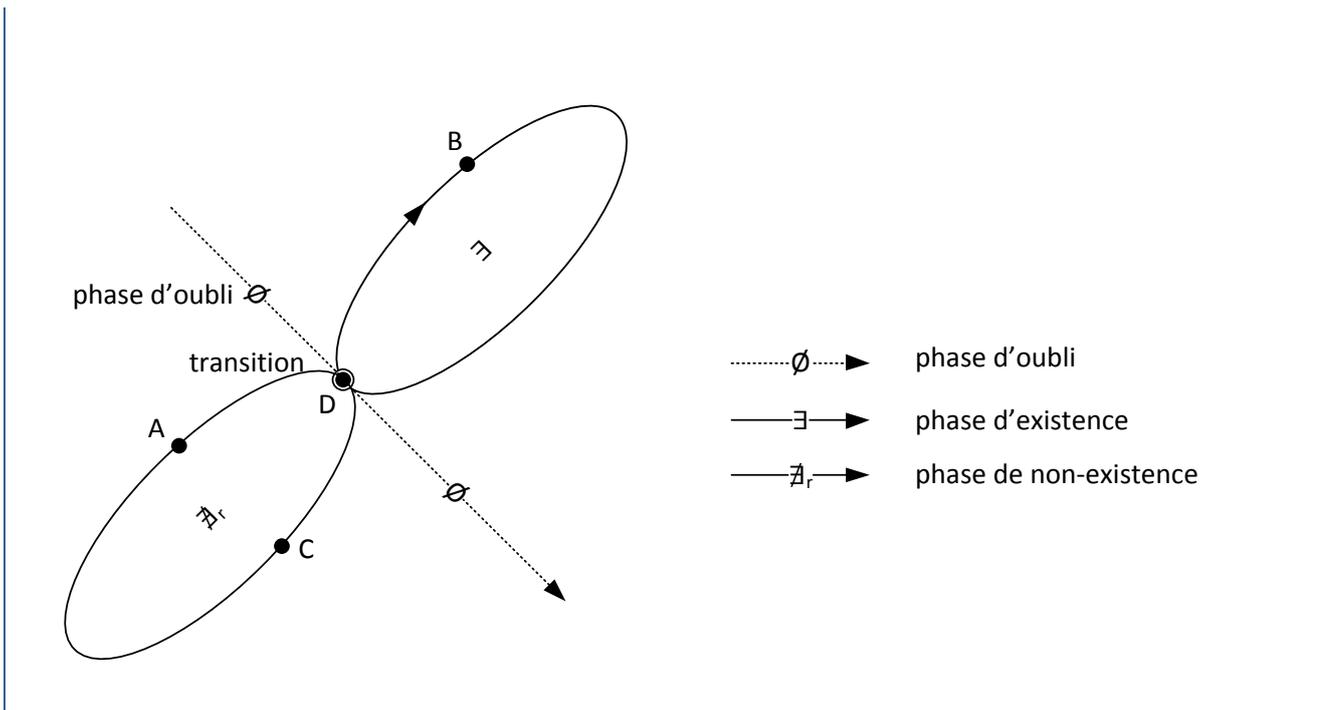


Figure IV-8 Représentation conceptuelle de l'évolution d'objets et de leur identité dans l'espace et le temps. Le graphique présente deux boucles qui sont les boucles d'existence et de non-existence ; les boucles sont traversées par la droite de l'oubli qui représente les périodes durant lesquelles l'objet n'est pas modélisé ni même connu. Comme précédemment, les objets A et C n'existent pas, le B existe, le D est en transition.

La représentation conceptuelle la plus complète que nous pourrions donner de l'état spatio-temporel d'un objet est donnée Figure IV-9. En effet, dans cette représentation figure à la fois les différents états de non-existence, non-présence, présence et transition. La non-existence est bouclée permettant ainsi la réincarnation. La droite de l'oubli traverse le point de jonction de toutes les courbes conceptuelles au point d'état de transition. Sur cette figure, on peut voir que l'objet E est non présent (donc non inclus dans l'espace de travail) et que l'objet B est quant à lui bien présent.

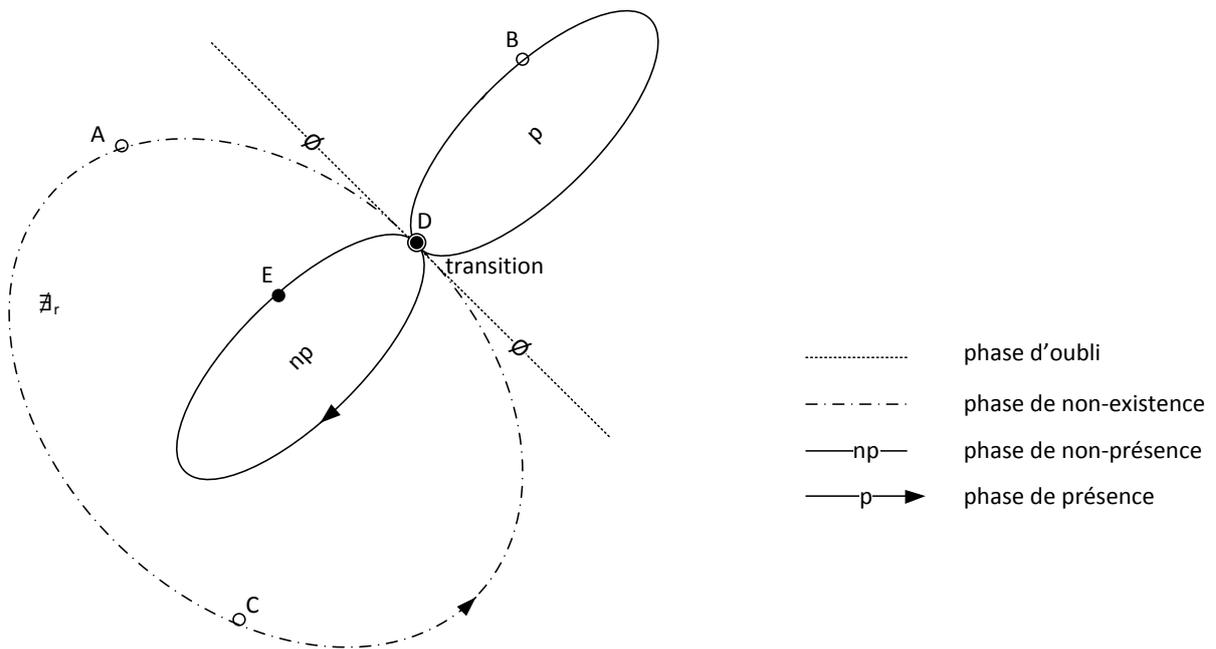


Figure IV-9 Représentation conceptuelle de l'évolution possible d'un objet et de son identité dans l'espace et le temps. La phase de non-existence est représentée en boucle. Ceci implique la possibilité d'une réincarnation pour un objet. La droite de l'oubli est quant à elle non bouclée ce qui interdit une résurrection. Les objets A et C n'existent pas, le B est présent, le D est en état de transition et l'objet E est en phase d'absence donc non inclus dans l'espace de travail.

La prise en compte de phénomènes archéologiques « redécouverts » et qui, par définition, ont été oubliés et retrouvés, peut se faire à l'aide de la représentation conceptuelle présentée Figure IV-10. En effet, dans ce cas, la droite de l'oubli est bouclée. Ce qui impose une vision cyclique du temps. Un objet peut alors se déplacer indéfiniment sur le schéma. Le point de sortie d'un objet sur le diagramme pose question. On peut raisonnablement penser qu'un objet sera indéfiniment sur la courbe de l'oubli après la destruction de sa spatialité et de son identité, et ce jusqu'à sa redécouverte. Nous pourrions assimiler ce concept à une résurrection. Cependant, des questions identitaires ou de réalité physique se posent dans ce cas et ces interrogations sont hors du cadre de notre travail.

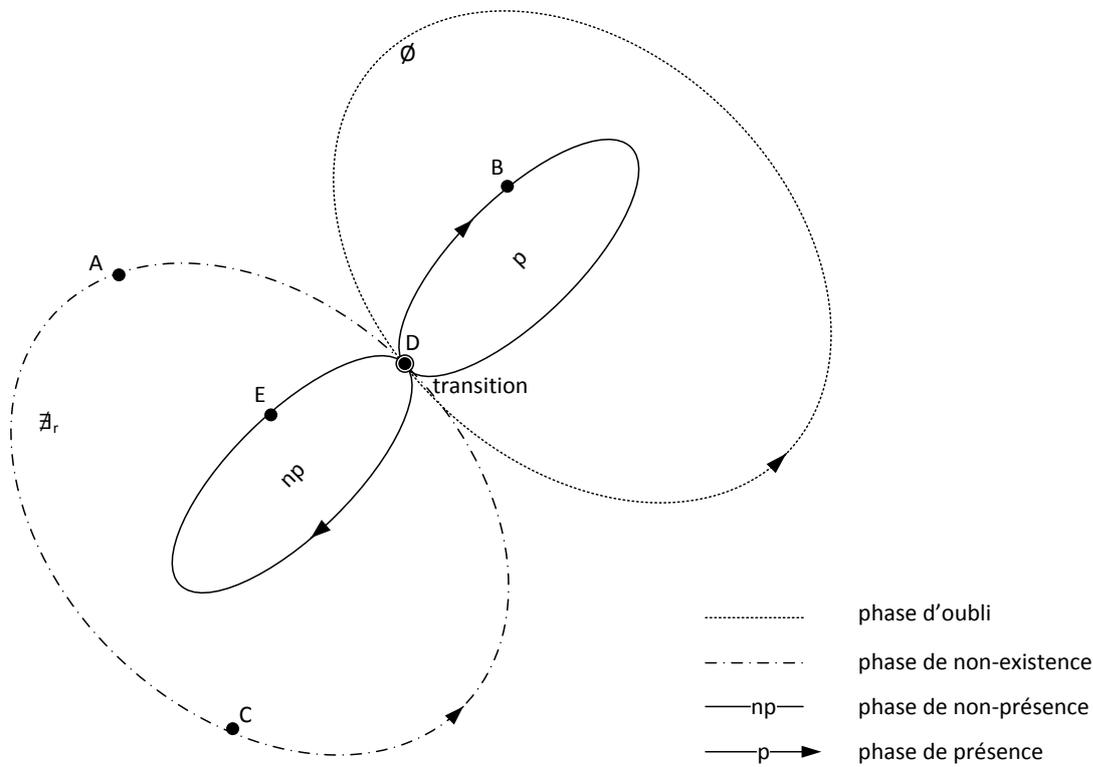


Figure IV-10 Modélisation conceptuelle de l'évolution de l'identité et de la spatialité d'un objet dans l'espace et le temps. La représentation de la phase d'oubli en boucle autorise la résurrection ou redécouverte d'un objet, la représentation de la phase de non-existence en boucle autorise la réincarnation d'un objet. Les objets A et C sont en phase de non-existence, l'objet B est présent, l'objet D est en phase de transition et l'objet E est absent.

Par la suite, nos représentations de l'espace conceptuel d'évolution d'un objet seront essentiellement basées sur les deux Figure IV-7 et Figure IV-9. Les concepts de réincarnation et de résurrection ne font pas partie des objectifs directs de ce travail. Ils feront l'objet d'une discussion lors de nos perspectives futures. La Figure IV-7 représente la situation où un objet peut être dans les 4 états spatio-temporels définis. Les phases d'oubli n'étant pas modélisées dans le cadre de travail que nous avons défini, il ne sera plus nécessaire de les symboliser par la suite.

F. Pattern représentation

La représentation symbolique des états spatio-temporels identitaires a pour but de fournir une solution visuelle et rapide à l'identification des différents états possibles pour un objet. La Figure IV-11 propose une solution de représentation des différents états. Par la suite, cette représentation pourra être surchargée de différents éléments tels un second objet ou une représentation de la durée de vie de ceux-ci. Cette base de représentation sera également utilisée pour la justification des états spatio-temporels par la théorie de la dominance.

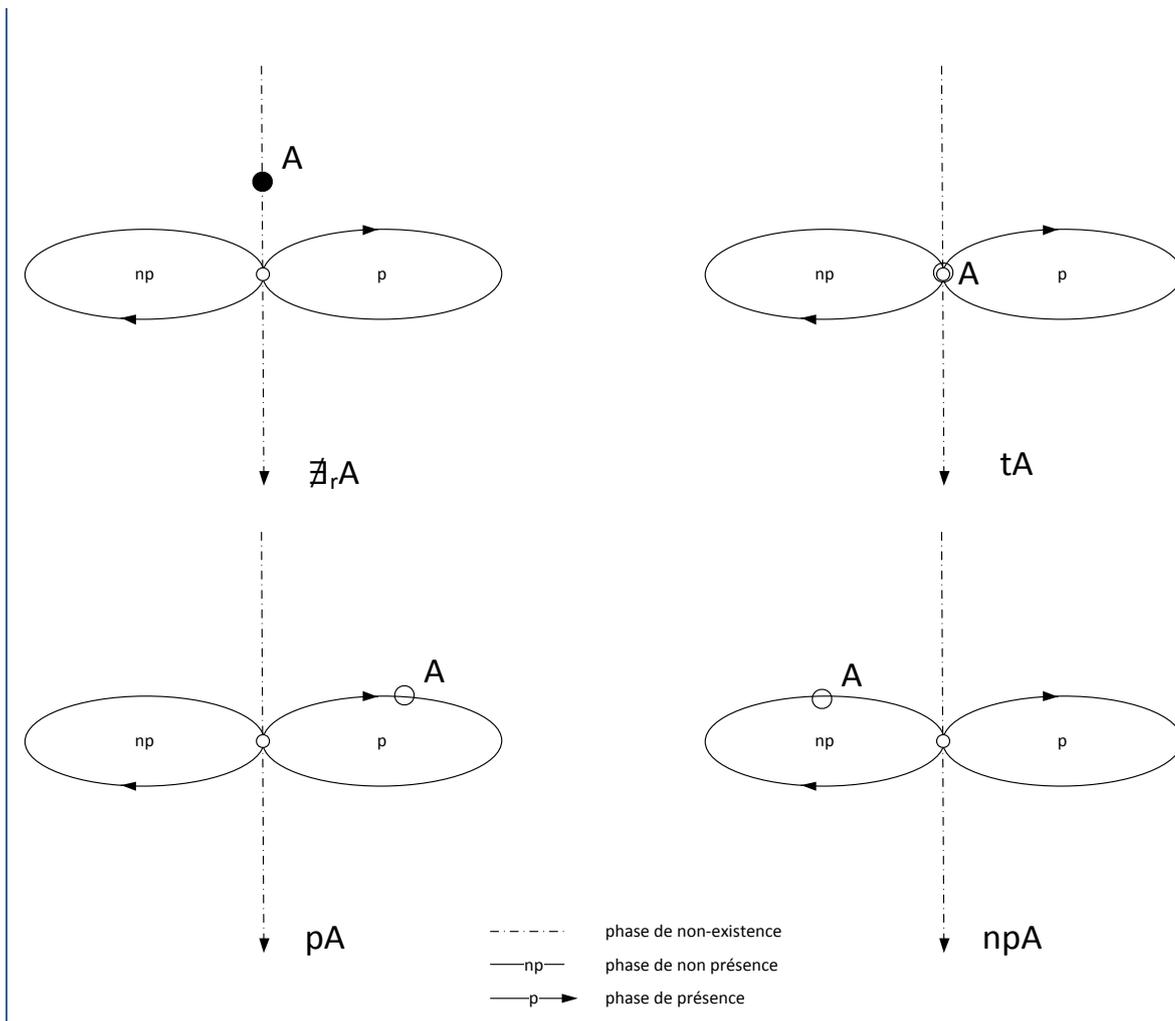


Figure IV-11 Présentation des 4 états spatio-temporels identitaires d'un objet. La symbolique est simplifiée par rapport aux espaces conceptuels présentés à la section précédente. Les 4 états spatio-temporels identitaires sont $\nexists_r A$, tA , pA , npA .

Dans le cadre unique d'une symbolisation d'états et de facilité de représentation, nous préférons une vision encore plus simplifiée des états spatio-temporels. A l'instar des symboles définis sur base des matrices de relations topologiques, nous proposons de noircir une zone lorsque l'objet y est présent et de la laisser blanche lorsque l'objet n'est pas dans ces états. La Figure IV-12 présente les 4 patterns des 4 états spatio-temporels identitaires. Trois « pétales » combinés autour d'un « cœur » fondent cette représentation. Le cœur correspond à l'état spatio-temporel de transition, le pétale supérieur à celui d'un objet non existant, le pétale inférieur gauche à celui de la non-présence d'un objet et l'inférieur droit à celui de la présence d'un objet. Cette représentation est plus basée sur la représentation conceptuelle présentée à la Figure IV-9 que sur la dernière représentation conceptuelle.

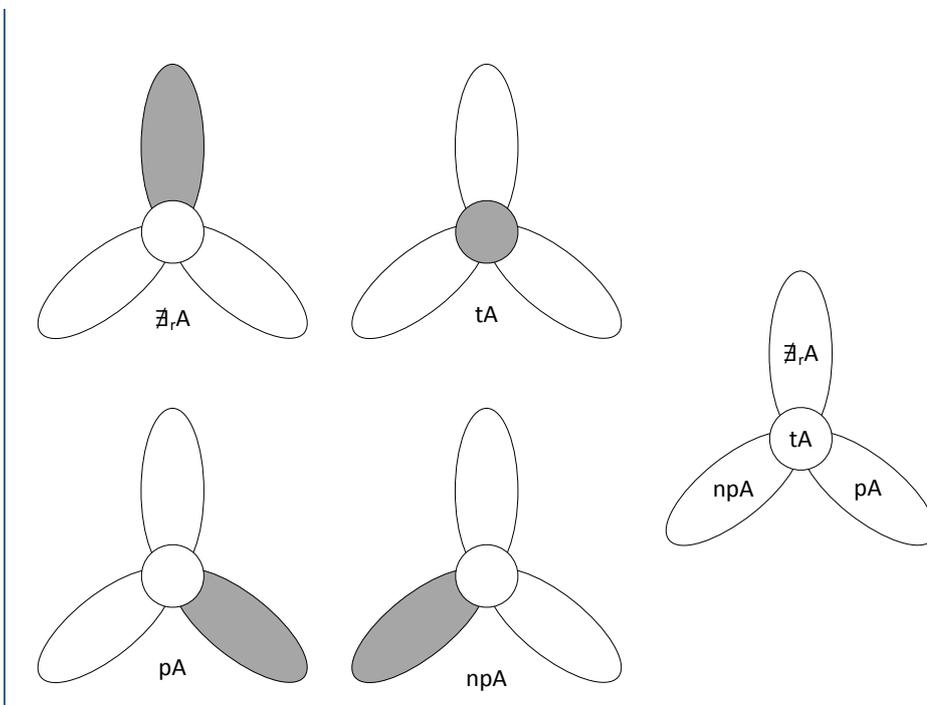


Figure IV-12 Représentation symbolique des 4 états spatio-temporels identitaires. Les pétales et le cœur colorés indiquent que l'objet est dans l'état correspondant.

G. Organisation des états spatio-temporels identitaires en arbre de décisions

Les arbres de décisions sont également un outil important quant à la réalisation d'un modèle de raisonnement. Ils permettent de définir de quelle manière une relation est obtenue et surtout de matérialiser leur position relative par rapport à des critères d'appartenance. Un arbre de décisions qui aboutit à un ensemble de relations unique fournit également la justification d'un jeu de relations disjointes et mutuellement exclusives (jointly and pairwise disjoint – JEPD).

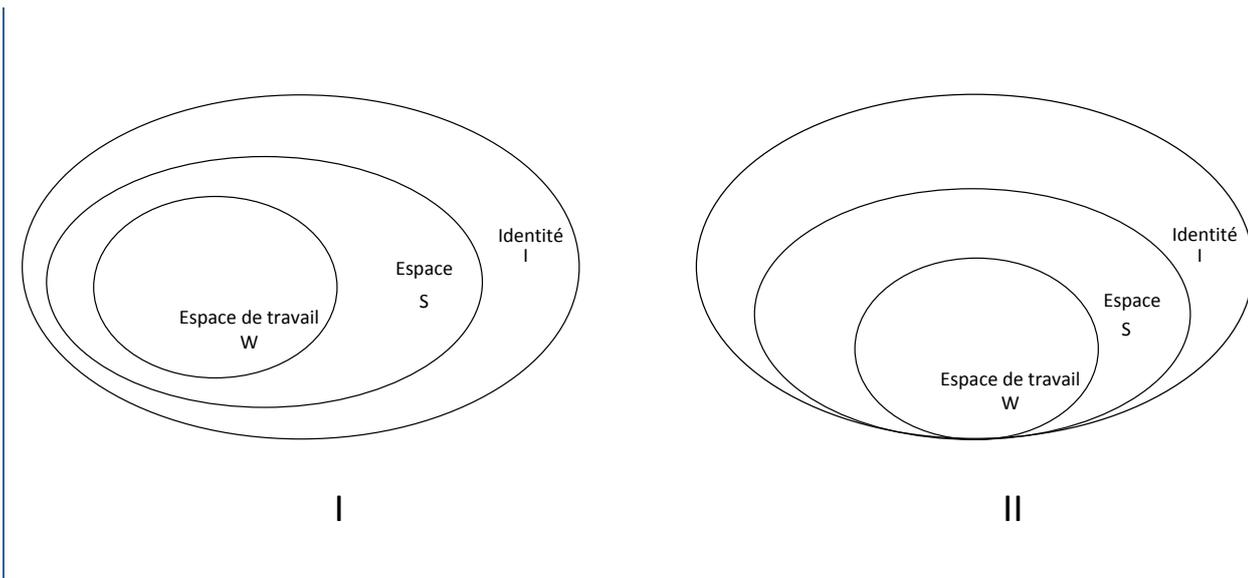


Figure IV-13 Représentation des espaces conceptuels à la base des 2 arbres de décisions. Le cas I présente l'emboîtement des trois ensembles, I, S et W étant à la base du premier arbre sans prise en compte de l'état de transition. Le cas II propose une représentation avec l'état de transition. Dans ce cas, la frontière des ensembles I, S, W est prise en compte. Cette frontière représente l'état de transition. Les trois ensembles ont une frontière commune.

L'organisation des états spatio-temporels identitaires en arbre de décisions est construite en se focalisant sur les différentes définitions de ceux-ci. Nous pouvons d'ailleurs représenter l'état spatio-temporel identitaire d'un objet comme un jeu d'ensembles imbriqués. Le premier arbre de décision que nous allons décrire est basé sur la partie I de la Figure IV-13, tandis que la seconde, sur la partie II de cette même figure. L'état spatio-temporel est assimilé à une appartenance ou pas à un jeu d'ensembles. La théorie des ensembles peut donc être à la base de l'arbre de décisions. L'arbre débute par le symbole U qui représente l'univers ou l'ensemble des états possibles.

- La première décision se rapporte au fait qu'un objet possède ou pas une identité. Ceci différencie la position d'un objet par rapport à la droite de l'oubli. Deux arbres peuvent être dressés. En effet, la prise en compte ou non de l'état de transition peut modifier l'organisation de celui-ci. Nous dressons deux arbres car la justification de l'état de transition apparaît lors du traitement de la théorie de la dominance. C'est à cette étape que nous montrerons l'utilité de gérer un état instantané de passage entre états. Considérons actuellement la transition comme le point d'intersection entre les différentes droites d'oubli, d'existence et de présence. Sur base de cette vision, un objet peut donc posséder ou pas une identité. S'il n'en possède pas, il ne sera pas modélisé et on aboutira directement à un état d'oubli.

- La seconde décision consiste en la prise en compte ou pas d'une extension de l'objet dans l'espace de travail. Si l'application concerne une application géographique, nous parlerons d'extension spatiale. Ce choix aboutit aux objets non existants. Ceux-ci possèdent une identité mais pas ou plus d'extension.
- Le troisième nœud de choix concerne la présence ou non de l'objet dans l'espace de travail. Lorsqu'un objet n'est pas inclus dans cet espace, par exemple lorsqu'il n'est pas visible dans la vue modélisée, alors l'objet sera classifié en non présent. Dans les autres cas, il sera présent ; donc l'objet possède une identité, une extension, et il est inclus dans l'espace de travail.

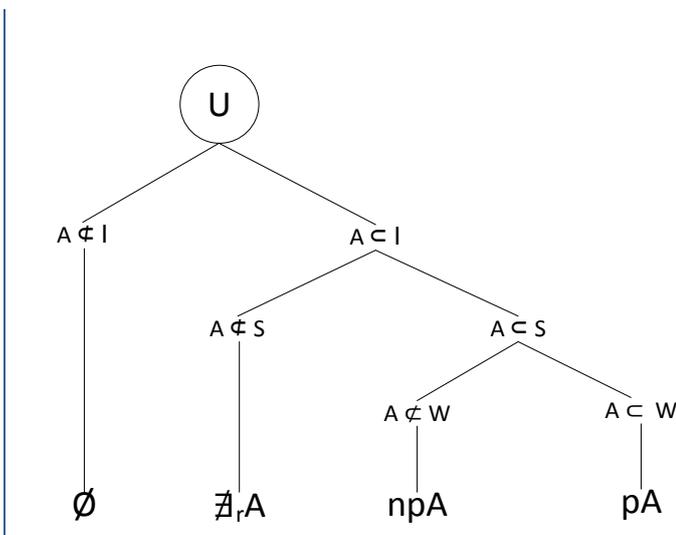


Figure IV-14 Arbre de décisions relatif aux états spatio-temporels identitaires. La première sélection se fait sur l'appartenance à l'ensemble d'identité, la seconde à l'ensemble de l'espace et la troisième sur l'appartenance ou pas à la zone de travail. La notion d'espace ne doit pas être ici interprétée comme l'espace spatial mais comme l'espace conceptuel de modélisation.

Lors de la prise en compte de l'état de transition, les possibilités de choix sont plus nombreuses. En effet, un objet peut alors être inclus dans un espace, ne pas y être inclus et il peut également être inclus dans la frontière de l'objet. Nous utilisons les principes de la topologie afin de représenter nos espaces. Comme on peut le constater sur la Figure IV-15, les trois possibilités d'être inclus dans l'espace de frontière aboutissent toutes au même état de transition. Cette représentation plus complète est basée sur l'analyse dans une perspective topologique de la représentation conceptuelle des états spatio-temporels proposée à la Figure IV-13.

Notons finalement que les représentations de la Figure IV-13 et de la Figure IV-10 sont équivalentes. Dans le premier cas, la position d'un objet sera libre dans l'espace tandis que, dans le second cas, la position d'un objet sera limitée aux axes et courbes définis. Nous

préférons par la suite la seconde représentation car elle sert de base à la définition de notre théorie de la dominance.

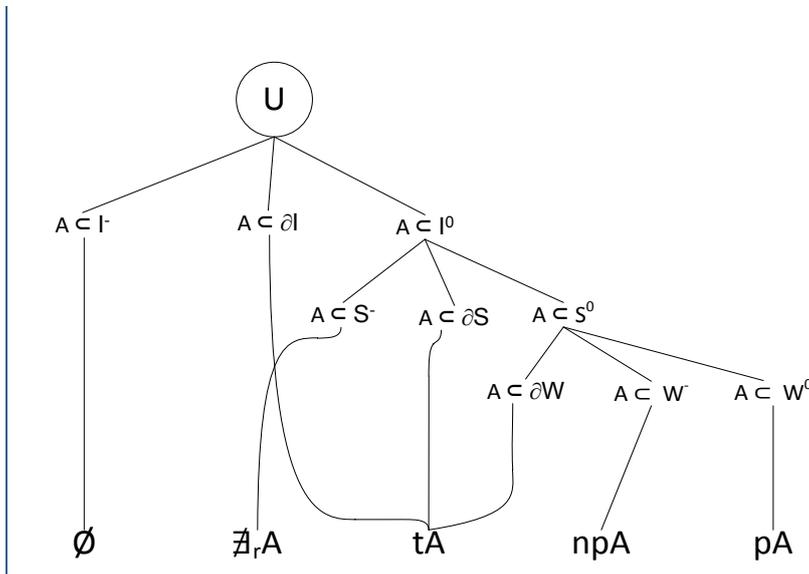


Figure IV-15 Arbres de décisions des états spatio-temporels identitaires. Cet arbre prend en compte l'état spatio-temporel de transition.

H. Résurrection, réincarnation et non-existence

Les principes présentés jusqu'à présent visent à modéliser l'ensemble des situations spatio-temporelles conceptuellement possibles pour un objet dans l'espace et le temps. Certaines applications peuvent évidemment entraîner des restrictions supplémentaires. En effet, si l'on considère que le concept de résurrection consiste en la réapparition de l'extension spatiale d'un objet qui a été détruit (donc qui n'est plus en phase de non-présence), alors ce concept peut être exclu de beaucoup d'analyses géographiques notamment. D'un point de vue physique, il n'est pas possible, hormis en retour dans le passé, de retrouver à l'identique une extension spatiale détruite. Certaines analyses historiques peuvent néanmoins accepter ce concept.

Si l'on considère que le concept de réincarnation consiste en le transfert de l'identité d'un objet d'une forme d'extension spatiale à une autre, alors il est possible de le considérer dans certaines applications géographiques. Si l'on imagine un stade de football d'un club, et que celui-ci est détruit puis reconstruit à une autre position spatiale, alors l'identité du stade pourra être transférée d'une extension spatiale à une autre. Dans les deux cas, on parlera du stade de l'équipe. Ce fait de transférer l'identité d'une réalité physique à une autre peut alors être vu comme une réincarnation. De nouveau, cette situation est difficilement associable à une phase de non-présence car il peut y avoir un intervalle de temps durant lequel ni l'extension spatiale du nouveau stade ni celle de l'ancien n'existe.

Les restrictions que nous venons de définir impliquent de légères modifications dans la représentation conceptuelle. En effet, la non prise en compte de la réincarnation empêchera la représentation de la droite de non-existence comme une boucle. Un objet passera obligatoirement par une phase d'oubli avant et après la modélisation de son identité.

4. Théorie de la dominance appliquée aux relations STS-i

L'évolution d'un objet dans le temps passe par une succession de plusieurs états propres à cet objet. Les successions possibles entre deux états peuvent être définies de deux manières. Premièrement, elles peuvent être symbolisées de manière intuitive en réalisant un « diagramme conceptuel de voisinage ». Ce type de graphe dresse les transitions possibles entre deux états consécutifs à un mouvement ou à une déformation continue. Ces graphes sont utiles au raisonnement spatial afin de vérifier la cohérence des données et d'étudier les modifications possibles relatives à un objet. Une suite de différents états doit obligatoirement respecter un chemin dans le graphe associé à ces états. La seconde manière d'étudier la transition entre les états d'un objet est de développer une théorie de dominance basée sur des états qualitatifs. Comme expliqué dans le Chapitre II.7.C, la théorie de la dominance vise à restaurer une transition continue entre états qualitatifs. Un parcours dans un graphe de dominance est appelé « *chemin de dominance* ». De plus, comme expliqué par Galton, il existe une transition continue entre deux états si, et seulement si, il y a un chemin de dominance entre ces différents états. C'est cette seconde approche que nous allons développer dans le présent chapitre afin de définir un graphe de voisinage associé aux états spatio-temporels identitaires.

La théorie de la dominance peut être appliquée aux états spatio-temporels identitaires car il s'agit d'une description qualitative d'états décrivant un espace sous-jacent qui est continu. En effet, la description de l'espace-temps et de l'évolution d'un objet est un phénomène continu que nous décrivons à l'aide d'opérateurs qualitatifs. La construction de l'espace de dominance relatif aux états spatio-temporels identitaires ne se fait pas directement sur base des définitions proposées pour ceux-ci. Celui-ci est décrit par la combinaison de deux espaces de dominance. Comme nous l'avons déjà montré, la combinaison de deux espaces de dominance est également un espace de dominance.

A. Définition des relations de dominance

i. Espace de dominance d'existence

Le premier espace de dominance que nous définissons décrit l'existence d'un objet. La position d'un objet sur la représentation conceptuelle peut être assimilée à la distance temporelle qui sépare l'objet de l'apparition de son extension physique. Comme notre

modélisation temporelle peut être assimilée à l'ensemble des nombres réels, il s'agit bien d'un espace continu. Nous pouvons, dès lors, décrire cet espace de manière qualitative. Nous choisissons de le représenter via deux valeurs qualitatives qui sont 0 et \succ . La valeur 0 signifie que l'objet existe et la valeur \succ signifie que l'objet a une distance temporelle par rapport à son existence plus grande ou plus petite que 0. L'axe Y de la Figure IV-16 représente cette espace qualitatif.

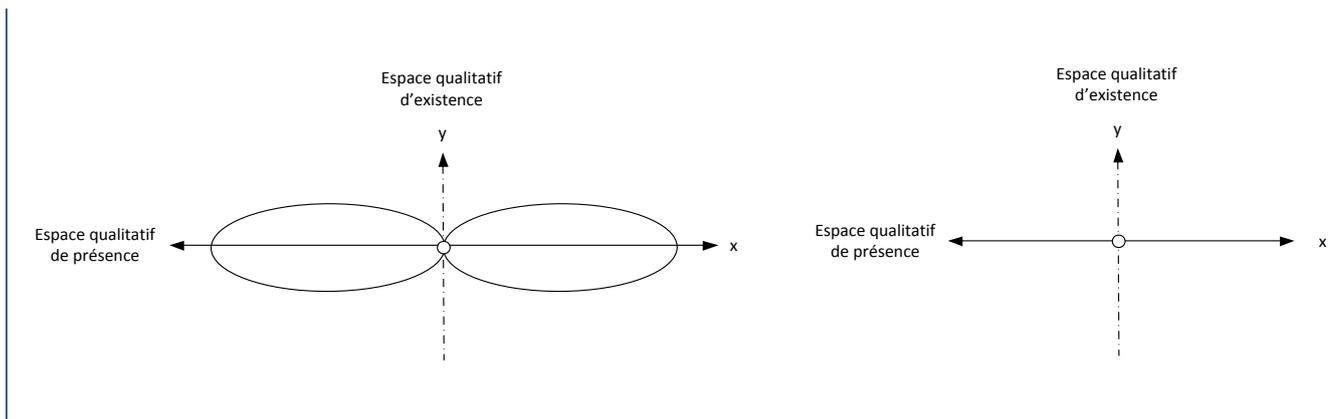


Figure IV-16 Espaces qualitatifs servant à la construction de l'état spatio-temporel identitaire d'un objet. Le graphique représente deux axes x et y associés à un espace qualitatif d'existence et un espace qualitatif de présence. L'axe X n'est pas orienté alors que l'axe Y est orienté de telle façon qu'un objet ne puisse retourner en arrière. La partie supérieure représente les boucles de présence et d'absence. La partie inférieure est une généralisation où les boucles de présence et d'absences sont représentées par une ligne.

L'espace de dominance de cet espace qualitatif est défini comme :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{S}_Y &\triangleq (\mathcal{S}_Y, \succ) \\
 \mathcal{S}_Y &= \{\succ, 0\}
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

Les relations de dominance nous indiquent que :

$$\begin{aligned}
 &(\text{Holds}(\succ, i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds} - \text{at}(0, t) \rightarrow 0 \succ) \wedge \\
 &(\text{Holds}(\prec, i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds} - \text{at}(0, t) \rightarrow 0 \prec) \\
 &\text{donc} \\
 &\text{Holds}(\succ \prec, i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds} - \text{at}(0, t) \rightarrow 0 \succ \prec \\
 &\text{et} \\
 &\mathcal{S}_Y = \{\prec \prec 0 \succ\} \text{ ou } \{\succ \prec 0\}
 \end{aligned}
 \tag{4.29}$$

Ce qui signifie que la perturbation de l'état \succ est 0 et que l'état 0 domine l'état \succ . En d'autres termes, si l'on considère une croissance continue d'une valeur inférieure à 0 à une valeur supérieure, lors du passage par l'état 0, celui-ci est en bordure des états $<$ et $>$ et il perturbera la succession des deux intervalles afin de dominer celle-ci. On voit donc l'existence d'un état de transition entre les deux situations de non-existence. Le passage par cet état de transition est nécessaire afin d'ensuite aboutir à un état de présence ou de non-présence que nous allons décrire ci-dessous.

ii. Espace de dominance de présence et non-présence

De la même manière, il est possible de décrire qualitativement la présence et la non-présence d'un objet. Si l'on se réfère à la Figure IV-16, on peut décrire la position d'un objet comme étant $-$ si l'objet est en état de non-présence et $+$ s'il est en état de présence. Sa coordonnée X sur la figure sera soit négative, nulle ou positive. Dans ce cas, nous généralisons les deux boucles en deux droites qui correspondent à l'axe des X. Rappelons que la présence est définie comme un objet répondant correctement au jeu de fonctions de présence définissant l'espace de travail et qu'un objet non présent est un objet qui n'est pas inclus dans l'espace de travail. On voit également sur le schéma que la position 0 représente un état de transition qui est le même état que dans la description de l'existence d'un objet. Les relations de la théorie de la dominance nous indiquent que :

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_X &\triangleq (\mathcal{S}_X, \succ) \\ \mathcal{S}_X &= \{+, -, 0\} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Cet espace de dominance est justifié par les deux relations suivantes :

$$\begin{aligned} &(\text{Holds}(-, i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds} - \text{at}(0, t) \rightarrow 0 \succ -) \wedge \\ &(\text{Holds}(+, i) \wedge \text{Lim}(t, i) \wedge \text{Holds} - \text{at}(0, t) \rightarrow 0 \succ +) \\ &\text{donc} \\ &\mathcal{S}_X = \{- \prec 0 \succ +\} \end{aligned} \quad (4.31)$$

De la même façon que précédemment, la description de cet espace de dominance peut être comprise en imaginant la croissance d'un objet d'une valeur négative à une valeur positive. Si l'objet croît normalement sur l'intervalle de temps i jusqu'à sa bordure temporelle t , et si à l'instant t l'objet est également à l'état 0, alors il y a une perturbation entre ces deux états. Ils « luttent » en quelque sorte pour prendre place sur l'instant t . Dans le cas d'une croissance continue, l'objet prendra la valeur 0 à l'instant t . Ceci nous indique que l'état 0 domine l'état $-$. Il en est de même pour l'état $+$.

De plus, on voit dans cette analyse que l'état 0 peut être valable uniquement pour un instant alors que les états $-$ et $+$ ne le peuvent pas. Ceci correspond tout à fait aux définitions que nous avons données préalablement des états de présence, de non-présence et de

transition. En effet, un objet pourra être en état de transition de façon instantanée alors qu'il devra obligatoirement être en état de présence ou de non-présence pour un intervalle de temps.

B. Espace de dominance combiné

Par l'équation (2.69), on sait que la combinaison de deux espaces de dominance est également un espace de dominance. Le croisement se fait en effectuant le produit cartésien des deux ensembles de dominance respectifs. En considérant qu'un seul système change à la fois, il est alors possible de représenter ce nouvel espace. Si on analyse à nouveau la Figure IV-16, on voit que la description complète de l'état spatio-temporel identitaire d'un objet est alors décrite par le croisement de ses possibilités d'existence et de ses possibilités de présence. Le croisement des deux espaces de dominance peut conduire à des états qui n'ont pas de réalité physique ou qui sont impossibles. L'analyse de la dominance ne prend pas en compte ces états par la suite. L'espace de dominance de l'état spatio-temporel identitaire d'un objet A est donné par :

$$\begin{aligned}
 (\mathcal{S}_A, \succ) &\triangleq (\mathcal{S}_X, \succ) \otimes (\mathcal{S}_Y, \succ) \\
 \text{où} & \\
 \mathcal{S}_A &= \{- \succ, + \succ, 0 \succ, -0, +0, 00\}
 \end{aligned}
 \tag{4.32}$$

En regardant les transitions de dominance de chaque espace indépendamment, il est possible de retrouver les états qui dominent d'autres dans l'espace combiné. De cette façon, on trouve quels états dominent les autres. Les règles de succession temporelles définies en (2.67) restent évidemment vraies pour un espace de dominance combiné.

C. Graphe de dominance

Il est possible de représenter les différents états à l'aide d'un graphe de dominance. Rappelons que ce graphe est l'outil formel de base à la définition du graphe conceptuel de voisinage car, comme défini par Galton, un voisinage conceptuel sera considéré comme un chemin dans le graphe de dominance. La Figure IV-17 croise les deux espace de dominance d'existence et de présence afin de présenter le graphe de dominance d'état spatio-temporel identitaire d'un objet A.

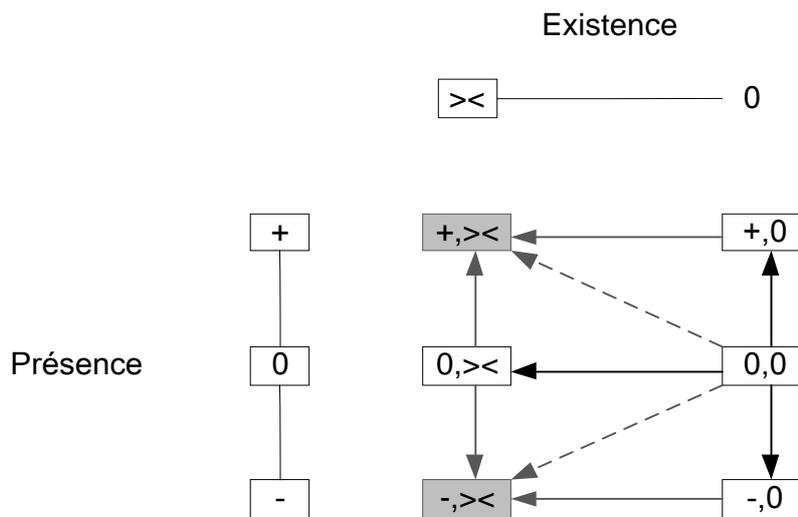


Figure IV-17 Espace de dominance S_A d'un objet A obtenu par le croisement des espace de dominance d'existence S_X et de présence et non-présence S_Y . Les cases grisées symbolisent des états impossibles dans l'espace-temps : les flèches pleines une transition d'un seul système à la fois et les flèches pointillées la transition des deux systèmes simultanément.

Les cases grisées symbolisent des états qui ne sont pas possibles. En effet, il n'est pas concevable d'imaginer traiter la présence ou non-présence d'un objet si celui-ci n'a pas de réalité dans l'espace considéré pour la modélisation. Les flèches continues représentent la transition d'un seul système à la fois et les flèches pointillées la transition des deux systèmes simultanément. Le graphe de dominance peut donc être simplifié en éliminant les états et les transitions vers les états impossibles. Restent alors uniquement les relations qui composent un graphe conceptuel de voisinage.

D. Diagramme conceptuel de voisinage

Le diagramme conceptuel de voisinage obtenu à partir de la théorie de la dominance correspond tout à fait au graphe que nous aurions pu définir conceptuellement. Ceci montre que les postulats quant à la définition des états spatio-temporels identitaires d'un objet sont corrects. Il est possible de renommer les valeurs obtenues de la théorie de la dominance par les prédicats que nous utilisons dans la définition des états. De cette manière, la Figure IV-17 est simplifiée afin d'obtenir la Figure IV-18.

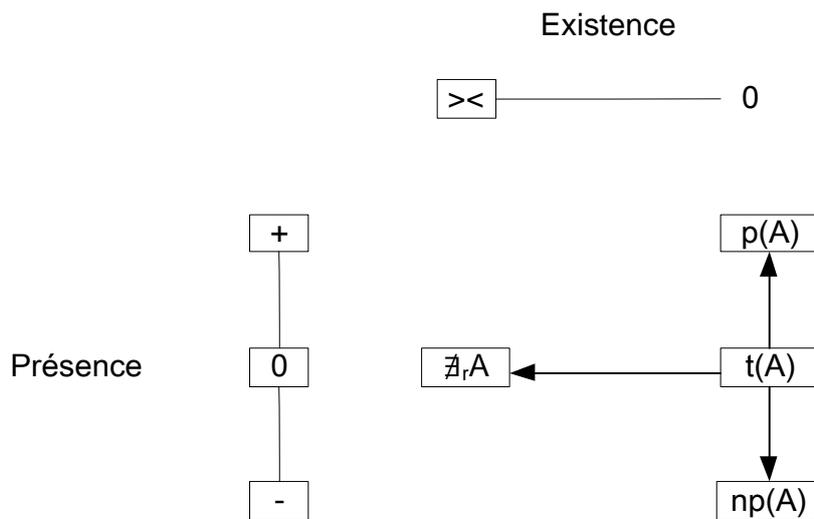


Figure IV-18 Diagramme de dominance des états spatio-temporels identitaires tel qu'obtenu par le croisement des espaces de dominance d'existence et de présence ou non-présence. Ce graphe ne présente pas les situations impossibles. Les valeurs de l'ensemble de dominance sont remplacées par les prédicats posés lors de la définition des états spatio-temporels identitaires.

L'analyse de la théorie de la dominance nous apprend l'existence d'un état de transition, qui peut être instantané, qui existe lors du passage d'un état à un autre. La position centrale de l'état de transition peut être expliquée par le fait que cet état existe autant dans l'espace d'existence et dans l'espace de présence et de non-présence. De plus, si l'on analyse la Figure IV-16, on voit que l'état de transition correspond au point de croisement des deux espaces. Ceci renforce également la vision de l'état de transition comme passage instantané dans une modification continue de l'état d'un objet. Notons finalement que ce n'est pas parce qu'un état de transition peut être instantané qu'il l'est obligatoirement. Cet état peut également être valable pour un intervalle de temps. Dans cette situation, sa limite dominera de toute façon les limites temporelles des autres états en contact avec celui-ci.

Le graphe de voisinage des états spatio-temporels identitaires peut être représenté en surimposition à l'espace conceptuel servant à sa définition. Dans un graphe conceptuel de voisinage, les transitions entre états ne sont pas orientées. La Figure IV-19 présente ce diagramme conceptuel de voisinage. Pour rappel, les graphes conceptuels de voisinage représentent une étape indispensable au raisonnement spatio-temporel. Ceux-ci servent d'une part à tester la cohérence des données et également à inférer des connaissances sur les transitions possibles entre états.

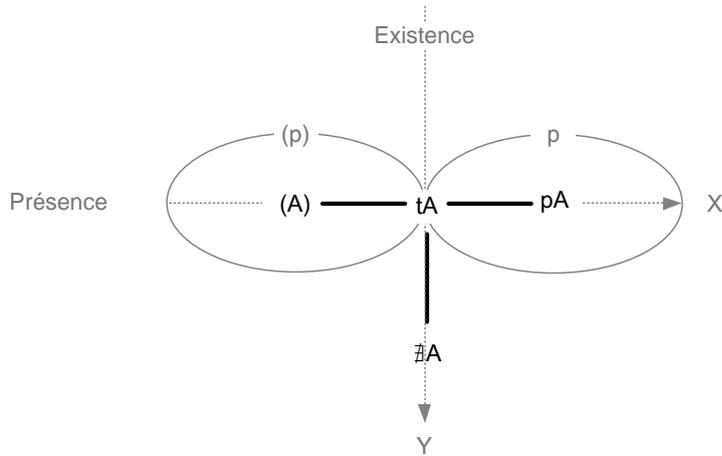


Figure IV-19 Diagramme conceptuel de voisinage des états spatio-temporels identitaires d'un objet A. Le diagramme conceptuel de voisinage est surimposé à la représentation conceptuelle servant à la définition des états spatio-temporels identitaires. Ce graphe nous apprend que chaque changement d'état impose le passage via un état de transition.

5. Conclusion

La définition de l'espace et du temps utilisée en modélisation spatio-temporelle nous apprend qu'il existe plusieurs états possibles pour un objet. Cependant, tous ces états ne sont pas modélisés et pris en compte dans le raisonnement. En effet, la plupart des modèles de raisonnement spatio-temporels actuels ne s'appliquent que lorsque les objets considérés possèdent une identité et sont spatialement présents.

Un des premiers objectifs de cette recherche est de définir formellement l'ensemble des états d'évolution possibles pour un objet dans l'espace et le temps. L'analyse que nous proposons de l'identité d'un objet au travers de l'espace et du temps répond à ce besoin de formalisation. En effet, par l'analyse de l'identité d'un objet, nous proposons de gérer 4 états spatio-temporels identitaires définissant cet objet. La vision que nous proposons inclut l'ensemble des modèles de raisonnement spatio-temporels actuels. La philosophie de modélisation adoptée ne restreint pas l'étude à quatre états spatio-temporels, elle doit plutôt être vue comme la mise en exergue de quatre états globaux à toute l'information relative à l'évolution d'un objet du point de vue de son identité, de sa spatialité et de sa temporalité.

L'idée de la représentation de l'évolution d'un objet dans un espace conceptuel d'existence, de non-existence, d'oubli... peut également être appliquée aux modèles n'utilisant pas les mêmes prédicats temporels ou spatiaux. Cette vision de l'évolution d'un objet représente une évolution de la ligne temporelle classique ou d'un raffinement d'un « branching time ». De plus, si une autre modélisation spatio-temporelle ne prend pas en compte une orientation temporelle, une primitive spatiale différente, une primitive temporelle autre, les définitions proposées peuvent être adaptées pour répondre à ces modèles. Le choix d'un modèle basé sur la description d'état aide à cette facilité d'adaptation.

Comme nous l'avons montré, l'évolution d'un objet implique qu'il ne soit pas toujours visible dans son environnement. Ce chapitre répond également à ce constat et représente de manière formelle l'espace de travail et l'état d'un objet dans cet espace. L'espace de travail peut correspondre à tous types d'espaces conceptuels ou spatiaux. Cette adaptation possible de l'espace de travail rend également cette formalisation globale à la science de l'information et ne restreint pas le modèle à des applications purement géographiques. Rappelons que la notion d'espace que nous avons utilisée durant ce chapitre ne représente pas exclusivement l'espace spatial mais tous les espaces conceptuels dans lesquels il est possible de modéliser de l'information.

L'étude d'un état spatio-temporel doit évidemment inclure une transition entre ces différents états. Cependant, comme nous travaillons de façon qualitative, la continuité des transitions n'est pas respectée. L'approche de la théorie de la dominance que nous proposons permet de retrouver une continuité spatio-temporelle dans les changements d'états possibles pour un objet. Cette application conduit même à la représentation d'un graphe conceptuel de

voisinage. Cet outil est la pierre angulaire de la suite de nos développements. En effet, la suite du travail sera consacrée à de multiples combinaisons de ces états spatio-temporels. Le diagramme conceptuel de voisinage et la théorie de dominance développés nous aideront à identifier les transitions possibles et les états successifs voisins.

Chapitre V.

Relations STS-i

*C'est un fait de pure expérience qu'il n'y a pas d'espace sans temps ni de temps sans espace.
Daisetz T  itaro Suzuki*

1. Introduction

L'étude des relations entre objets permet notamment de décrire formellement les liens qui unissent ces mêmes objets, de déduire de nouvelles connaissances sur ceux-ci, de vérifier si les informations sont cohérentes et enfin d'effectuer des traitements sur ces objets. Dans le cas d'objets à composante géographique, leur principal champ d'étude est l'analyse des relations spatiales entre deux ou plusieurs objets. Ce champ d'étude est appelé analyse spatiale. Le traitement de la relation entre deux objets peut être vu de deux manières, d'un point de vue statique ou d'un point de vue dynamique. Cette distinction induit une grande division dans la littérature scientifique ainsi que dans le type d'analyses proposées par les modèles de relations spatiales. Il est évident que l'étude dynamique des relations existantes entre objets géographiques induit une composante temporelle. L'analyse spatio-temporelle propose tout un ensemble de modèles de relations qui décrivent les relations entre objets à travers le temps. Cependant, comme nous l'avons montré précédemment, peu se focalisent sur l'évolution des relations identitaires entre ces objets. Ce chapitre a pour but de répondre à cette lacune. Comme nous l'avons montré dans les tables précédentes (Table 1 et Table 2), il existe un réel manque de modélisation à ce niveau. Nous allons, par l'étude des relations entre objets sur base des   tats spatio-temporels identitaires, proposer une formalisation de l'évolution de relations identitaires au cours du temps. Cette représentation permet

également l'utilisation d'une représentation en « *configurations de vie et de mouvement* » qui feront l'objet du prochain chapitre.

A. Les relations entre STS-i et leurs transitions

Beaucoup d'analyses géographiques se focalisent sur un état du monde à un instant donné. Bien qu'extrêmement utile dans beaucoup d'applications, ce type d'analyse ne prend pas en compte une partie importante de l'information géographique. En effet, les objets qui sont modélisés évoluent dans leur environnement, lui-même en évolution. Les auteurs de modèles de relations spatiales l'ont bien compris et c'est la raison pour laquelle ils ont également proposé des outils afin d'étudier le changement dans ces objets. Deux approches existent dans ces études. D'une part, l'analyse de l'évolution de relations entre deux situations statiques du monde. C'est typiquement le cas de l'étude des relations telles que les relations topologiques entre différents instants (voir Chapitre II.6.A). Même si ces relations peuvent être vraies durant un intervalle de temps, la dimension temporelle créée par l'avancement de l'état des objets dans le temps n'est pas réellement analysée. L'autre approche consiste à analyser les formes spatio-temporelles continues créées par l'évolution d'objets dans l'espace et le temps (voir Chapitre II.6.B). Ces approches, bien que moins nombreuses, permettent une meilleure adéquation aux phénomènes observés et une meilleure étude des transitions entre objets. Notons que la première approche est souvent induite des sources de données elles-mêmes. En effet, les données spatio-temporelles sont principalement composées d'une répétition de spatialité à des instants donnés. Ainsi l'analyse des relations à chaque instant semble plus intuitive pour beaucoup d'utilisateurs. Il est vrai que la vision de données spatio-temporelles continues est plus théorique mais sa mise en forme qualitative permet l'utilisation de données séquencées pour les analyses.

Un des premiers outils d'étude du changement de relations a été proposé par Freksa (Freksa 1991). Il s'agit des diagrammes conceptuels de voisinage (voir Chapitre II.7.B). Si l'on prend le cas du diagramme conceptuel de voisinage des relations topologiques, celui-ci dresse un graphe des transitions possibles entre les relations de deux objets soumis à des déformations continues. Le passage d'une relation à une autre, non voisine dans le graphe, impose le passage par toutes les relations intermédiaires. Deux objets disjoints devront obligatoirement avoir un état de rencontre avant d'avoir une relation de recouvrement. Le graphe de voisinage est bien entendu lié à l'analyse qualitative effectuée sur les données. En effet, si l'on considère des relations projectives entre objets, le passage d'une relation de disjonction à une relation de rencontre peut avoir plusieurs états et relations possibles. La topologie n'effectuant pas cette distinction, le graphe sera en quelque sorte « généralisé » par rapport à l'analyse de relations spatiales qualitatives basées sur une géométrie plus contrainte.

Un second outil permettant l'étude du changement d'objets concerne les tables de compositions. Celles-ci permettent d'inférer de nouvelles connaissances sur la relation de deux objets sur base des relations qu'ils entretiennent avec deux autres. Si l'on connaît la relation entre A et B et entre B et C, il est possible de déduire une série de relations possibles entre A

et C. Ces tables sont utilisées dans la modélisation de relations statiques, mais elles permettent également de déduire temporellement quelles relations seront possibles si une des relations génératrices (la relation entre A et B par exemple) change.

L'étude du changement de la forme des objets tient une part importante dans l'étude du changement de relations spatiales à travers le temps. L'évolution temporelle d'un phénomène n'induit pas que son déplacement dans l'espace. Son changement de taille, d'orientation, de forme, de convexité induit des changements de relations qu'il entretient avec son entourage. Si l'on modélise un feu de forêt comme une région, au fur et à mesure de l'avancement du feu, la région se déplacera dans l'espace, mais l'étude du changement de sa forme sera également primordiale, le but étant de connaître son extension spatiale et au final de réduire l'incendie à un objet de surface nulle. De nouveau, le type de géométrie utilisée pour décrire qualitativement les relations aura une grande importance dans l'étude du changement des objets géographiques. En effet, si l'on prend en compte une géométrie topologique de base, le changement de relation ne sera visible que lorsque le changement de forme sera suffisamment important pour changer une relation topologique de contact entre objets. Un feu pourra dans ce cas entourer quasi-complètement une ville mais ne pas entrer en contact avec elle sans que les relations entre la ville et le feu ne changent. L'utilisation d'autres opérateurs de descriptions qualitatives pourra quant à elle voir un changement de relation plus précocement. Des modèles tels le « *double cross calculus* » (Zimmermann and Freksa 1996), le « *ternary projective relationships* » (Billen and Clementini 2004; Billen and Clementini 2005; Clementini and Billen 2006) mettront ce phénomène en évidence.

Comme on peut le constater, l'évolution d'objets dans le temps induit un changement de forme et de position de ceux-ci. Se contenter d'analyser l'évolution de la spatialité des objets ou l'évolution des relations entre leurs spatialités ne suffit cependant pas. En effet, comme nous l'avons constaté lors de la formalisation du concept d'objet, celui-ci ne peut être défini qu'en prenant en compte une description, une série d'attributs ou d'une ou plusieurs spatialités. L'identité d'un objet est le trait fondamental qui le distingue de tous les autres. Cette identité est la première chose à modéliser lors de la conception d'un objet géographique ou non. Par conséquent, l'étude des relations entre identités d'objets est un fondement préalable à toute analyse des relations propres à leur spatialité ou à un attribut quelconque. Comment comparer les valeurs de deux pays si on n'identifie pas préalablement l'identité de ces pays ? Comment calculer une relation topologique entre deux objets, si on n'identifie pas les objets et qu'on ne fournit pas un moyen de les distinguer d'un ensemble d'autres objets ? Ces questions relatives à l'identité des objets ont déjà été soulevées et la communauté informatique s'accorde sur le fait de gérer l'identité des objets différemment d'un attribut de ceux-ci, l'identité étant une composante primordiale à la conception même de l'objet. L'étude des relations entre identités d'objets est donc indispensable à une analyse d'un phénomène, qui plus est si celui-ci est variable dans le temps. De la même manière que les relations spatiales entre deux objets géographiques peuvent être étudiées à un instant donné, ou pour un état du monde donné, l'étude de la relation entre identité d'objets peut être effectuée à un

instant donné. L'analyse de l'évolution des relations identitaires entre objets doit également être faite afin de rendre compte de la complexité de leur projection dans le temps. A nouveau, il est possible d'effectuer une comparaison vis-à-vis des relations spatiales, où l'étude des relations est également réalisée dans le temps. La modélisation de l'évolution des relations identitaires dans le temps entre deux objets fera l'objet du Chapitre I.

B. Réflexion sur le temps dans la modélisation du changement

Le temps occupe évidemment une place primordiale dans l'étude du changement. Sans temps, il n'est pas envisageable de prendre quelque changement que ce soit. C'est une des raisons pour lesquelles beaucoup d'auteurs conçoivent une très forte corrélation entre les concepts de temps et d'espace (Freksa 1992; Peuquet 1994; Cohn, Gotts et al. 1997; Gerevini 1997; Shih 1998; Parent, Spaccapietra et al. 1999; Galton 2004; Roddick, Hoel et al. 2004; Song and Chua 2005; Praing and Schneider 2007; Galton 2011). Le type de primitive temporelle choisi lors de la modélisation implique déjà une certaine catégorisation des changements qu'il est possible de mettre en lumière. Si la primitive temporelle choisie est l'intervalle de temps, cela impose la considération de changements non instantanés ou à tout le moins de considérer ceux-ci comme ayant une certaine durée. En fonction du type d'application, cela pourra avoir des répercussions assez nombreuses et importantes. Prenons par exemple le cas de la modélisation d'un cadastre. Dans ce cas, un des principaux types de changements qui se produiront vis-à-vis des données sera le changement de propriétaire des parcelles modélisées. Ce changement peut en toute vraisemblance être considéré comme instantané. Le changement de propriétaire n'est pas un fait continu. On ne devient pas propriétaire d'une partie de la parcelle qui s'agrandit au fil du temps pour recouvrir l'ensemble de celle-ci mais l'acheteur devient bien propriétaire de l'ensemble du bien en une seule fois. La prise en compte d'une modélisation temporelle sur base d'intervalle induira donc un artéfact quant à la modélisation de ce phénomène de changement. Soit l'acquisition d'une parcelle sera vue comme l'ensemble des démarches nécessaires à l'acquisition de celle-ci ce qui conduira à la modéliser comme un intervalle de temps ; soit l'acte d'acquisition sera modélisé comme un intervalle de temps extrêmement court durant lequel le changement apparaît.

Une autre manière de considérer le temps est une approche à base d'instantanés. Bien souvent ces approches sont augmentées afin de permettre également la modélisation d'intervalle de temps. C'est ce type d'approches que nous avons développé jusqu'ici. Dans celles-ci, il est possible de rendre compte des changements qui pourraient être instantanés, tel le changement de propriétaire d'une parcelle, d'un choc entre une balle de tennis et d'une raquette, de destruction ou de changement d'appellation d'un pays. Si l'on analyse le changement d'un point de vue physique, on se rendra vite compte qu'aucun fait n'est instantané. Il existera toujours une durée, si infime soit-elle, durant laquelle le changement apparaît. Le choc entre une balle de revolver et une cible dure le laps de temps suffisant afin que la balle perce la cible. Sur base de cette approche, on pourrait croire qu'il est alors nécessaire de modéliser tous les changements comme des intervalles de temps, or ce n'est pas

le cas. Tout dépend de la granularité qui est considérée. La granularité, parfois vue comme la précision d'acquisition, est une propriété essentielle lors d'une modélisation spatiale, temporelle ou spatio-temporelle. Elle est souvent définie au moment même de la conceptualisation du problème. La gamme de granularité sera souvent définie préalablement et tous les événements ou changements inférieurs à celle-ci seront dès lors considérés comme instantanés. Dans le cadre de ce travail, nous n'étudierons pas les différents types de granularités possibles pour l'information spatio-temporelle. Le modèle proposé peut s'adapter à n'importe quel type de granularité. Retenons uniquement que celle-ci peut entraîner des incohérences dans certaines données et des problèmes lors de modélisations de phénomènes ayant des dynamiques temporelles étendues.

2. Relations entre STS-i (STS-i-R)

Les relations entre objets sont établies sur base des définitions de l'état spatio-temporel identitaire (STS-i) de ceux-ci. Les relations, telles que définies dans ce travail, consistent en la combinaison des STS-i de deux objets. Cette combinaison aboutit à 16 relations possibles. Nous justifierons ces relations par la suite en étendant la théorie de la dominance précédemment proposée ainsi qu'en proposant un diagramme conceptuel de voisinage basé sur ces mêmes relations. L'application des relations STS-i peut être appréhendée de deux façons. Premièrement, si l'on considère un espace de travail commun à l'ensemble des objets de l'analyse, une inférence sur base des relations sera plus performante, car des relations de présence ou d'absence entre deux objets pourront être utilisées pour déduire des connaissances quant à un troisième objet. Dans le cadre d'une définition de l'espace de travail basée sur le champ de visibilité d'un objet, les conditions de présence et d'absence ne seront plus allocentriques mais égocentriques. L'inférence de nouvelles connaissances sera alors conditionnée à ces mêmes champs de visibilité. En conséquence, celle-ci sera moins performante. La suite du travail fera l'objet d'un travail de modélisation allocentrique ; lorsque des différences seront perceptibles vis-à-vis d'une perception égocentrique, elles seront mises en exergue.

A. Formalisation des relations entre STS-i

Les « *relations STS-i* » ou STS-i-R sont définies comme le produit vectoriel des deux espaces d'états spatio-temporels identitaires de deux objets. La combinaison fournit donc 16 relations possibles. Elles sont définies par :

$$\begin{aligned}
STS - i - R(A, B) &\triangleq STS - i_A \otimes STS - i_B \\
\text{avec} \\
STS - i_A &= \{ \overset{\#}{\#}A, pA, npA, tA \} \\
STS - i_B &= \{ \overset{\#}{\#}B, pB, npB, tB \}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

L'ensemble des relations STS-i est alors défini comme :

$$R_{A-B} = \left\{ \begin{array}{l} \overset{\#}{\#}A - \overset{\#}{\#}B, pA - \overset{\#}{\#}B, npA - \overset{\#}{\#}B, tA - \overset{\#}{\#}B, \\ \overset{\#}{\#}A - pB, pA - pB, npA - pB, tA - pB, \\ \overset{\#}{\#}A - npB, pA - npB, npA - npB, tA - npB, \\ \overset{\#}{\#}A - tB, pA - tB, npA - tB, tA - tB \end{array} \right\} \tag{5.2}$$

Pour chacune des relations, une interprétation peut également être proposée. Certaines relations correspondent à des expressions du sens commun. D'autres n'ont pas de réelles interprétations mais elles peuvent quand même être expliquées. L'interprétation des relations fait appel à la direction des relations. Cela signifie par exemple que l'interprétation de la relation $pApB$ sera différente de la relation $pBpA$. Cependant, d'un point de vue tout à fait formel, il n'y a pas de différence identitaire entre ces deux relations. Il s'agit uniquement d'un choix d'interprétation afin de mieux correspondre à des expressions du langage naturel.

- $\overset{\#}{\#}A - \overset{\#}{\#}B$: l'objet A n'existe pas et l'objet B n'existe pas. Chaque objet à la connaissance de l'identité de l'autre mais ils n'ont pas encore d'extension dans l'espace. Il s'agit typiquement d'une relation entre deux objets qui sont dans la mémoire commune. Nous appelons cette relation « *la relation entre deux objets de mémoire* »
- $pA - \overset{\#}{\#}B$: l'objet A est présent dans l'espace de travail et il a la connaissance de l'identité d'un objet B qui n'existe plus ou qui n'existe pas encore. Cette relation permet la gestion de l'état spatio-temporel identitaire de l'objet B car celui-ci est conditionné au fait qu'une relation pointe vers l'objet B. Il s'agit typiquement des relations que nous entretenons vis-à-vis d'un objet qui fait partie de l'histoire ou de la mémoire. Nous appelons cette relation « *la relation de mémoire* », « *l'objet A commémore l'existence de l'objet B* ». Ces relations sont également valables vis-à-vis d'un objet qui existera dans le futur. Dans ce cas, cette relation est « *une relation de prévision* », « *l'objet A prévoit l'existence de l'objet B* ».
- $npA - \overset{\#}{\#}B$: l'objet A ne se situe pas dans l'espace de travail et il a la connaissance de l'identité d'un objet B qui n'existe plus ou qui n'existe pas encore. Cette relation peut être qualifiée d'« *absent qui connaît un objet de mémoire* ».

- $tA - \ddagger B$: l'objet A est en phase de transition, il se situe temporellement sur la frontière d'un changement d'état. A cet instant, il a la connaissance de l'identité d'un objet B qui n'existe plus ou qui n'existe pas encore.

D'une manière générale, nous pouvons dire que toutes les relations qui ont en deuxième terme un état de non-existence sont des « *relations de connaissances* ». L'objet du premier terme possède la connaissance de l'identité de l'objet du second terme, même si cet objet n'a pas encore d'extension physique ou conceptuelle dans l'espace.

- $\ddagger A - pB$: l'objet A n'existe pas et il a la connaissance d'un objet B qui est présent. Il s'agit par exemple d'une personne qui est engagée dans une société (représentant l'espace de travail) mais qui n'y travaille pas encore. Elle possède déjà une identité pour celle-ci, mais n'a pas encore de réalité physique dans celle-ci, ne s'y étant jamais rendu. Cependant, il peut avoir une relation vis-à-vis d'une personne qui y travaille déjà et qui par conséquent y est présente.
- $pA - pB$: l'objet A existe et est présent et est en relation avec un objet B qui existe et est également présent. Cette relation est à la base de toutes les relations spatiales entre deux objets géographiques. Ce n'est que dans ce cas de relations STS-i qu'il est possible d'envisager une relation topologique, RCC... entre deux objets. Par la suite, nous étendrons également cette relation pour prendre en compte une spatialité entre les objets en relation. De nombreux exemples peuvent être proposés afin de présenter cette relation. D'un point de vue de relation de connaissance, il s'agit du cas typique où deux objets sont visibles l'un de l'autre, où deux personnes sont dans le même espace de travail, où deux bâtiments existent et sont en fonction. Cette relation peut être décrite en langage commun comme « *l'objet A côtoie l'objet B* ».
- $npA - pB$: l'objet A existe sans être présent et il est en relation avec un objet B qui existe et est présent dans l'espace de travail. Il s'agit d'un objet qui étant hors de l'espace de travail « voit » ou est en relation avec un objet qui y est présent. Un exemple de ce type de relation est, par exemple, un appel téléphonique entre une personne effectuant du télétravail avec un collègue. Dans ce cas, la relation décrit un contact entre un employé non présent dans son entreprise avec un employé qui y est présent. L'espace de travail correspond dans ce cas à l'enceinte de l'entreprise. Une interprétation de cette relation peut également être : « *l'objet A espionne l'objet B* ». Dans ce cas, l'objet A se cache hors de l'espace de travail afin d'observer un objet B qui lui est présent dans l'espace de travail.
- $tA - pB$: l'objet A est en transition alors que l'objet B est présent. L'objet A est en phase de changement d'état tout en ayant connaissance de la présence de l'objet B. Ce type de relation n'a pas directement d'interprétation dans le langage naturel.

- $\nexists A - npB$: l'objet A n'existe pas encore ou n'existe plus et est en relation avec un objet B qui n'est pas dans l'espace de travail.
- $pA - npB$: l'objet A est présent et est en relation avec un objet B qui n'est pas présent dans l'espace de travail. La relation est le cas inverse de la situation $npA - pB$. Cette relation décrit notamment les relations entre personnes présentes dans un espace de travail avec celles qui ne le sont pas, le contact radio entre un avion et la tour de contrôle lorsque celui-ci n'est pas encore dans un espace aérien du radar. Une interprétation dans le langage commun de ce type de relation est par exemple : « l'objet A connaît l'existence de l'objet B ».
- $npA - npB$: l'objet A n'est pas dans l'espace de travail et est en relation avec l'objet B qui n'est pas dans l'espace de travail. Ce type de relation est « une relation de contre-espionnage ». La notion de contre-espionnage, bien que peu utilisée de nos jours, doit être vue comme un objet étant « caché » espionnant un autre objet « caché ».
- $tA - npB$: l'objet A est en phase de transition alors que l'objet B n'est pas dans la zone de travail.
- $\nexists A - tB$: l'objet A n'existe pas alors que l'objet B est en zone de transition.
- $pA - tB$: l'objet A existe et a connaissance d'un objet B qui est en phase de transition. Cette relation décrit, par exemple, l'instant où un objet génère un autre objet. Il a connaissance de l'arrivée d'un objet B qui passe d'un état de non-existence à un état d'existence.
- $npA - tB$: l'objet A n'est pas dans l'espace de travail et est en relation avec un objet B qui est en phase de transition.
- $tA - tB$: l'objet A et l'objet B sont en phase de transition.

Certaines relations sont moins décrites que d'autres. Notons que, bien que ces relations soient plus difficilement explicables dans le langage naturel, d'autres représentent des concepts clé dans l'étude des relations identitaires entre objets. Des relations de connaissance, de souvenir, de mémoire sont notamment expliquées par des relations entre états spatio-temporels identitaires. Dans le cadre de certaines applications, des relations peuvent être moins fréquentes ou même ne pas avoir lieu. Si la modélisation ne considère pas d'espace de travail ou de phase de non-existence, ces relations n'auront pas lieu. Lors de modélisation de phénomènes géographiques classiques, les relations de présence-présence seront les plus nombreuses. Si l'on tient compte de toute la complexité de l'évolution spatio-temporelle d'objets géographiques, l'ensemble des relations spatio-temporelles identitaires sera nécessaire à l'explication et la formalisation des concepts mis en jeu.

B. Représentation des 16 relations STS-i

Une représentation des relations STS-i peut être proposée de deux manières. Premièrement sur base de la représentation conceptuelle des états tels que proposés au Chapitre IV.3.E. Cette représentation peut également être étendue afin de tenir compte d'une certaine relation temporelle entre l'évolution des objets. La seconde représentation que nous proposons des relations STS-i est la représentation en « patterns » telle que définie au Chapitre IV.3.F. Ces représentations permettent d'identifier rapidement la relation qui lie deux objets et d'inférer de nouvelles connaissances sur base de celles-ci.

i. Modélisation conceptuelle de relations STS-i

La représentation de deux objets dans l'espace conceptuel tel que défini est simplement effectuée en représentant deux objets sur celui-ci. Cela conduit aux 16 relations que nous venons de définir. Cette représentation permet de visualiser les 16 états de relations possibles, présentés à la Figure V-1. La transition entre ces différents états sera abordée plus loin dans ce chapitre via les configurations de vie et de mouvement.

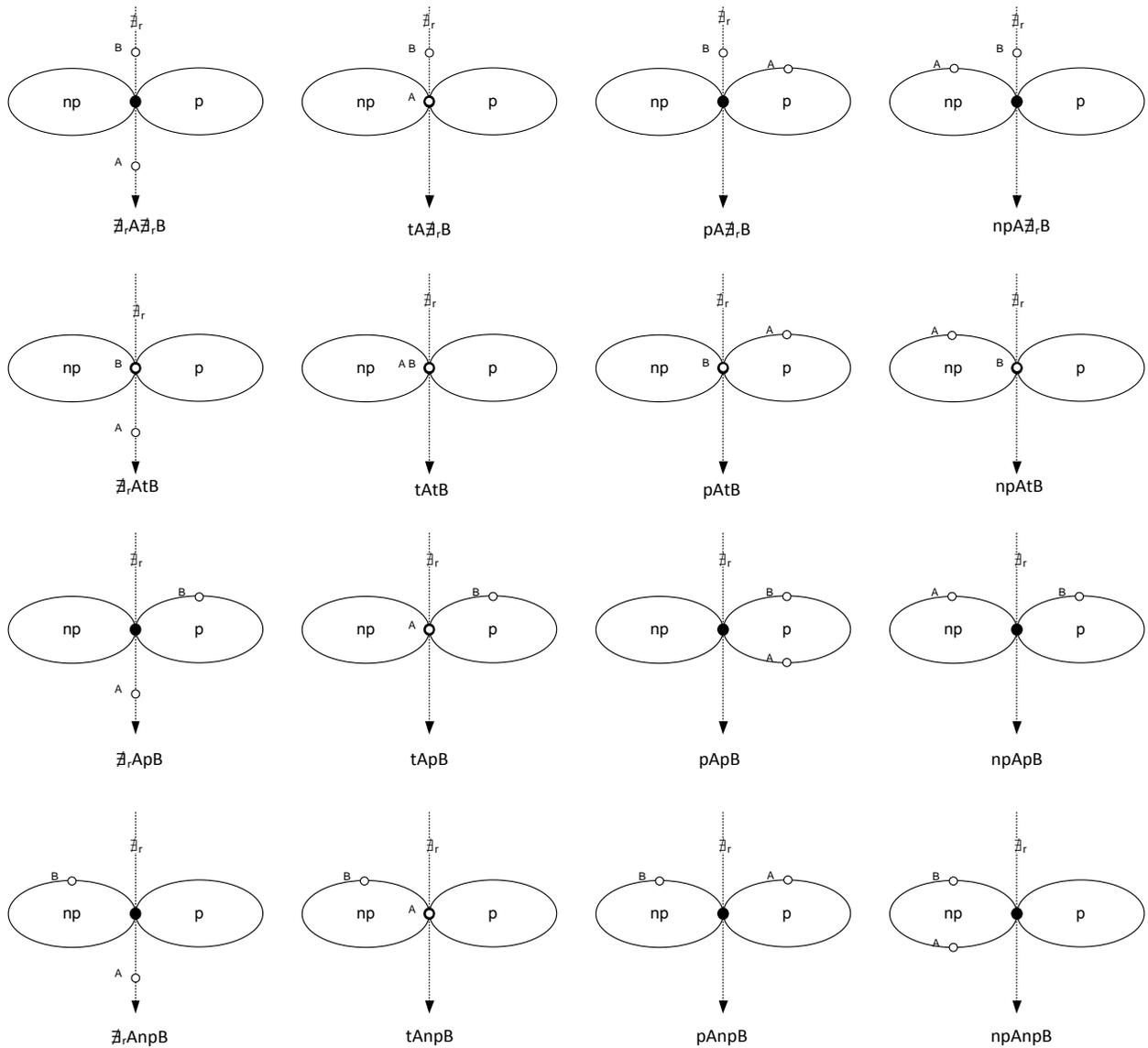


Figure V-1 Représentation conceptuelle des 16 relations spatio-temporelles identitaires. La position des objets A et B décrit les relations dans l'espace conceptuel. Dans le cas de la relation pApB, un modèle de relation spatiale peut être appliqué.

Notons simplement qu'une piste de recherche, non approfondie dans ce travail, serait de représenter non pas les objets ponctuellement mais par l'intervalle de temps sur lequel ils sont définis pour chaque état. Cette représentation serait alors semblable aux relations temporelles entre intervalles de temps d'Allen (Allen 1984), si ce n'est que l'espace temporel sur lequel évoluent les objets serait composé de différentes sections qui correspondent aux états que peuvent prendre ces objets. Une idée de type de représentation est proposée à la Figure V-2.

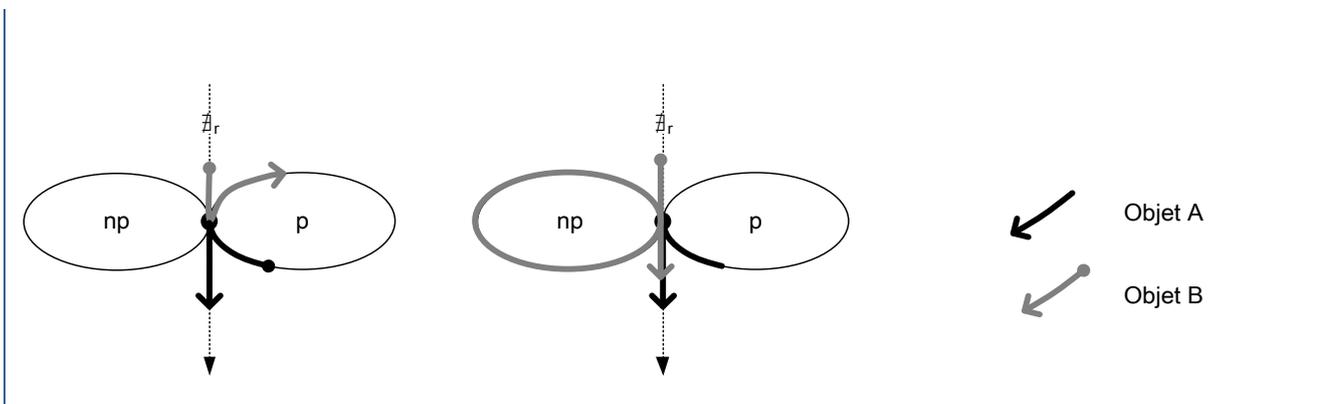


Figure V-2 Représentation de l'évolution d'une relation spatio-temporelle identitaire entre deux objets dans un espace conceptuel. Cette représentation est proche des représentations entre intervalles temporels tels que définis par Allen. Ces relations ne se font pas sur une ligne d'évolution temporelle mais dans l'espace conceptuel des différents états spatio-temporels identitaires possibles pour un objet.

ii. Représentation en « pattern » des relations STS-i

La représentation symbolique des relations entre états spatio-temporels identitaires consiste en le croisement de la symbolique précédemment définie pour un état spatio-temporel identitaire avec lui-même. Afin de rendre la représentation visuellement plus appréhendable, nous choisissons d'effectuer une rotation du symbole afin de l'imbriquer et de permettre une représentation plus proche de celle d'une « fleur ». La Figure V-3 propose une représentation de la construction de ces symboles. On y voit que chaque zone correspond à un état spatio-temporel identitaire pour un objet. Si l'objet se trouve dans cet état, alors la zone correspondante sera grisée. Toutes les configurations de représentations ne sont dès lors pas possibles. Comme déjà expliqué, le choix de positionner l'état de transition au centre de la représentation signifie que cet état est nécessaire au passage d'un état à un autre. Il possède également une représentation plus petite que les autres états pour signifier que seuls ces états de transition peuvent être instantanés.

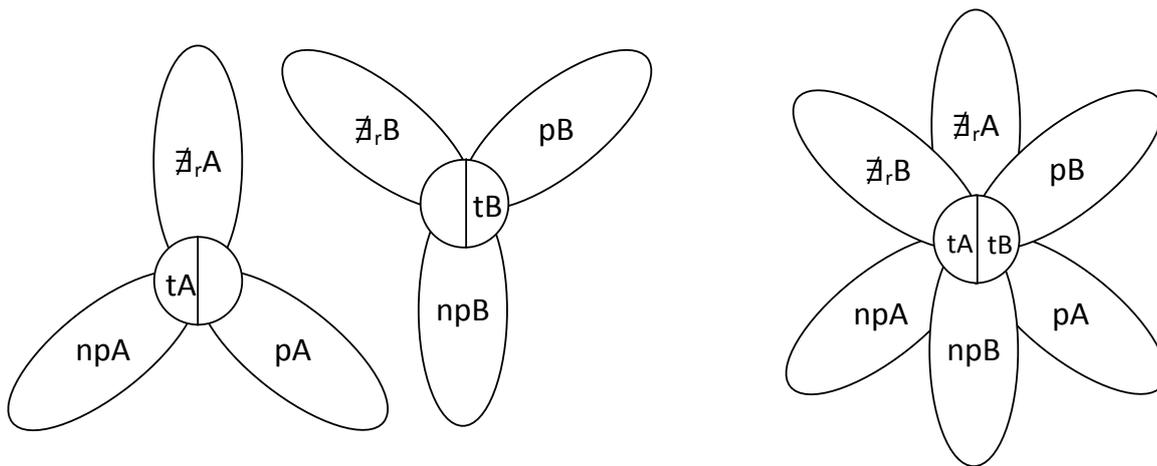


Figure V-3

Construction de la représentation en pattern des relations spatio-temporelles identitaires. La construction s'appuie sur la combinaison de la représentation des états spatio-temporels identitaires précédemment définis. Dans cette représentation combinée, le cœur du symbole de « fleur » est divisé en deux afin de représenter les deux états de transition. Chaque pétale représente un état spatio-temporel identitaire valable obligatoirement pour une durée de temps. C'est pour cette raison qu'ils sont représentés via une symbolique plus grande.

Les 16 symboliques de représentations de relations spatio-temporelles identitaires sont présentées Figure V-4. D'une manière générale, une telle représentation des relations entre états spatio-temporels pourrait faire intervenir une spatialité si le sujet de la modélisation concerne des objets spatiaux. Dans ce cas, le cas de relation $pApB$ pourrait être élargi afin de prendre en compte une logique de relation spatiale telle que les relations topologiques ou autres. Notons cependant que la représentation que nous proposons n'est pas limitée à des applications spatiales, c'est pour cette raison que nous n'incluons pas directement une spatialité d'objets dans ces représentations. Par la suite, nous raffinerons ces représentations afin de tenir compte d'une relation possible entre deux objets assimilés à des points. Dans ce cas, les relations possibles d'un point de vue topologique entre deux éléments seront soit une relation de disjonction soit une relation d'égalité. Le cas $pApB$ sera alors étendu par ces deux relations. Leur représentation sera également adaptée, les deux objets ne seront pas à la même position lorsqu'ils seront égaux et seront représentés à des positions différentes lorsqu'ils seront disjoints.

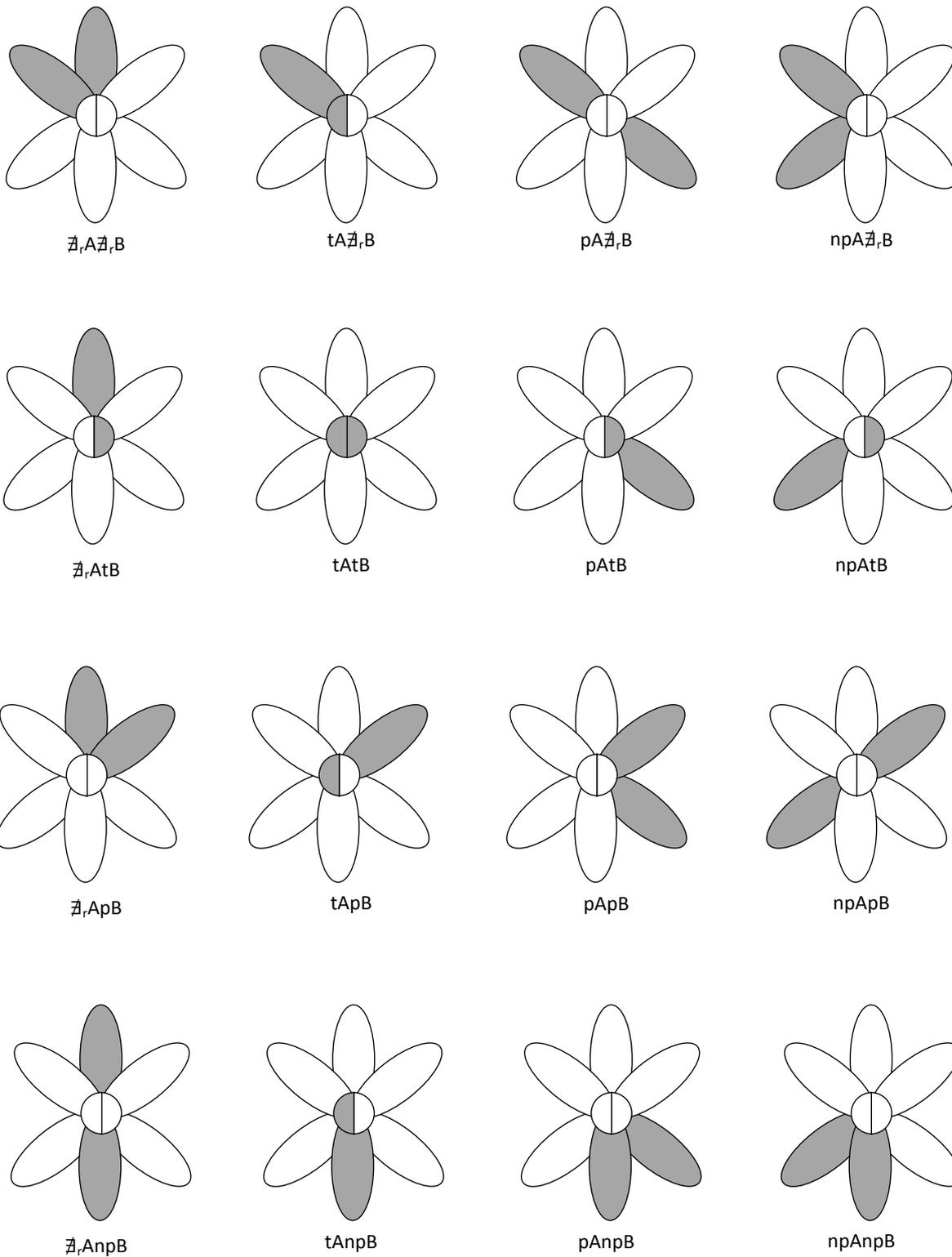


Figure V-4 Représentation symbolique des 16 relations spatio-temporelles identitaires entre deux objets. Les zones grisées correspondent aux états dans lesquelles se trouvent les deux objets au moment de la relation. La définition des zones est proposée à la Figure V-3.

3. Théorie de la dominance appliquée au cas du STS-i

Comme nous l'avons déjà montré précédemment, les états spatio-temporels identitaires décrivent un espace quantitatif sur base de descripteurs qualitatifs. De cette manière, nous avons pu construire un espace de dominance décrivant les états spatio-temporels identitaires. Comme la définition de nos relations entre états spatio-temporels identitaires correspond à une multiplication des deux ensembles d'états spatio-temporels identitaires, il est également possible de définir un espace de dominance qui décrit ces relations.

A. Espace de dominance des relations STS-i

Par définition, la combinaison de deux espaces de dominance est également un espace de dominance (voir Chapitre II.7.C). Cette propriété est à la base de la définition de l'espace de dominance des relations entre états spatio-temporels identitaires. Nous combinons l'espace de dominance de l'état spatio-temporel identitaire d'un objet A avec l'espace de dominance d'un objet B :

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{AB} &\triangleq \mathcal{S}_A \otimes \mathcal{S}_B \\ &\text{avec} \\ \mathcal{S}_A &= \{-><, +><, 0><, -0, +0, 00\} \\ \mathcal{S}_B &= \{-><, +><, 0><, -0, +0, 00\} \end{aligned} \quad (5.3)$$

On obtient alors le résultat suivant :

$$\mathcal{S}_{AB} = \left\{ \begin{array}{l} ->< -><, +>< -><, 0>< -><, -0-><, +0-><, 00-><, ->< +><, +>< +><, \\ 0>< +><, -0+><, +0+><, 00+><, ->< 0><, +>< 0><, 0>< 0><, -00><, +00><, \\ 000><, ->< -0, +>< -0, 0>< -0, -0-0, +0-0, 00-0, ->< +0, +>< +0, 0>< +0, \\ -0+0, +0+0, 00+0, ->< 00, +>< 00, 0>< 00, -000, +000, 0000 \end{array} \right\} \quad (5.4)$$

Cet ensemble représente bien l'espace de dominance des relations entre états spatio-temporels identitaires. L'ensemble de l'équation (5.4) est ordonné selon l'ordre de dominance. Ainsi, la relation 0000 domine toutes les autres. La formalisation de l'espace de dominance des relations entre états spatio-temporels identitaires est donnée par la paire suivante.

$$\mathcal{S}_{AB} \triangleq (\mathcal{S}_{AB}, >) \quad (5.5)$$

L'expression de l'ensemble de dominance proposé n'est pas facilement interprétable. A nouveau, la représentation du graphe de dominance et des transitions de dominance qui le composent permet d'explicitier les relations de dominances entre les relations STS-i. De cette manière, nous pouvons proposer la création du graphe conceptuel de voisinage des relations STS-i via une approche formalisée.

B. Graphe de dominance

Le graphe de dominance que nous obtenons (voir Figure V-5) met en jeu un certain nombre de relations et d'états qui n'ont pas d'existence dans le monde réel. Ceux-ci sont représentés via une case blanche dans le graphe de dominance. Les flèches quant à elles représentent les relations de dominances entre les relations STS-i. Comme dans le cas du diagramme de dominance entre STS-i, les relations de dominance nous indiquent quels états peuvent être valables uniquement pour un instant et si, en bordure d'un instant, deux états sont en perturbation, lequel dominera l'autre. Le graphe nous indique que l'état le plus dominateur est la relation tAtB. Il s'agit du cas où les deux systèmes sont en transition. Notons que, comme les relations représentées par des traits pleins symbolisent les relations de dominance orthogonales, soit celles qui ne mettent qu'un seul système en mouvement à la fois. Les relations diagonales, quant à elles, représentent une transition simultanée des deux systèmes. Par souci de lisibilité et comme ces transitions diagonales ne sont pas prises en compte afin d'étudier les chemins de dominance, nous ne les représentons pas dans la figure suivante. L'analyse plus approfondie du diagramme permet de mettre en lumière une certaine symétrie dans les relations. En effet, plus on se dirigera vers un état de non-existence pour un ou l'autre objet, plus on ira vers une relation dominée par les autres. La représentation que nous proposons ici n'aide pas à la lecture de l'espace de dominance. Dans la section suivante, une forme plus aisément interprétable est présentée.

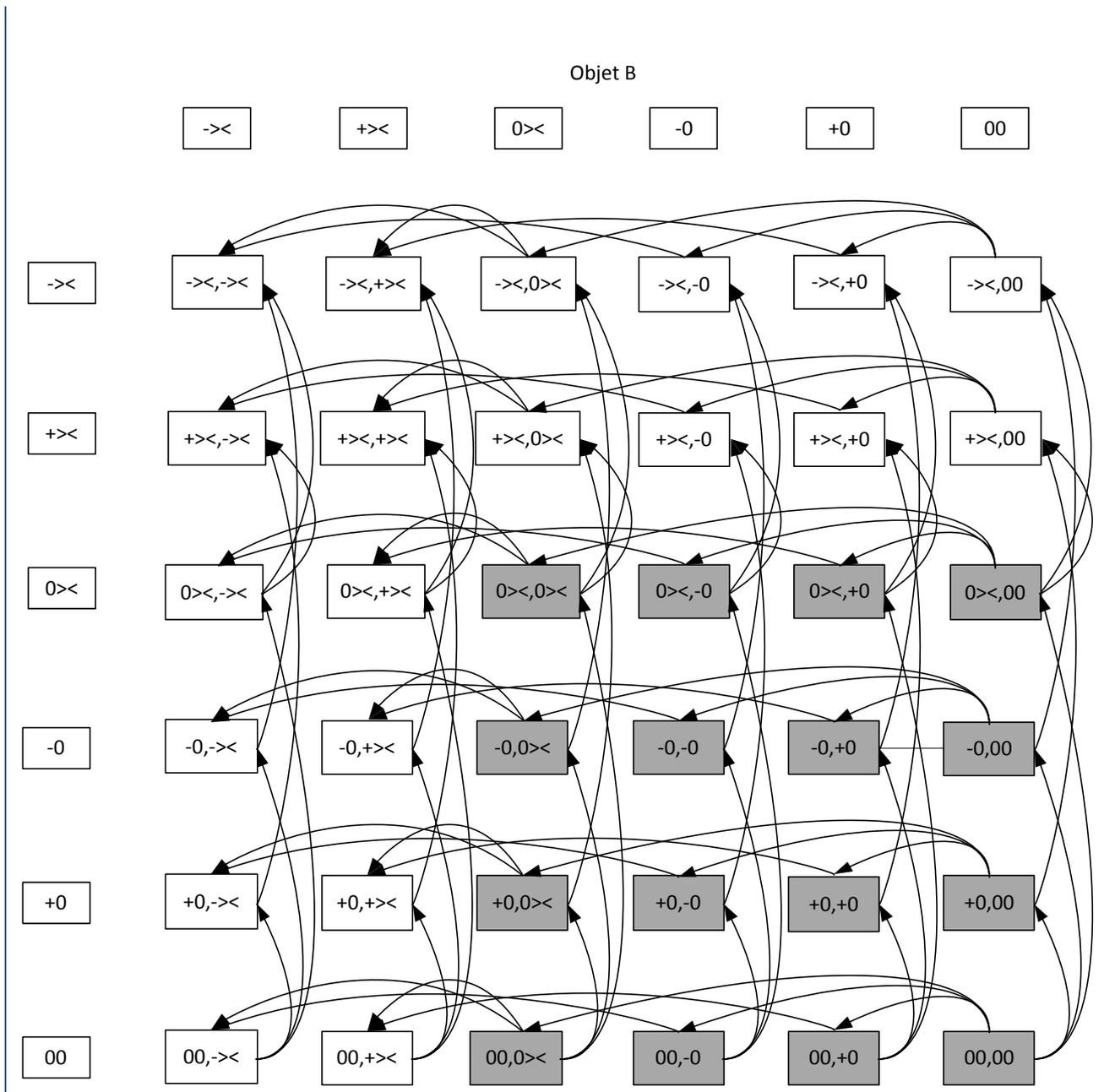


Figure V-5 Graphe de dominance appliqué aux relations entre états spatio-temporels identitaires. Les valeurs grisées représentent celles qui ont une interprétation dans le monde réel. Les flèches symbolisent les transitions orthogonales de dominance. Les transitions diagonales autorisant le changement simultané des deux systèmes ne sont pas représentées par souci de lisibilité.

Afin d'aider le lecteur, nous proposons à la Figure V-6 une version simplifiée de la Figure V-5. Dans cette représentation, nous ne montrons que les relations qui ont une interprétation dans le monde réel. De plus, nous avons traduit les valeurs qualitatives de dominance par les prédicats des relations spatio-temporelles préalablement définies. C'est sur la base de ce diagramme que sera proposée la représentation du graphe de voisinage conceptuel.

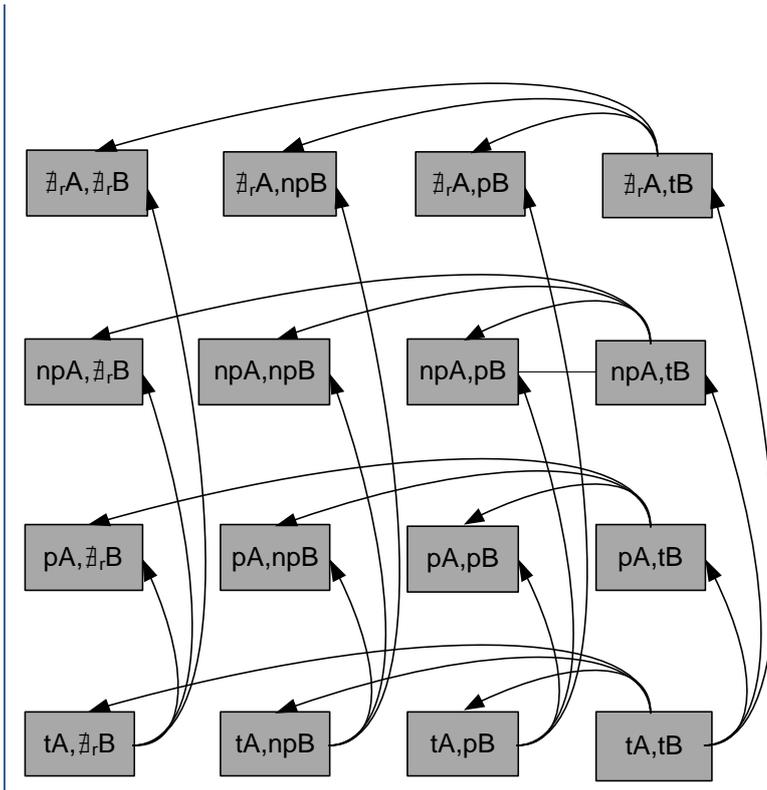


Figure V-6

Diagramme de dominance simplifié des relations entre états spatio-temporels identitaires. Seules les relations ayant une interprétation dans le monde réel sont représentées. Les valeurs qualitatives sont également remplacées par les prédicats définissant les relations entre STS-i.

4. Diagramme conceptuel de voisinage

A. Deux méthodes de conception

Le diagramme conceptuel de voisinage des relations entre STS-i peut être établi de deux façons différentes.

La définition des transitions possibles par une étude intuitive des différentes successions possibles entre les relations est une première méthode. Cette étude peut prendre en compte plusieurs facteurs de restriction. D'une part, comme défini dans les graphes conceptuels de voisinage pour des relations spatiales, un seul système est autorisé à changer à la fois. Si l'on autorise la modification des deux systèmes en même temps, alors il faut considérer un jeu de transitions supplémentaires, ce qui conduit à un graphe quasi complet entre les relations. Si l'on analyse les graphes de voisinage entre relations topologiques du modèle des 9-i, on voit que deux relations voisines conceptuellement seront distinguées par un changement unique au niveau de sa matrice d'intersection topologique. On peut effectuer un parallèle entre ces changements et celui des transitions entre états spatio-temporels. Si l'on autorise plus d'un changement à chaque instant, alors on autorise plus d'un changement dans la matrice

d'intersection topologique. Un autre critère qui peut être défini au moment de la réalisation du diagramme conceptuel de voisinage est la possibilité pour un objet d'avoir plusieurs phases successives d'existence ou pas. Dans le cadre de certaines modélisations, il n'est pas concevable d'autoriser différentes phases d'existence. C'est la raison pour laquelle la zone de non-existence de l'espace conceptuel sur lequel sont représentées les relations est représentée comme une droite alors que les deux autres zones sont des boucles. Ceci peut également être traduit dans le diagramme conceptuel de voisinage. Nous détaillerons cette particularité plus loin dans ce chapitre.

La seconde méthode pour réaliser un graphe conceptuel de voisinage est d'étudier les chemins de dominance qui existent dans le graphe de dominance. Nous ne considérons que les transitions orthogonales, i.e. celles qui ne mettent en jeu qu'un seul système de dominance à la fois. De cette manière et en réorganisant la Figure V-6 on peut obtenir le résultat suivant. Nous avons choisi de laisser la représentation des relations de dominance. Cependant, il faut bien être conscient du fait qu'une flèche peut être traversée dans les deux sens et ce sans limitations de nombre. Nous choisissons cette seconde méthode afin de concevoir notre diagramme conceptuel de voisinage. Cette méthode n'est pas empirique et nous assure de mettre en lumière l'ensemble des relations possibles. Le graphe de voisinage est présenté à la Figure V-7.

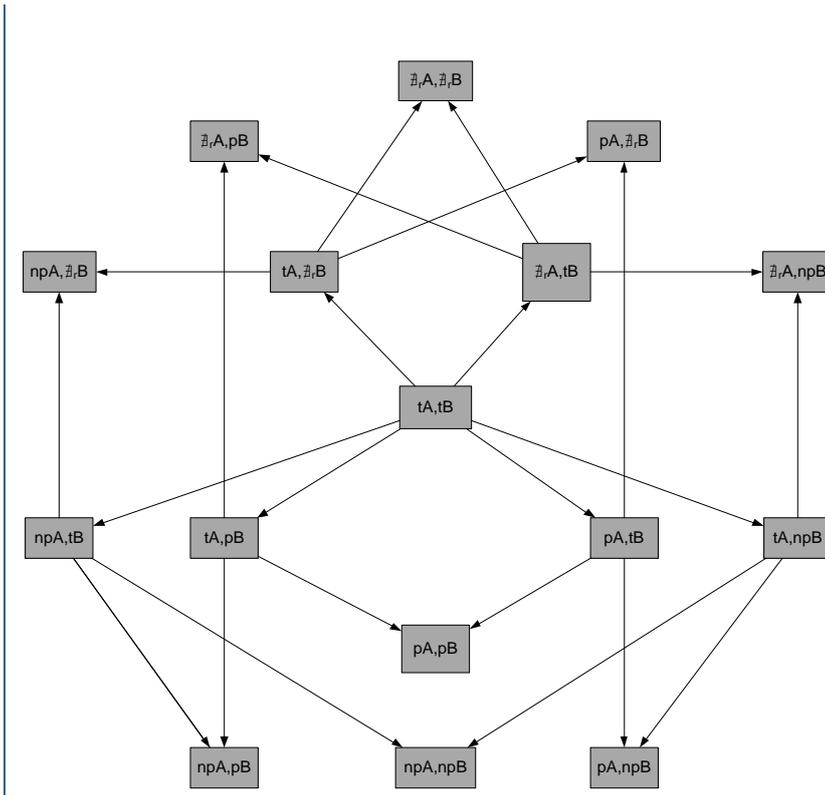


Figure V-7

Graphe de voisinage des relations entre STS-i. Le graphe est organisé pour rendre compte des différentes transitions possibles. Les états identiques des deux objets sont situés sur l'axe central du diagramme. Les relations pour lesquelles existe un état de non-existence sont situées sur la partie supérieure du graphe tandis que les relations pour lesquelles les deux objets sont coexistants sont placées en bas du graphe. Les flèches symbolisent les relations de dominance entre les relations, mais elles peuvent être parcourues de façon bidirectionnelle.

B. Applications particulières dues à la nature SPT des relations

Bien que les relations d'un graphe de voisinage puissent être parcourues de façon bidirectionnelle, nous remarquons que dans certaines applications cela n'est pas toujours vrai. En effet, la nature même des relations que nous représentons ici influence les transitions possibles dans le graphe de voisinage. Si l'on considère un graphe de voisinage entre relations spatiales, on peut, sous certaines conditions, imaginer une succession de transitions infinies entre une relation de disjonction et une relation de contact. Le passage d'une relation à une autre n'a pas d'influence même sur la nature de l'information représentée. Dans le cas des relations entre STS-i le problème est différent. Comme les relations STS-i sont basées sur l'état d'un objet, et que celui-ci ne peut pas changer indéfiniment (Wolter and Zakharyashev 2000), la relation qui lie ces deux états ne le pourra pas non plus. Si l'on considère qu'un objet ne peut pas avoir plusieurs fois au cours de son évolution une réalité dans l'espace de modélisation, quels sont alors les changements au niveau du graphe de dominance ?

Autrement dit, qu'advient-il du graphe si on n'autorise pas la résurrection ou la réincarnation des objets ? Notons qu'il est nécessaire de distinguer le passage d'un état de non-existence à un état d'existence avec le passage d'un état de présence à un état de non-présence.

Dans ce cas, le graphe devra être divisé en trois zones. Les schémas de transition entre relations possibles sont au nombre de deux. Soit un objet de la relation existe puis n'existe plus, soit un objet de la relation n'existe pas, existe et puis n'existe plus. La transcription de ces deux règles dans le graphe de voisinage est effectuée en surimposant à celui-ci des zones de non-coexistence, de transition et de coexistence. Ces zones sont représentées en gris sur la Figure V-8. Le passage d'une relation à une autre se fera en ne passant qu'au maximum deux fois dans la zone de coexistence. Si l'on se déplace de la zone de non coexistence vers la zone de coexistence et que l'on retourne dans la zone de non-coexistence alors on ne peut plus la quitter.

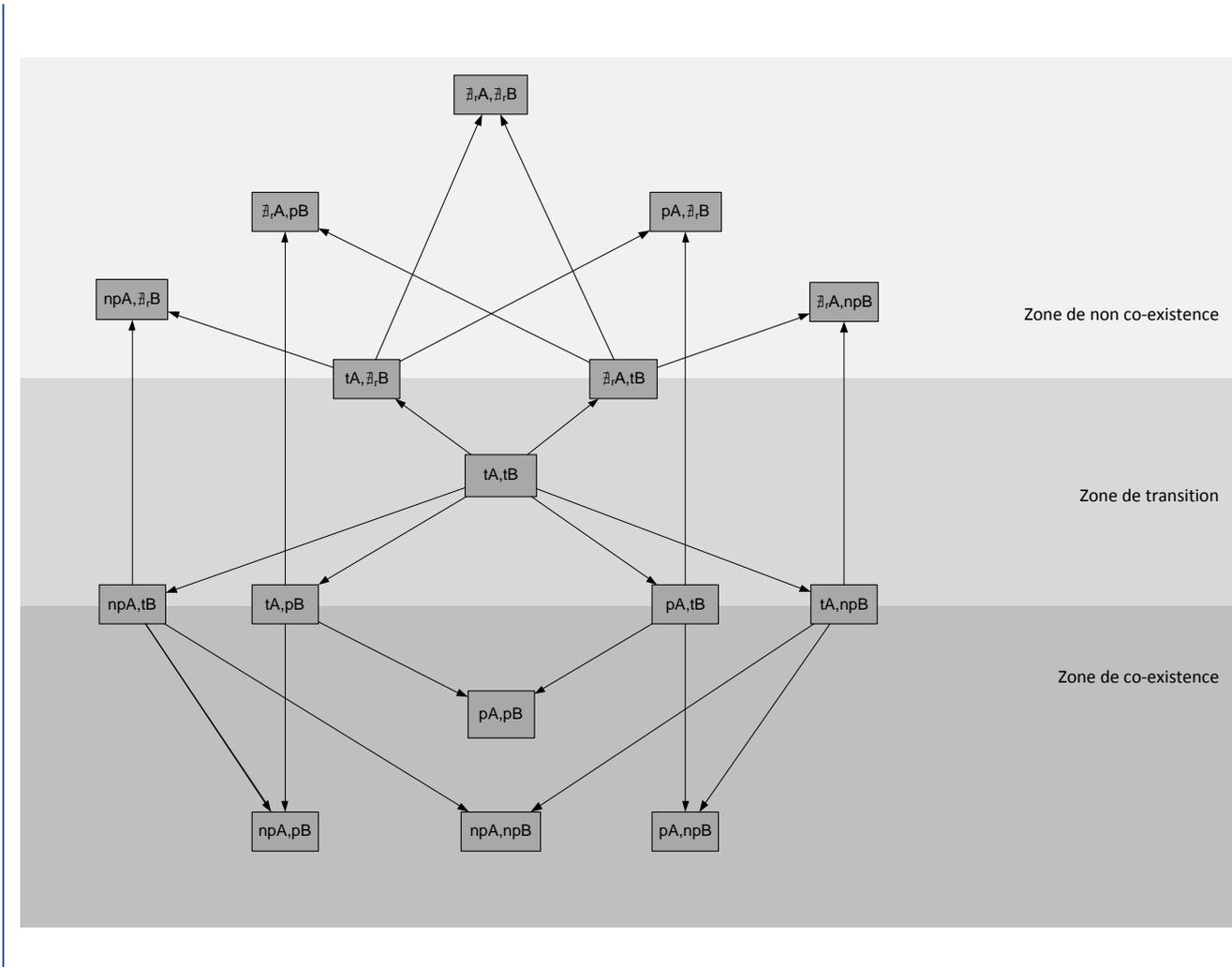


Figure V-8 Graphe conceptuel de voisinage des relations entre STS-i auquel sont ajoutées les zones de non-coexistence, de transition et de coexistence. Ces zones précisent les transitions possibles pour des objets lorsqu'on ne considère pas les concepts de résurrection et de réincarnation.

La Figure V-9 montre les possibilités de transitions entre relations. Il est possible de partir de n'importe quelle zone du graphe. On peut se déplacer autant de fois que l'on veut à l'intérieur d'une zone. On peut également se déplacer autant de fois que l'on veut de la zone de transition à la zone de coexistence et vice-versa (flèche pleine sur le graphique) Les transitions représentées en gras peuvent être traversées autant de fois qu'on le souhaite. Cependant, on ne peut passer deux fois dans la zone de non-coexistence. La seconde fois que l'on arrive dans cette zone, on peut encore se déplacer au sein de celle-ci mais on ne peut plus en sortir (flèche pointillée sur le graphique). Les relations qui se situent en bordure de la zone de transition sont considérées comme appartenant aux deux zones. Par exemple la relation pA_tB appartient à la fois à la zone de transition et à la zone de coexistence. Le critère le plus restrictif de cette double appartenance sera chaque fois pris en compte.

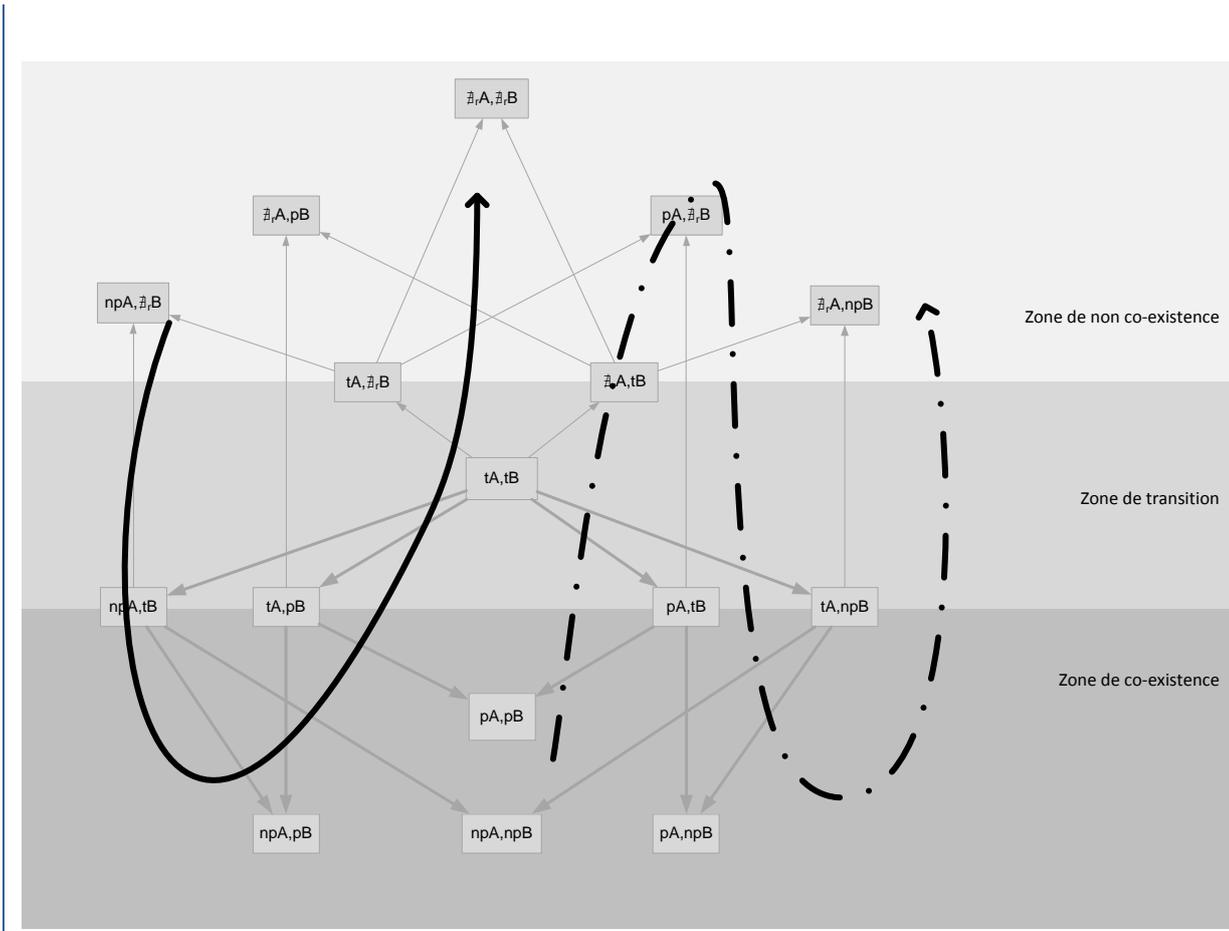


Figure V-9 Transitions possibles entre les relations du graphe conceptuel de voisinage. Les deux flèches indiquent les mouvements possibles dans le graphe de voisinage. Il est possible de partir de n'importe quelle zone du graphe mais on ne peut passer que deux fois dans la zone de non-coexistence. Les relations en bordure de la zone de transition sont considérées comme faisant partie des deux zones qu'elles touchent.

Le graphe de voisinage des relations entre STS-i est très important pour la suite des modélisations. En effet, chaque changement de relation entre deux objets au cours de leur évolution dans l'espace et dans le temps devra suivre ce schéma. Une transition directe entre deux relations, non voisines conceptuellement dans le graphe, admet qu'il existe des états intermédiaires qui sont les étapes intermédiaires servant à relier conceptuellement les deux relations.

Le graphe conceptuel de voisinage autorisant le changement de deux systèmes simultanément, soit en prenant en compte les transitions diagonales du graphe de dominance, est présenté à la Figure V-10.

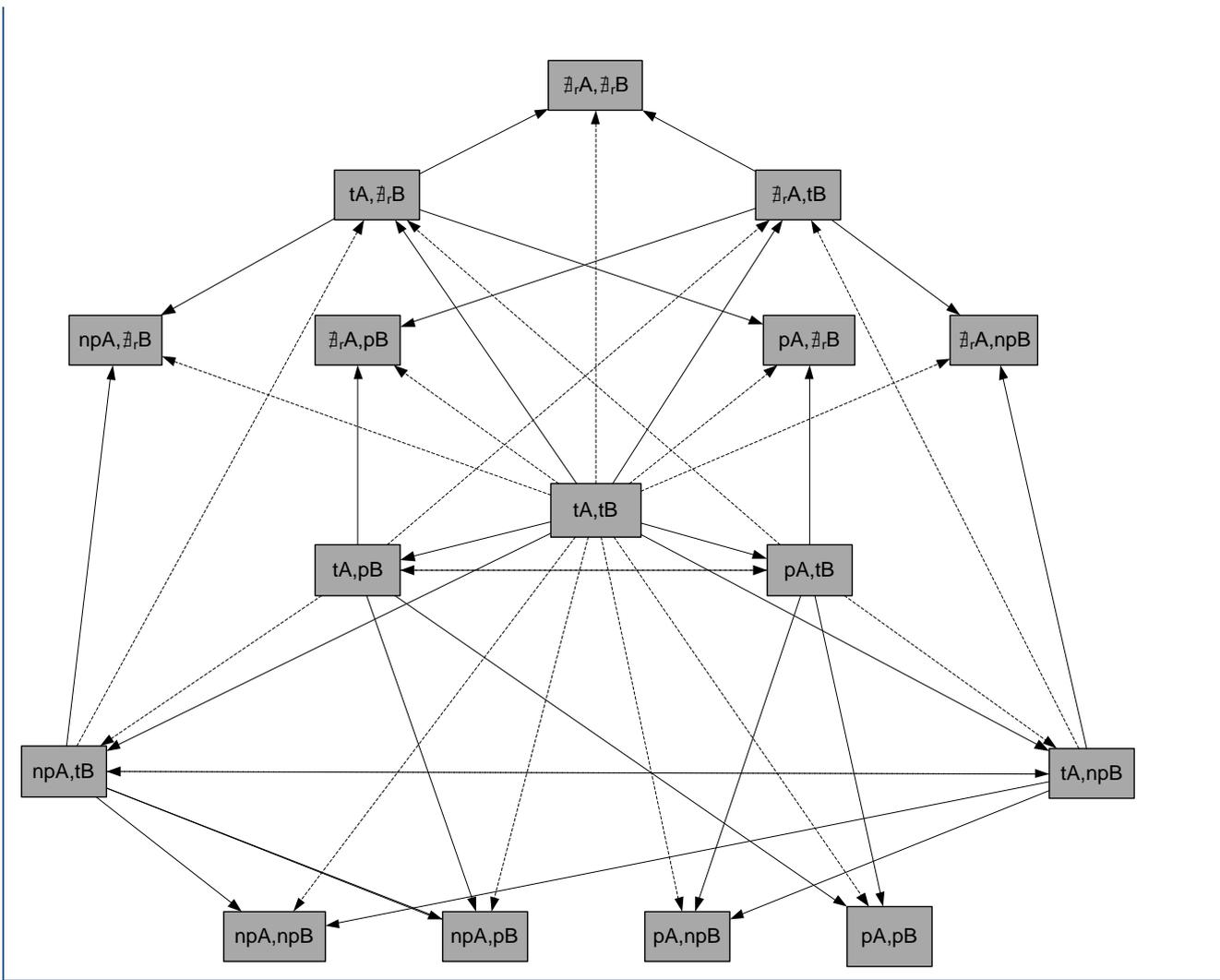


Figure V-10 Graphe conceptuel de voisinage des relations spatio-temporelles identitaires considérant le changement simultané de deux systèmes. Les traits pleins représentent les transitions orthogonales et les traits pointillés représentent la transition simultanée de deux systèmes, soit les transitions diagonales dans le graphe de dominance.

On voit dans ce cas que l'état de double transition $tAtB$ est conceptuellement voisin de tous les autres. Tous les états ne sont cependant pas en relation. Cette vision des voisinages conceptuels des relations spatio-temporelles identitaires est sans doute plus proche de la perception d'un utilisateur final pour lequel le changement d'un seul système à la fois peut paraître plus ardu.

5. Conclusion

Les relations entre STS-i sont une étape importante pour modéliser les relations spatio-temporelles entre identités d'objets. Ces relations sont définies sur base des prédicats servant à la définition des états spatio-temporels identitaires. Il existe 16 relations entre STS-i. On voit que la combinaison de ceux-ci permet également d'étudier leur transition via la théorie de la dominance. La construction de l'espace de dominance conduit à une représentation d'un graphe conceptuel de voisinage. L'interprétation du graphe conceptuel de voisinage admet des restrictions supplémentaires lorsqu'on considère les phénomènes de réincarnation et de résurrection comme étant impossibles. Cette limitation est souvent d'application dans des modélisations à caractère géographique. En toute généralité, ces limitations ne sont pas nécessaires pour modéliser l'information d'applications qui ne mettent pas en jeu de la réalité physique des objets considérés.

Cette étude amène à une réflexion sur l'évolution des relations entre STS-i. En effet, comme nous l'avons remarqué au début du chapitre, il existe deux manières d'étudier la relation entre deux objets. Soit on étudie la relation d'une façon statique, soit on étudie l'évolution de celle-ci au travers du temps. La définition des relations entre STS-i rend compte de cette étude statique et la théorie de la dominance combinée avec le graphe de voisinage donne un fondement théorique à l'étude de l'évolution des relations entre STS-i au travers du temps. Le chapitre suivant va, dans le cadre d'histoires spatio-temporelles de données géographiques, montrer comment les relations entre STS-i peuvent formaliser les histoires spatio-temporelles et comment cette formalisation pourra être utile au raisonnement sur celles-ci.

Chapitre VI.

Configurations de vie et de mouvement

*Le cadre de l'espace et du temps est essentiellement statique:
un corps, une entité physique, qui a une localisation exacte dans l'espace et dans le temps est,
par le fait même, privé de toute propriété évolutive.
Louis Victor de Broglie*

1. Introduction

Le principe même de l'étude de phénomènes spatio-temporels est qu'ils évoluent dans le temps. L'avancement de l'état d'objets dans le temps change la nature de ces états. Dès le moment où l'on considère le temps, on doit tenir compte d'une modification de l'état de chaque chose. Les attributs associés aux objets évoluent, les objets vieillissent, ils se construisent et se détruisent. Il en est de même pour les relations qu'entretiennent ces objets. Ainsi aucune relation ne reste identique dans le temps. Si l'on se réfère aux objectifs de notre recherche, on voit que l'étude de l'évolution de la relation identitaire entre objets dans le temps n'est pas encore établie et formalisée (voir Table 1 et Table 2). Le but de ce chapitre est donc de rendre compte de l'évolution des relations entre les états spatio-temporels identitaires de deux objets dans le temps. Si on demande à un groupe de quidam de représenter l'évolution d'un objet dans le temps, la majeure partie d'entre eux aura tendance à représenter une « trace » de cet objet dans le temps. Il aura une vision continue de l'évolution de l'objet dans le temps. En effet, la perception que nous avons de l'évolution d'un objet dans le temps est continue. Nous ne concevons pas le temps comme une succession d'instantanés et, si

on représente un objet à divers instants, nous aurons tendance à relier l'état de cet objet entre ces instants. Bien qu'à l'heure actuelle les principaux modes d'acquisition de données ne fournissent qu'une succession d'états dans le temps, le monde qu'ils décrivent est fondamentalement continu. Sur base de cette acquisition discrète, nous reconstruisons une continuité de notre espace-temps. Beaucoup d'exemples de cette reconstruction de continuité spatio-temporelle peuvent être exposés. Citons notamment les images visualisées sur un téléviseur. Dans ce cas, la fréquence de la succession des images est suffisante pour que notre cerveau reconstruise naturellement une continuité dans l'affichage de celles-ci. Si on dessine un objet sur chacune des feuilles d'un bloc de papier et que l'on regarde rapidement la succession de ces dessins, on en déduit une évolution du dessin. La reconstruction de la continuité spatio-temporelle est cependant plus délicate lorsque la succession des états du monde ne sont pas temporellement rapprochés. Dans cette situation, plusieurs interprétations des transitions deviennent alors possibles. Personne ne se demande si un mouvement ou une action n'est pas masquée dans un film par la fréquence de projection des images successives. Cependant, si on regarde une carte d'occupation du sol d'une même zone géographique à deux années successives, on peut alors interpréter les changements de manière différente. Afin d'interpréter ces changements et de fournir une interprétation plausible, il est alors nécessaire d'utiliser des outils de raisonnements spatio-temporels pour vérifier si le schéma de transition proposé est cohérent. Les diagrammes conceptuels de voisinage sont un outil important de cette interprétation. Si, à deux instants du monde différents, on constate que les deux situations ne sont pas voisines dans le diagramme, il est alors nécessaire de tenir compte du fait qu'entre ces deux situations les états intermédiaires du diagramme de voisinage ont dû exister.

Ce chapitre présente une méthode afin de formaliser l'évolution des relations entre deux objets dans l'espace et dans le temps. Nous commençons par présenter le mode de représentation de l'évolution d'un objet dans l'espace et dans le temps le plus connu, à savoir les histoires spatio-temporelles ou les « life-lines » (lignes de vie). Nous montrerons ensuite comment il est possible de formaliser celles-ci et de les traduire via des opérateurs qualitatifs tout en gardant une succession plausible entre les différents états analysés. Nous proposons dès lors une méthode qui permet de générer l'ensemble des configurations possibles de l'évolution d'une relation spatio-temporelle identitaire entre deux objets dans l'espace et dans le temps. Nous appelons ces configurations les « *configurations de vie et de mouvement* ».

2. Histoires spatio-temporelles

Comme le définit Hayes (Hayes 1990), le déplacement d'un objet à n dimensions dans le temps crée une forme spatio-temporelle de $n+1$ dimensions. Cet objet est appelé l'histoire spatio-temporelle de celui-ci. La représentation d'une histoire spatio-temporelle est vue comme la trace du déplacement de cet objet. Si l'on considère un objet A observé à différents

instants, alors on peut reconstruire l'histoire de son déplacement en reliant ses différentes positions spatiales dans le temps afin de représenter son histoire spatio-temporelle. Le déplacement d'un point (0D) dans le temps créera une ligne (1D), le déplacement d'une ligne (1D) créera une surface (2D) et ainsi de suite. Il est à noter que le déplacement d'une ligne dans certains cas particuliers peut créer également une ligne, ceci dans le cas d'un déplacement de la ligne droite dans la direction de son axe principal. La représentation de l'histoire temporelle d'un volume (3D) se déplaçant dans le temps n'est quant à elle pas possible car elle impliquerait la représentation d'un objet à 4 dimensions. Cependant, la conceptualisation et l'analyse de l'histoire spatio-temporelle reste tout à fait envisageable sur un objet à 4 dimensions. La Figure VI-1 représente l'évolution d'un objet A à 5 instants de temps différents et l'interprétation de son histoire spatio-temporelle entre les instants t_1 et t_5 .

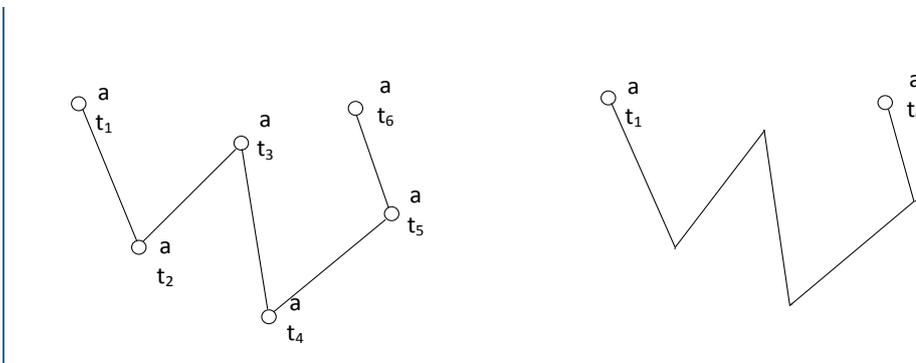


Figure VI-1 Représentation du mouvement d'un point dans le temps en histoire spatio-temporelle. On y voit un objet a se déplacer par 6 instants. La partie de gauche montre le tracé entre chaque instant de temps tandis que la partie de droite montre l'interprétation de ce tracé entre les instants t_1 et t_6 .

La granularité temporelle et spatiale joue un rôle très important dans la représentation des histoires spatio-temporelles. En effet, comme nous l'avons déjà montré, le pas choisi afin de représenter l'histoire spatio-temporelle d'un objet aura de l'influence sur sa représentation. L'exemple de la Figure VI-1 montre une jonction linéaire entre les positions instantanées de l'objet A. On considère donc que le déplacement entre les différentes positions instantanées est linéaire. Si l'on augmente la granularité temporelle, on pourra peut-être se rendre compte que le déplacement n'est pas linéaire mais qu'il admet des variations que nous ne percevons pas dans ce cas. A contrario, si on augmente la granularité temporelle d'une telle représentation on peut alors imaginer relier directement les instants t_1 à t_6 et ne plus percevoir du tout le trajet représenté à la figure.

A. Espaces temporels

Les espaces temporels sont un moyen de représenter l'histoire spatio-temporelle d'un objet (Claramunt and Jiang 2000). Cet espace de représentation fournit une série

d'informations supplémentaires par rapport à une représentation uniquement spatiale. En effet, la représentation spatiale des différentes positions d'objets peut être vue comme la projection d'une histoire spatio-temporelle sur le plan spatial. L'information quant à la distance et la configuration des instants ou intervalles durant lesquels l'objet est observé n'est pas conservée. La Figure VI-1 ne nous renseigne en rien sur la distance temporelle qui sépare les instants t_0 à t_6 . Il n'est donc pas possible d'en déduire leur vitesse de déplacement ni de vérifier si la trace spatio-temporelle représentée est possible dans le monde physique (dans le cas où deux instants seraient égaux ou suffisamment proches pour qu'un objet se déplace plus rapidement que la constante c).

Si l'on imagine un espace spatial à une dimension, alors on peut également représenter un objet A à différents instants dessus. L'interprétation de ce résultat dans un espace temporel est proposée à la Figure VI-2. L'espace temporel propose une représentation où chaque dimension spatiale est associée à un axe orthogonal au précédent. Une dimension temporelle est également représentée orthogonale aux autres axes. On en conclut qu'il est possible de représenter un espace temporel possédant au maximum deux dimensions spatiales. Cependant les principes définis pour celui-ci restent valables pour des espaces temporels de plus de trois dimensions. La représentation montre donc pour chaque instant le croisement entre ceux-ci et la spatialité de l'objet. La forme représentée dans l'espace-temporel est appelée histoire spatio-temporelle. Il ne s'agit pas d'un élément de l'espace mais bien d'un élément de l'espace-temps. Comme présenté au Chapitre II.7.A, certaines formes auront des interprétations impossibles dans le monde réel.

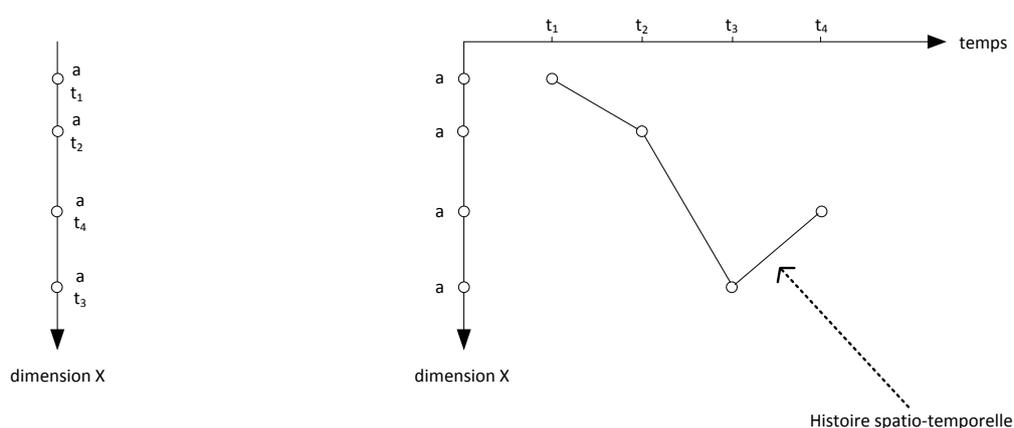


Figure VI-2 Partie de gauche : Représentation de l'évolution d'un objet dans un espace spatial à 1 dimension. Partie de droite : Interprétation de l'évolution de l'objet dans un espace temporel. La trace reliant les différentes positions est appelée histoire spatio-temporelle.

Cette représentation montre que la vitesse de l'objet A est plus petite entre les instants t_1 et t_2 qu'elle ne l'est entre les instants t_2 et t_3 . Cette interprétation ne pourrait être faite en ayant uniquement connaissance de la partie de gauche de la Figure IV-14.

B. Parallèle avec les relations SPT

La représentation en espace temporel est également un outil intéressant afin d'étudier les relations entre des objets se déplaçant dans le temps. En effet, comme on peut le constater sur la Figure VI-3, il est possible de symboliser les histoires spatio-temporelles de deux objets dans un espace temporel. L'analyse des relations entre leurs histoires spatio-temporelles appelle donc à des principes de relations spatiales alors que l'on travaille sur une information spatio-temporelle. Notons que afin de définir les opérateurs spatiaux qui pourront être utilisés sur une telle représentation, il sera souvent plus commode de projeter l'espace temporel dans un espace-temps primitif afin de s'affranchir des limitations dues au temps. La Figure VI-3 montre le croisement de deux objets dans un espace à une dimension. La représentation en espace temporel nous montre directement que la rencontre entre les deux histoires spatio-temporelles a influencé la vitesse de déplacement des deux objets. De plus, elle permet de visualiser directement le lieu de rencontre spatiale et temporelle, ce qui n'est pas évident sur la représentation avec uniquement l'axe spatial. Cette difficulté d'interprétation augmente considérablement lorsqu'on considère un grand nombre de données. En effet, la représentation uniquement spatiale de la projection de traces spatio-temporelles conduit souvent à une telle superposition d'informations que l'interprétation en devient impossible.

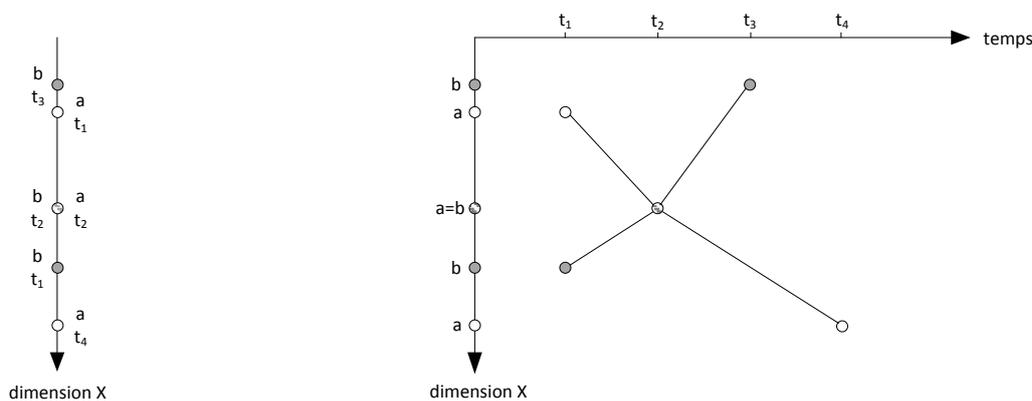


Figure VI-3 Partie de gauche : Représentation de l'évolution de deux points a et b dans un espace à une dimension. Pour chaque observation est également indiqué l'instant auquel a eu lieu l'observation.
Partie de droite : Représentation de l'évolution des objets a et b en espace temporel. On y identifie facilement le point de rencontre spatio-temporelle entre les deux objets.

De la même manière, toute l'interprétation sera identique lorsque l'on travaille sur des objets se déplaçant dans un espace à deux dimensions. Ce cas de déplacement d'objets dans un espace à deux dimensions est une des vues courantes lorsque l'on parle d'information spatio-temporelle. La représentation d'objets se déplaçant dans un espace tridimensionnel est encore limitée dans les cas d'applications à nos jours. La Figure VI-4 représente le déplacement de deux objets dans un espace à deux dimensions et la représentation de leurs histoires spatio-temporelles dans un espace temporel à trois dimensions.

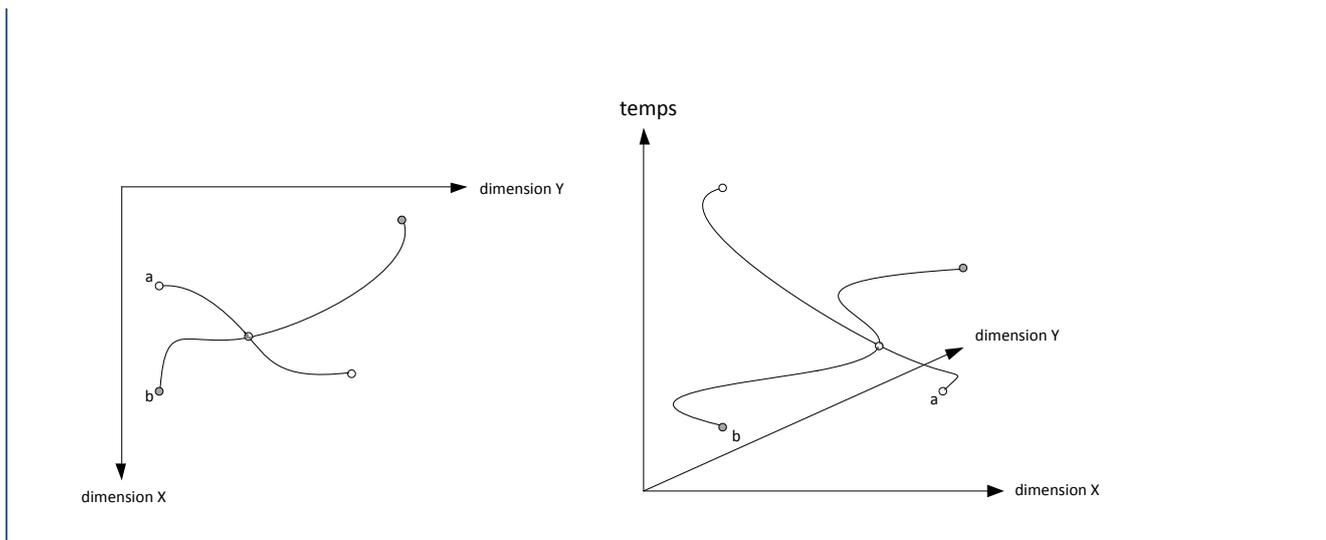


Figure VI-4 Représentation du mouvement de deux objets dans un espace spatial à deux dimensions (partie de gauche) et sa représentation dans un espace temporel à trois dimensions (partie de droite).

La représentation de la projection spatiale de traces spatio-temporelles peut conduire à une mauvaise interprétation de l'information spatio-temporelle. En effet, ce n'est pas parce que visuellement on voit un croisement entre deux histoires spatio-temporelles qu'elle correspond nécessairement à une rencontre dans l'espace et le temps. Alors que c'est toujours le cas dans une représentation en espace temporel. En effet, si un objet passe par la position d'un autre à un temps supérieur au dernier, alors leurs deux histoires spatio-temporelles entreront en contact bien que les deux objets aient été au même endroit ; ils ne l'ont pas été au même instant, ils ne se sont donc pas rencontrés.

C. Relations entre histoires spatio-temporelles et modèles de raisonnements spatio-temporels

Un des principaux champs d'études en raisonnement spatio-temporel concerne les relations qui existent et qui peuvent exister entre les histoires spatio-temporelles de deux objets. Bien que les modèles de raisonnement spatio-temporel ne soient pas toujours formatés de façon à présenter les choses de cette manière, les principaux modèles peuvent être interprétés en fonction de l'analyse qu'ils font des histoires spatio-temporelles et des

géométries qu'ils mettent en œuvre afin d'interpréter celles-ci. Le calcul effectué sur les histoires spatio-temporelles est alors effectué dans un espace-temps primitif. Dans ce type d'espace, la distinction entre les dimensions spatiales et temporelles n'est pas effectuée. C'est la représentation préalable à la distinction de l'espace et du temps. L'histoire spatio-temporelle projetée dans ce type d'espace devient alors une forme spatiale où chaque dimension est identique. Les calculs de relations spatiales qualitatives peuvent alors être effectués.

On peut imaginer plusieurs calculs qualitatifs sur les histoires spatio-temporelles. Le calcul le plus simple à envisager est celui des relations topologiques entre deux histoires spatio-temporelles. Dans le cas du déplacement de deux objets A et B, la relation topologique que vont entretenir les deux histoires spatio-temporelles nous informera sur le type de contact spatio-temporel qu'entretiennent ces deux objets. La Figure VI-5 montre deux espaces-temporels pour lesquels il existe ou pas une rencontre spatio-temporelle entre les objets A et B.

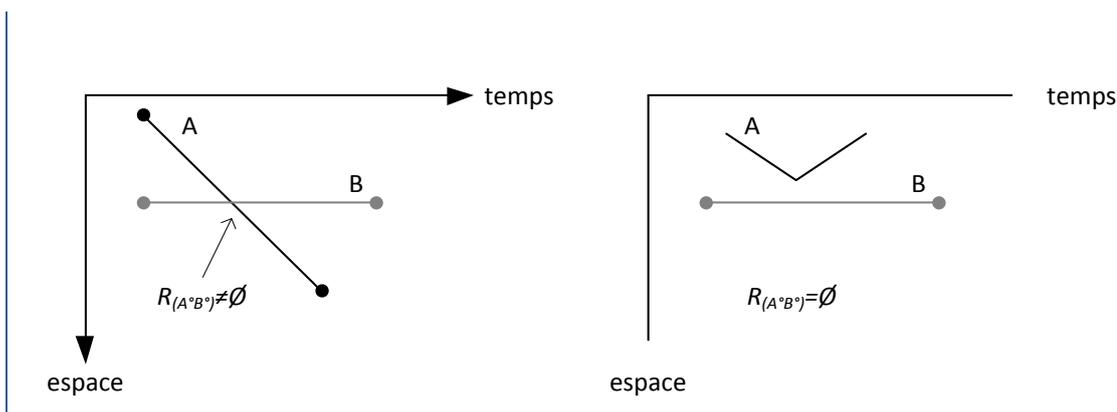


Figure VI-5 Représentation de deux espace-temporels pour des objets A et B. Dans le cas de gauche, il y a une rencontre spatio-temporelle entre les objets A et B. La relation topologique entre les deux intérieurs existe. Dans le cas de droite, il n'y a pas de relation entre les deux intérieurs des objets A et B.

La géométrie projective permet de raffiner ce type de contact. En effet, en fonction de l'ordre du point qui sera en contact avec la seconde histoire spatio-temporelle, on pourra déduire si ce contact a lieu au moment d'un changement brusque de direction de l'objet, son histoire spatio-temporelle présentant un point d'inflexion à cet instant. La Figure VI-6 expose deux types de rencontres qui n'auraient pas été différenciés par l'analyse d'une relation topologique sur les deux histoires spatio-temporelles.

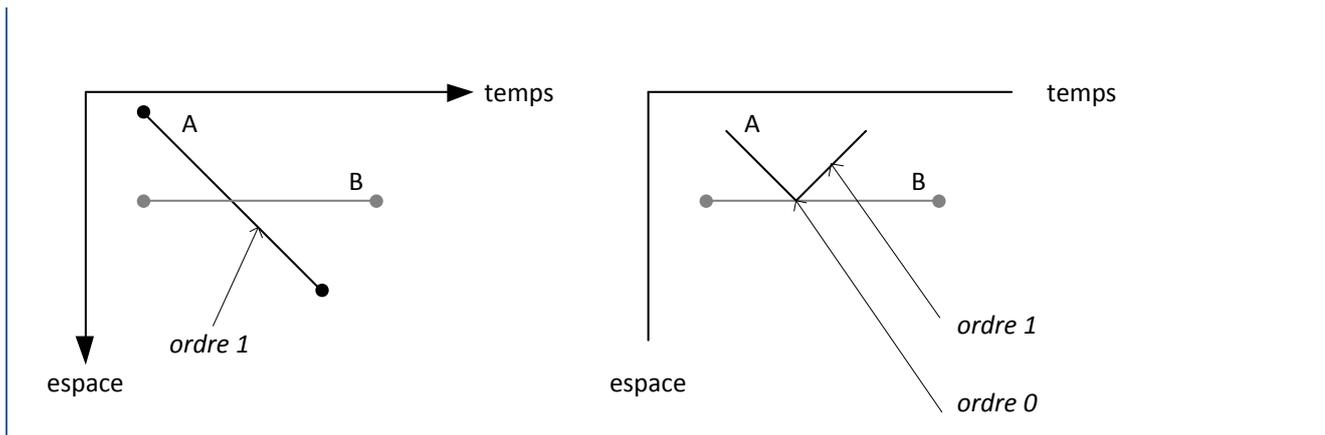


Figure VI-6 Représentation de deux espaces temporels pour deux types de rencontre entre les objets A et B. Dans le cas de gauche, la rencontre a lieu (spatialement et temporellement) pour des points d'ordre projectif 1. Cela signifie qu'il n'y a pas de changement non-continu de la trajectoire des objets au moment de la rencontre. Dans le cas de droite, la rencontre a lieu à un point d'ordre projectif 0 pour l'objet A. Cela signifie que la trajectoire de A n'est plus continue au point de rencontre ; il y a un changement brusque de direction au moment de la rencontre.

D'autres modèles de raisonnement spatio-temporel sur le déplacement d'objets qui ne sont pas directement définis comme analysant des histoires spatio-temporelles peuvent cependant être présentés comme tels. Considérons le cas du QTC (Qualitative Trajectory Calculus). Ce modèle de raisonnement spatio-temporel qualitatif présenté au Chapitre II.6.B.iii, propose la description qualitative des relations entre deux objets disjoints. Trois opérateurs qualitatifs sont définis dans ce calcul. La Figure VI-7 montre en quoi les trois variables qualitatives du QTC correspondent à l'analyse d'histoires spatio-temporelles. La situation 1 montre la comparaison de la distance entre l'objet A et l'objet B avant et après l'instant de définition de la relation QTC (représentée par la ligne pointillée). Le point A est spatialement identique pour les deux comparaisons. Si ces deux valeurs sont égales, alors la relation sera 0, elle sera - si la première est inférieure à la seconde et + si c'est l'inverse. L'analyse est effectuée dans l'autre sens pour la seconde valeur qualitative (cas 2 sur le schéma). La troisième valeur qualitative est définie comme la comparaison entre les pentes des deux histoires spatio-temporelles à l'instant t. Si les pentes sont égales, la valeur sera 0, si la première est plus grande que la seconde, la valeur sera - et + si on est dans la situation inverse. Cette interprétation confirme que l'analyse des histoires spatio-temporelles dans un espace temporel est une base de travail pour beaucoup de modèles de raisonnement spatio-temporel.

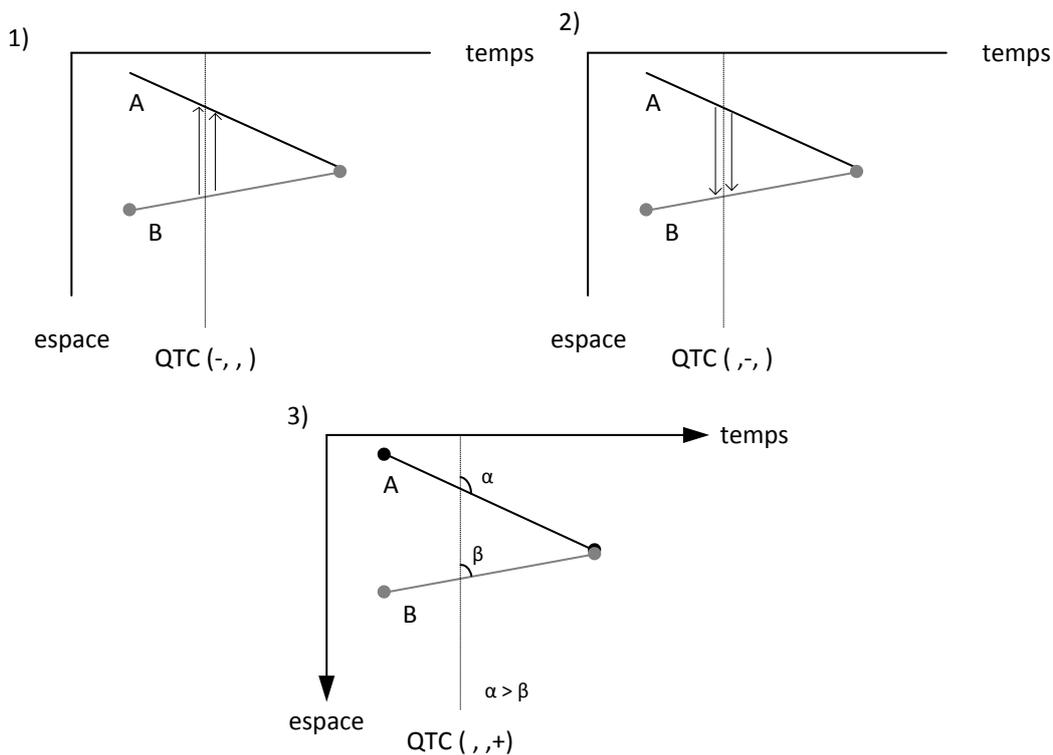


Figure VI-7 Interprétation du QTC comme l'analyse d'histoires spatio-temporelles dans un espace-temporel. Les trois valeurs qualitatives d'une relation du QTC à un instant donné (ligne pointillée sur le schéma) peuvent être vues comme 1) la distance entre l'objet A vers B à l'instant avant et à l'instant après celui de la relation du QTC 2) la distance entre l'objet B vers A à l'instant avant et après celui de la relation du QTC et 3) comme la comparaison qualitative de la pente des deux histoires spatio-temporelles à l'instant de la relation du QTC.

L'analyse des histoires spatio-temporelles par les modèles de raisonnements spatio-temporels travaillent essentiellement sur des objets qui sont cooccurrents spatialement et temporellement parlant. Comme montré précédemment, ils ne sont applicables que sur des périodes où les deux objets possèdent une identité, une extension dans l'espace de modélisation et sont présents dans l'espace de travail. Ce fait restreint donc beaucoup les possibilités d'analyses sur les histoires spatio-temporelles. En effet, l'analyse ne peut se faire que dans une zone spatio-temporelle de cooccurrence entre les deux objets. Cette zone peut également être définie via l'espace temporel de représentation des deux histoires des objets modélisés. La Figure VI-8 montre la représentation de cette zone de cooccurrence en grisé. L'objet A continue d'avoir une représentation dans l'espace modélisé alors que l'objet B lui n'en a plus. Notons que l'espace temporel ne représente pas l'identité des objets. Il est tout à fait envisageable que l'identité de l'objet B persiste et réapparaisse après ou que la spatialité

de l'objet B ne soit pas connue pendant un intervalle de temps. Tous ces cas ne peuvent être représentés et différenciés dans un espace temporel.

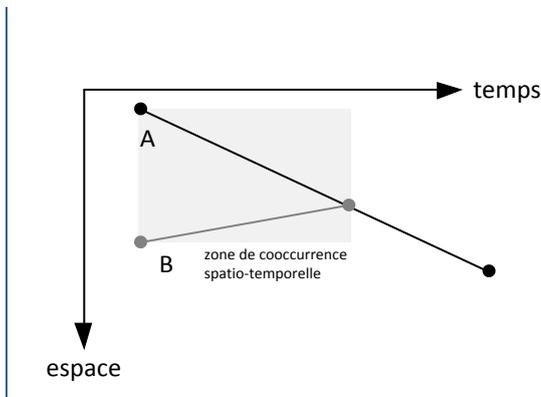


Figure VI-8 Symbolisation de la zone de cooccurrence spatio-temporelle de deux objets A et B dans un espace temporel. La zone grisée représente cet espace de cooccurrence. Il s'agit de la période temporelle pour laquelle les deux objets existent et sont présents dans l'espace de travail.

Si l'on s'en réfère à la définition des relations STS-i, la zone de cooccurrence spatio-temporelle est définie comme l'intervalle de temps pour lequel l'état de la relation $pApB$ est valable.

D. Espaces temporels identitaires

L'analyse des histoires spatio-temporelles dans des espaces temporels admet cependant certaines limites. Premièrement, ils ne symbolisent que la spatialité des objets représentés. Dans le contexte de l'évolution complexe d'un objet, son histoire spatio-temporelle ne sera pas toujours une droite continue. L'histoire spatio-temporelle d'un objet sera composée d'un ensemble de droites se rapportant à la même identité d'objet. La représentation de l'histoire spatio-temporelle d'un objet via un objet composé à 1D (multi ligne) ne peut pas correspondre parfaitement à cet ensemble d'histoires spatio-temporelles. En effet, la définition d'un objet composé n'empêche pas d'avoir deux droites simultanées pour un instant (la projection de l'histoire spatio-temporelle d'un objet sur l'axe temporel doit être univoque, sinon cela signifie qu'il existe plus d'une position spatiale distincte pour un même objet).

De plus, quelle interprétation peut-on donner à chaque début et fin d'histoires spatio-temporelles ? D'un point de vue topologique, on peut parler de frontières des histoires spatio-temporelles. L'interprétation de celles-ci ne peut être simplement une apparition et une disparition. En effet, comme nous l'avons remarqué, un objet peut aboutir à un état de présence par différents biais. Si l'on observe le diagramme de voisinage des états spatio-temporels d'un objet, celui-ci peut devenir présent après une phase d'absence ou de non-

existence. Une première approche pourrait être de considérer tous ces points de frontière comme des états de transition. Nous reviendrons sur ce constat par la suite.

Ensuite, lors de la représentation de grandes quantités de données, l'espace temporel reste plus interprétable que la projection des histoires spatio-temporelles dans un espace spatial (le plan est souvent utilisé à cet effet). Celui-ci reste néanmoins difficilement visualisable lorsqu'il y a beaucoup d'objets se déplaçant dans un intervalle de temps proche et dans une zone spatialement réduite.

Une logique de raisonnement non pas basée sur une construction de représentation mais sur un langage serait alors plus appropriée. La formalisation d'histoires spatio-temporelles par « *configuration de vie et de mouvement* » est le résultat de cette formalisation. Les configurations de vie et de mouvement admettent également une représentation aidant à la compréhension et l'inférence sur celles-ci. Leur représentation se fait à l'aide d'un « *espace temporel identitaire* ».

La représentation de l'information via les états spatio-temporels ne s'attarde pas sur la description qualitative de la spatialité même de l'objet. Elle se base sur le fait que l'objet possède ou pas une spatialité. La représentation de la dimension spatiale peut donc être dégénérée. Un objet se déplaçant dans l'espace est régulièrement assimilé à un point. Si l'on s'en réfère aux modèles de raisonnement spatio-temporels actuels (voir Chapitre II.6), on voit que la majeure partie d'entre eux considèrent des objets en mouvement tels des points. La suite de la définition des configurations de vie et de mouvement se basera sur la représentation d'objets comme des points. Notons qu'il est possible d'étendre la vision d'un objet à des primitives spatiales différentes de points ou même de ne pas considérer de spatialité particulière pour ceux-ci et de les définir en toute généralité.

Les deux relations possibles entre deux points d'un point de vue topologique sont les relations de disjonction et d'égalité. Les deux points sont soit à la même position spatiale soit ils ne le sont pas. La définition de l'égalité spatiale de deux objets peut être admise avec une certaine latitude. En effet, si l'on analyse le contact de deux personnes lors de la transmission d'un virus, le simple fait d'être à une distance inférieure à un seuil peut être considéré comme une égalité entre les positions de ces deux objets. La représentation de ces deux relations peut alors être faite avec une dimension spatiale n'admettant que trois positions. Deux positions disjointes pour la représentation des relations de disjonction et une position spatiale pour la représentation de la relation d'égalité. En toute généralité, une seule position est en fait nécessaire pour représenter si oui ou non l'objet a une spatialité. Le mode de représentation de l'objet dans l'espace peut être utilisé pour définir si oui ou non il dispose d'une extension dans l'espace et s'il n'est pas uniquement composé d'une identité au moment de l'analyse.

La Figure VI-9 représente l'évolution de deux objets dans un espace temporel identitaire. La représentation d'états de non présence ou de non-existence peut être réalisée de deux façons différentes. Soit, par l'ajout d'une position pour chaque état dans l'espace temporel identitaire, soit on utilise une symbolique particulière pour la représentation des

états de l'histoire spatio-temporelle. Nous préférons la première solution pour l'établissement des configurations de vie et de mouvement. Cette première possibilité est plus proche de la philosophie de représentation de l'évolution d'objets dans des espaces conceptuels. L'espace temporel identitaire est alors composé de 6 zones. Il peut être vu comme une représentation plus générale de l'espace spatial. Les deux zones centrales symbolisent les espaces de présence spatiale des deux objets. La rencontre de ces deux zones, au centre de la représentation montre une ligne où les deux objets sont à la même position spatiale. Les zones suivantes symbolisent l'espace de non-présence et de non-existence pour chaque objet. De cette manière, la représentation en espace temporel identitaire peut rendre compte de toutes les situations d'évolution de deux objets d'un point de vue spatial, temporel et identitaire.

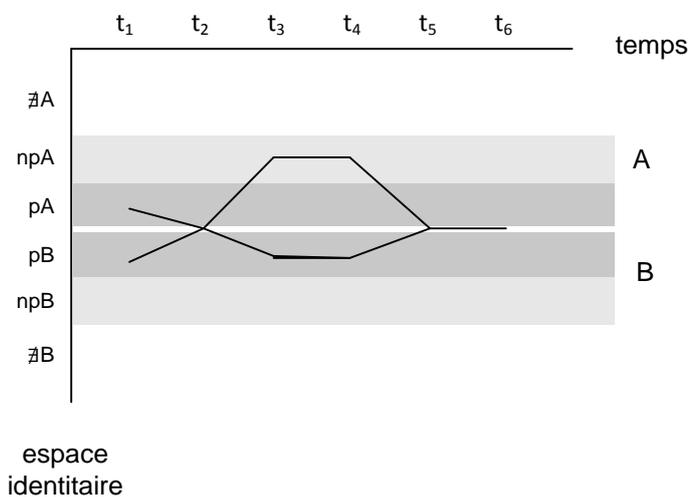


Figure VI-9 Représentation de l'évolution de deux objets dans un espace temporel identitaire. Les deux lignes grises claires symbolisent respectivement les zones de non-présence des objets A et B. Les lignes grises foncées représentent les zones de présence des objets A et B. Le trait central blanc montre l'égalité spatiale entre les objets A et B. Tant que l'objet ne se situe pas dans la partie grises foncée, il ne possède pas de spatialité.

La Figure VI-10 présente la représentation de l'évolution d'un objet dans un espace temporel et dans un espace temporel identitaire. On voit que la seconde représentation permet de représenter toute l'information de l'évolution de l'objet A. La phase d'évolution de l'objet A où il n'a plus de spatialité mais toujours une identité pour l'objet B est ainsi symbolisée.

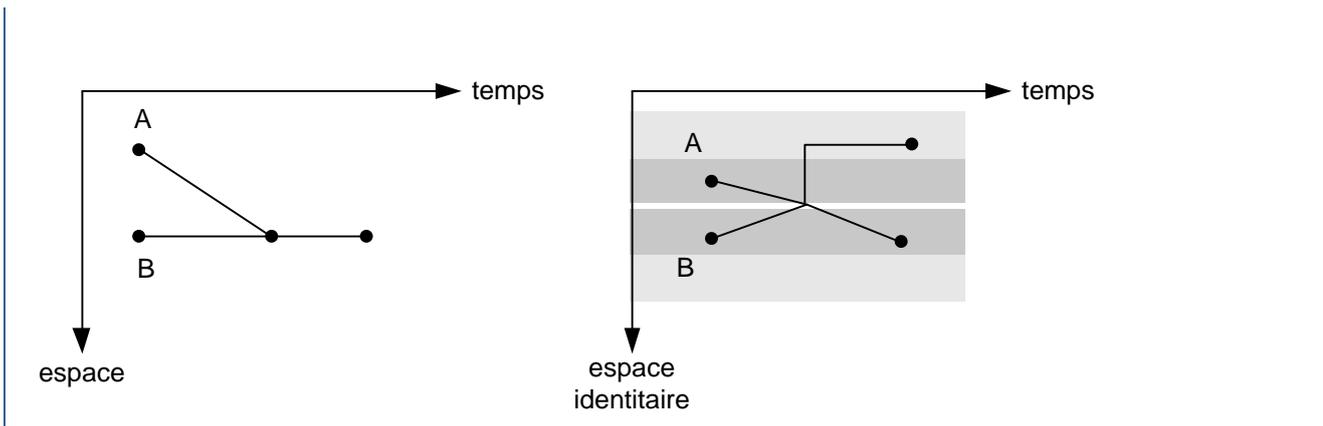


Figure VI-10 Représentation du déplacement de deux objets dans un espace temporel et dans un espace temporel identitaire. La représentation de gauche ne symbolise pas l'identité des objets dans le temps. Lorsque la spatialité de l'objet A disparaît, il n'est plus représenté. La représentation de droite représente uniquement si deux objets sont disjoints ou égaux et leur identité. Lorsque l'objet quitte la zone grise foncée, il ne possède plus de spatialité mais toujours une identité.

Ce cadre de représentation de l'évolution d'objets est à la base de la définition des configurations de vie et de mouvement. Les configurations de vie et de mouvement peuvent être vues comme le langage décrivant la succession des différentes possibilités de relation dans ce type d'espace.

3. Configurations de vie et de mouvement (LMC)

Les configurations de vie et de mouvement sont un langage formel servant à représenter les relations entre deux histoires spatio-temporelles d'un point de vue identitaire, temporel et spatial. La logique de relation spatiale utilisée dans les configurations de vie et de mouvement peut être choisie en fonction de l'application à réaliser. Dans un premier temps, nous considérons les relations topologiques entre deux points qui représentent les objets. De cette manière, la représentation reste assez simple et la compréhension de la construction des configurations de vie et de mouvement reste accessible.

A. Définition

Une configuration de vie et de mouvement est un ensemble de relations entre états spatio-temporels identitaires ordonnées dans le temps. La succession de relations STS- i respecte les transitions possibles définies à l'aide du diagramme conceptuel de voisinage. Le niveau de la configuration de vie et de mouvement est défini comme le nombre de relations qui composent l'ensemble de relations spatio-temporelles identitaires.

$$LMC(AB)_n \triangleq \{n(R_{AB}(STS - i))\} \quad (5.6)$$

avec $n \in \mathbb{N}$

Dans l'équation (5.6), n représente le niveau de la configuration de vie et de mouvement, soit le nombre de relations combinées. Les relations de l'ensemble sont ordonnées dans le temps. Ces relations peuvent être définies pour un instant ou pour un intervalle de temps. La représentation d'une configuration de vie et de mouvement se fait en indiquant la succession de relations. La description des relations étant vue de manière qualitative, l'information temporelle enregistrée via la configuration de vie et de mouvement se limite à une information qualitative de précedence temporelle. La configuration de vie et de mouvement de la situation décrite à la Figure VI-10 sera :

$$LMC(AB)_4 = \{pApB_d, pApB_e, tApB, \#ApB\} \quad (5.7)$$

Cette configuration peut être interprétée comme suit : les objets A et B sont présents et disjoints, ensuite ils sont présents et égaux, puis A entre en phase de transition pour ne plus exister alors que B existe et est toujours présent. Quatre successions de relations sont nécessaires pour décrire cette situation. Le niveau de la configuration de vie et de mouvement sera de l'ordre 4. Par la suite, nous ne préciserons pas systématiquement le niveau de la configuration de vie et de mouvement, elle se déduit en effet du nombre de relations dans l'ensemble. Les deux indices d et e des relations $pApB$ indiquent la relation spatiale qu'entretiennent les deux objets lorsqu'ils sont tous deux existants et présents. Cette relation peut être définie sur base d'une autre méthode de relation spatiale qualitative. Si l'on considère des objets zonaux et les 8 relations topologiques définies dans le modèle des 9-i, il est alors nécessaire d'ajouter des états dans la configuration afin de représenter toutes les transitions entre les deux régions afin de passer d'une relation de disjonction à une relation d'égalité. Les configurations de vie et de mouvement sont donc un langage formel permettant de décrire l'histoire spatio-temporelle de deux objets.

B. Etude systématique

Afin d'étudier l'ensemble des possibilités de relations entre deux objets dans l'espace et dans le temps, il est possible de générer automatiquement les configurations de vie et de mouvement pour deux objets. Cette génération doit cependant tenir compte de plusieurs facteurs. Premièrement, pour combien de niveau est-il nécessaire de générer les configurations de vie et de mouvement ? Autrement dit, à partir de quel niveau les configurations de vie et de mouvement deviennent-elles uniquement des combinaisons des ordres précédents. Ensuite, en fonction de la logique spatiale utilisée, il faut identifier uniquement les configurations de vie et de mouvement qui respectent les transitions du diagramme conceptuel de voisinage. Le diagramme de voisinage peut également être basé sur plusieurs postulats. Autorise-t-on le changement d'un seul système à la fois dans les transitions (comme c'est le cas actuellement), ou autorise-t-on le changement simultané des

deux objets ? Enfin, en fonction de la logique spatiale utilisée dans les configurations de vie et de mouvement, quelles sont les conséquences sur le diagramme conceptuel de voisinage des relations entre états spatio-temporels identitaires. Finalement, un dernier critère quant à la génération des configurations de vie et de mouvement concerne les postulats propres à la modélisation mise en œuvre. Si on tient compte du fait qu'il n'est pas possible d'avoir une résurrection, une contrainte supplémentaire apparaît dans le diagramme conceptuel de voisinage tel que défini au Chapitre V.4.B.

i. Restriction numérique

Bien entendu, le niveau de la configuration de vie et de mouvement n'étant pas limité, le nombre de configurations de vie et de mouvement est infini. Cependant, dans le cas d'une application réelle et sous le postulat d'un changement fini d'objet (Wolter and Zakharyashev 2001), ce nombre est limité. De plus, les configurations de vie et de mouvement complexes peuvent être dissociées en composantes plus petites afin d'étudier leurs propriétés. Ainsi, à partir d'un certain niveau, l'étude des relations entre histoires spatio-temporelles montrent qu'une configuration de vie et de mouvement est équivalente à une configuration d'un ordre inférieur. Cette valeur limite du niveau de configuration de vie et de mouvement est sensible au type d'analyse effectuée sur les histoires spatio-temporelles. Par exemple, l'analyse topologique des relations entre histoires spatio-temporelles peut être complètement expliquée avec des configurations de vie et de mouvement d'un niveau maximum de 7. Comme nous le verrons par la suite, dès que l'on dépasse l'ordre 7, toutes les configurations de vie et de mouvement peuvent être généralisées vers des configurations de vie et de mouvement d'un niveau inférieur sans changer la relation topologique entre les histoires spatio-temporelles.

ii. Restriction par le diagramme conceptuel de voisinage

Comme définit à l'équation (5.7), la succession des relations dans une configuration de vie et de mouvement doit être cohérente vis-à-vis de leur diagramme de voisinage. Dans le cadre d'une analyse systématique, une vérification des transitions possibles dans le diagramme doit être prévue. Lors de l'analyse de données réelles, les configurations de vie et de mouvement calculées sur celles-ci devraient théoriquement respecter ces transitions. L'analyse des transitions qui ne respectent pas le diagramme conceptuel de voisinage permet l'étude de la cohérence des données spatio-temporelles et au besoin de proposer une correction à celles-ci.

Le diagramme conceptuel de voisinage des relations spatio-temporelles identitaires est un diagramme conceptuel de voisinage général par rapport aux modèles de relations spatio-temporelles. En effet, comme on peut le constater sur la Figure VI-11, le graphe de voisinage des relations spatio-temporelles identitaires est une vue générale de la relation entre deux objets. Il tient compte de tous les cas de l'évolution identitaire de la relation entre deux objets. Les diagrammes conceptuels de voisinage classique peuvent être imbriqués dans celui-ci. Comme ils sont généralement beaucoup plus restrictifs quant au type d'information et sur les

conditions d'analyse de deux relations, ils ne correspondent souvent qu'à une relation du diagramme conceptuel des relations spatio-temporelles identitaires. On voit par l'analyse de cette figure que le modèle que nous proposons permet la mise en relation de beaucoup de modèles de raisonnements spatio-temporels. Il « relie » en quelque sorte les analyses actuelles par une base cohérente qui définit leur cadre d'application. Pour rappel, cette étape fait partie de nos objectifs de recherche (voir Chapitre III).

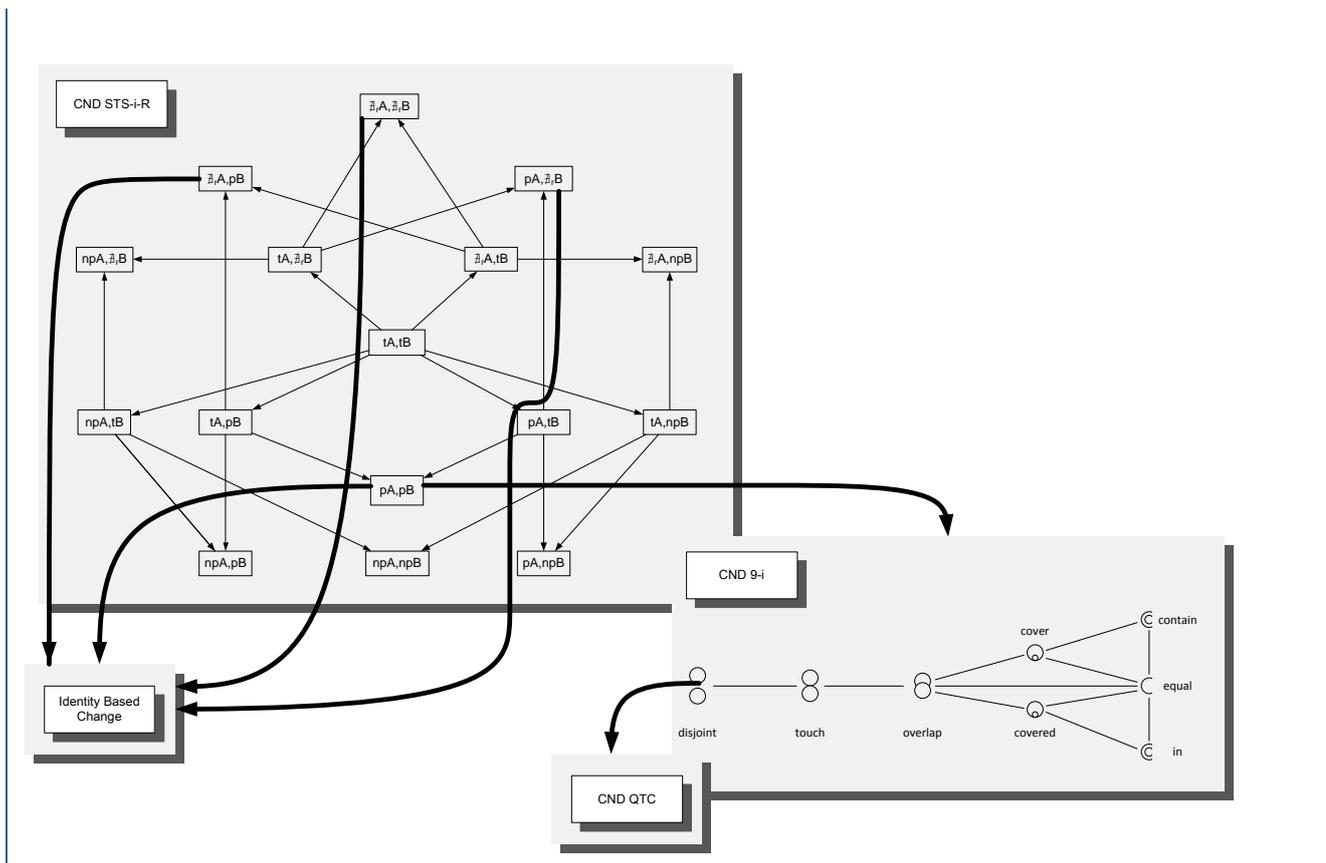


Figure VI-11 Mise en relation des diagrammes conceptuels de voisinages de logiques de raisonnement spatiales qualitatives, de raisonnement spatio-temporel et de raisonnement identitaire avec le diagramme conceptuel de voisinage des relations spatio-temporelles identitaires. On voit que les autres diagrammes de voisinages correspondent et étendent des états particuliers du diagramme présenté.

La Figure VI-11 indique la mise en relation de différents diagrammes conceptuels de voisinages. Comme on peut le constater avec les trois exemples proposés, les diagrammes de raisonnement spatial qualitatif, de raisonnement spatio-temporel qualitatif et de raisonnement spatio-temporel identitaire sont des extensions de sous-ensembles du diagramme conceptuel de voisinage des relations spatio-temporelles identitaires. Ceci montre que le diagramme proposé offre une vision générale de la représentation de la relation entre

deux objets dans l'espace et dans le temps. De plus, il propose une base commune afin de mettre en relation différents modèles de raisonnement qualitatif.

Dans le cadre de la représentation systématique des configurations de vie et de mouvement, le diagramme de voisinage des relations spatio-temporelles identitaires peut inclure une logique de relations spatiales qualitatives. Dans ce cas, les relations suivront les liens proposés à la Figure VI-11. Comme nous l'avons précisé, dans une première approche, nous ne tiendrons compte que de deux relations spatiales qualitatives pour les objets A et B, la relation d'égalité et la relation de disjonction.

iii. Restriction conceptuelle

La non prise en compte de la résurrection ou d'une succession d'états de non présence ou tout simplement le fait de n'autoriser un état de non existence qu'en début et ou en fin de configuration de vie et de mouvements implique des limitations dans les déplacements possibles dans le graphe de voisinage. Ces limitations doivent être définies en fonction de l'application modélisée et n'interviennent théoriquement pas pour une modélisation systématique de toutes les relations possibles entre histoires spatio-temporelles. Ces critères induisent en effet des limitations supplémentaires. Il n'y a donc pas de perte d'information à ne pas considérer ces limitations. A nouveau, ces restrictions peuvent être utilisées afin de vérifier la cohérence d'histoires spatio-temporelles d'objets dans le cadre d'une application particulière.

C. Représentation des configurations de vie et de mouvement

La représentation des configurations de vie et de mouvement de manière visuelle peut aider à l'interprétation de celles-ci. De plus, lors de la génération automatique, leur représentation permet d'établir un canevas visuel de l'ensemble des relations possibles entre deux histoires spatio-temporelles. Nous décrivons par la suite les propriétés que nous utilisons pour une représentation formelle des configurations de vie et de mouvement.

i. Règles pratiques de représentation

La représentation des configurations de vie et de mouvement se fait en respectant les principes de l'espace temporel identitaire tel que défini à la section D de ce chapitre. La représentation obéit aux règles suivantes :

- L'objet A sera toujours représenté au-dessus de l'espace temporel et l'objet B au-dessous.
- Tous les objets sont symbolisés par un trait noir.
- Lorsque les objets seront dans un état égalitaire, ils seront représentés simultanément sur l'axe central des positions possibles dans l'espace identitaire. Cet axe correspond à la rencontre de l'espace de travail de l'objet A et l'objet B. Lorsque les deux objets sont dans un état de disjonction, ils sont représentés

dans la zone grise foncée de l'espace temporel identitaire. Les deux zones grises foncées représentent respectivement l'espace de travail de l'objet A et de l'objet B.

- Un objet dans un état de non-présence est représenté dans la zone grise claire adjacente à la zone de présence. Ces zones représentent l'espace hors espace de travail des objets A et B.
- Un objet dans un état de non-existence est représenté hors des zones grisées. L'espace hors zone grisée exprime, quant à lui, une zone sans spatialité.
- Un état de transition est représenté par un axe vertical pointillé traversant l'ensemble des espaces propres à un objet. Cette représentation exprime le fait que la transition puisse être instantanée et qu'elle permet d'aboutir à n'importe quel autre état spatio-temporel identitaire.
- La distance séparant les différents états est constante, l'information de durée relative entre les instants ou intervalles n'est pas prise en compte dans cette représentation qualitative.

La Figure VI-12 montre le cadre dans lequel sont représentées les configurations de vie et de mouvement. Lorsque plusieurs configurations successives sont présentées, seule la symbolique des lignes grisées sera conservée dans un souci de lisibilité.

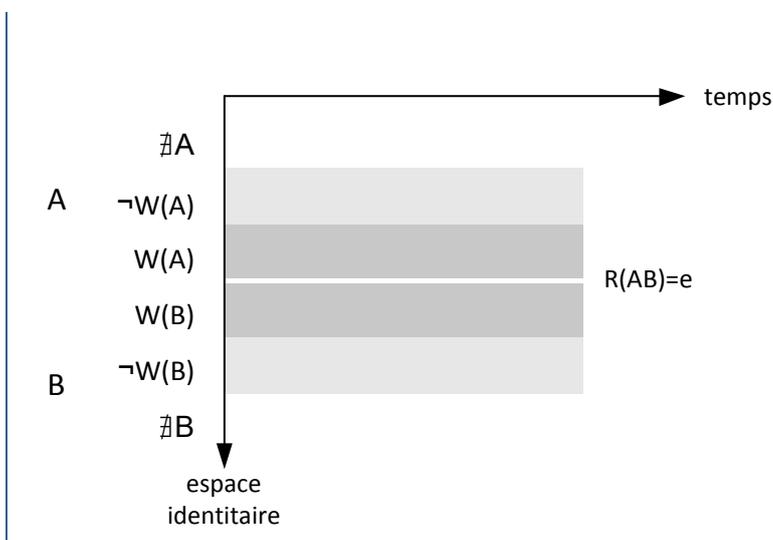


Figure VI-12 Cadre de représentation des configurations de vie et de mouvement. Les zones grisées relatives aux objets A et B montrent l'espace de travail et l'espace spatial. La partie blanche montre les zones où les objets A et B n'existent pas. La ligne centrale symbolise la relation d'égalité spatiale entre les objets A et B.

En fonction des critères définis, la représentation de la configuration de vie et de mouvement $LMC(AB) = \{pApBd, pApBe, tApB, \#ApB, \#ApB, tApB, pApBe, pApBe\}$ est proposée à la Figure VI-13.

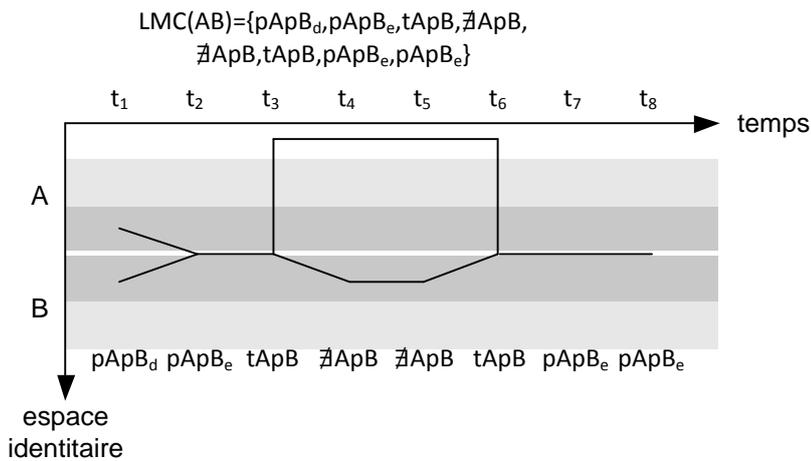


Figure VI-13 Configuration de vie et de mouvement d'un objet A et B. La LMC est représentée dans un espace temporel identitaire. Lorsque la représentation de l'objet est hors des zones grisées, cela signifie que l'objet n'existe pas. Les axes verticaux symbolisent les états de transition. En dessous de chaque instant est indiquée la relation spatio-temporelle identitaire correspondante.

L'ordre de la configuration est de 8, elle est donc représentée sur un espace de 8 intervalles de temps. Certains états de cette configuration de vie et de mouvement ne peuvent être instantanés, ils sont donc représentés comme des intervalles. Les états de transitions sont quant à eux représentés comme des solutions instantanées. Ce type de représentation formelle est ainsi généralisable à l'ensemble des relations possibles entre les histoires spatio-temporelles de deux objets.

Dans le cas d'une succession de relations incluant un cas de non-présence, on obtient pour la configuration de vie et de mouvement suivante $LMC(AB) = \{pApB_d, pApB_e, tApB, npApB, npApB, tApB, pApB_e, pApB_e\}$ la visualisation présentée à la Figure VI-14 :

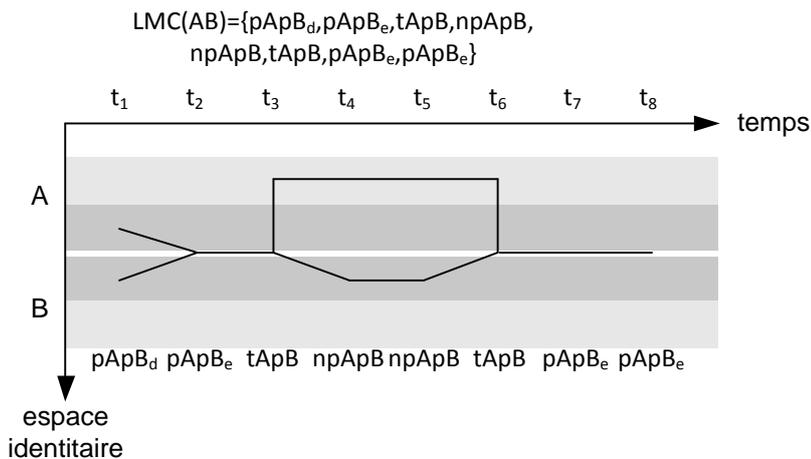


Figure VI-14 Représentation d'une configuration de vie et de mouvement avec relation de non présence dans un espace temporel identitaire. La phase de non-présence est représentée dans la zone grise claire.

Les symboliques utilisées sont volontairement noires et blanches afin de permettre leur reproduction facile et une interprétation qui n'est pas basée sur la couleur. En effet, la position de l'objet A sera toujours dans la partie supérieure de l'espace temporel identitaire et l'objet B sera toujours dans la partie inférieure. En conséquence, il n'est pas nécessaire de les distinguer par deux couleurs différentes. Les symboliques se concentrent sur les types d'états. Nous choisissons une symbolique proche des états de présence pour la représentation des états de non-présence car ils sont conceptuellement plus proches des états de présence. Les états de non-existence sont, quant à eux, représentés hors des zones grisées comme le souvenir de l'extension spatiale des objets dans l'espace.

ii. Réflexion sur l'état de transition

La prise en compte de l'état de transition dans les représentations de configuration de vie et de mouvement peut être associée au concept de frontière. En effet, si l'on se place dans la vision d'une analyse topologique des histoires spatio-temporelles, chaque état valable durant un intervalle sera borné par un état de transition qui le domine. Celui-ci peut alors et sera la plupart du temps instantané. De ce fait, la représentation de celui-ci comme une frontière est logique. Ils encadrent les états ayant une durée et sont assimilés aux zones spatio-temporelles de passage entre deux états spatio-temporels identitaires pour un objet. Jusqu'à présent et afin d'être cohérent vis-à-vis du diagramme conceptuel de voisinage, nous ne prenons en compte le changement que d'un seul système à la fois. Cela signifie que l'objet A et l'objet B ne peuvent modifier leur état au même instant. Ils devront le faire obligatoirement par deux états successifs. La représentation en configuration de vie et de mouvement fournit donc une interprétation temporelle des successions entre les différents états. Elle ne propose pas une représentation relative des durées de validité de chaque état. La représentation de deux intervalles de temps, l'un plus grand que l'autre, ne sera pas visible.

Seules les différences entre intervalles et instants sont proposées à la visualisation. C'est également le cas lors de la représentation de l'évolution de relations spatiales. Le but du langage n'est pas de fournir un outil quantitatif de raisonnement mais bien un outil qualitatif de visualisation et une représentation iconique des changements possibles.

D. Formalisation des histoires spatio-temporelles

Comme nous l'avons vu, la représentation du déplacement d'un objet dans l'espace et dans le temps crée une forme spatio-temporelle appelée histoire spatio-temporelle de l'objet. L'étude de ces histoires spatio-temporelles reste néanmoins compliquée du fait de la nature même de l'information à analyser. De plus, il existe une infinité d'histoires spatio-temporelles. Chaque situation du monde crée de nouvelles histoires spatio-temporelles. Un modèle de représentation qualitatif de ces histoires permet une analyse rapide de celles-ci. Les configurations de vie et de mouvement sont donc un outil permettant cette analyse qualitative tout en tenant compte d'une logique spatiale et des différentes évolutions possibles de l'identité de la relation de deux objets.

La représentation en configuration de vie et de mouvement simplifie également la visualisation de l'histoire spatio-temporelle. Si on imagine le déplacement d'un objet dans un espace à deux dimensions, la représentation de son histoire spatio-temporelle impliquera la représentation d'une ligne dans un espace tridimensionnel. La configuration de vie et de mouvement quant à elle sera toujours représentée dans un espace temporel identitaire à deux dimensions. Finalement la représentation iconique aidera également à avoir une vision rapide et claire de l'évolution de la relation des objets. La Figure VI-15 présente le processus de formalisation d'histoires spatio-temporelles. Sur base de la représentation de l'évolution réelle de deux objets dans un espace temporel à trois dimensions, nous pouvons voir qu'il est nécessaire d'utiliser une configuration de vie et de mouvement de niveau 5 afin de rendre compte de l'évolution de contact et de l'évolution identitaire des objets en présence.

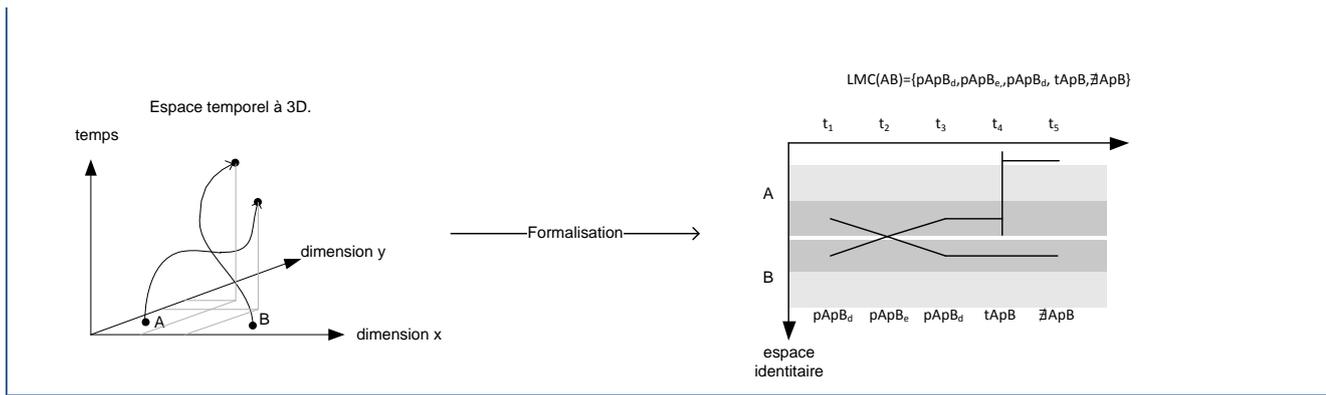


Figure VI-15 Formalisation de la relation entre deux histoires spatio-temporelles représentées dans un espace temporel à 3D vers une configuration de vie et de mouvement représentée dans un espace temporel identitaire. La représentation en configuration de vie et de mouvement permet la symbolisation des informations de contact spatiaux et d'évolution identitaire dans le temps.

La formalisation des relations entre histoires spatio-temporelles envoie également vers un nombre fini de configurations possible. En effet, dans le cadre d'une analyse exhaustive des relations possibles entre deux histoires spatio-temporelles, si on analyse les déplacements réels dans un espace temporel, les cas sont infinis. Comme nous l'avons montré, l'utilisation des configurations de vie et de mouvement regroupe dans sa formalisation plusieurs histoires spatio-temporelles en se basant sur une analyse qualitative. De plus, comme il n'est pas nécessaire de développer tous les ordres des configurations de vie et de mouvement au-delà du niveau 7, nous pouvons dresser l'ensemble des relations entre les histoires spatio-temporelles de deux objets d'un point de vue de leur identité et de leur relation de contact.

4. Génération exhaustive de LMC

Afin de générer l'ensemble des configurations de vie et de mouvement, nous avons développé un jeu de macro dans un logiciel de dessin. Celui-ci, sur base d'une étude de toutes les transitions possibles et de leur confrontation au diagramme de voisinage des relations entre états spatio-temporels identitaires, propose une représentation graphique pour chaque configuration de vie et de mouvement ainsi vérifiée.

Les configurations de vie et de mouvement de niveau 1 correspondent aux 17 relations entre états spatio-temporels identitaires. Il ne s'agit pas à proprement parler de configurations de vie et de mouvement, la composante temporelle étant limitée à un instant du fait de l'utilisation d'une seule relation.

A l'ordre 2, il existe 68 configurations de vie et de mouvement. La Figure VI-16 fournit la symbolisation de ces 68 configurations. La représentation iconique ne montre pas les axes de

topologiques entre deux régions, mais bien de pouvoir formaliser dans chaque situation particulière une relation entre histoires spatio-temporelles.

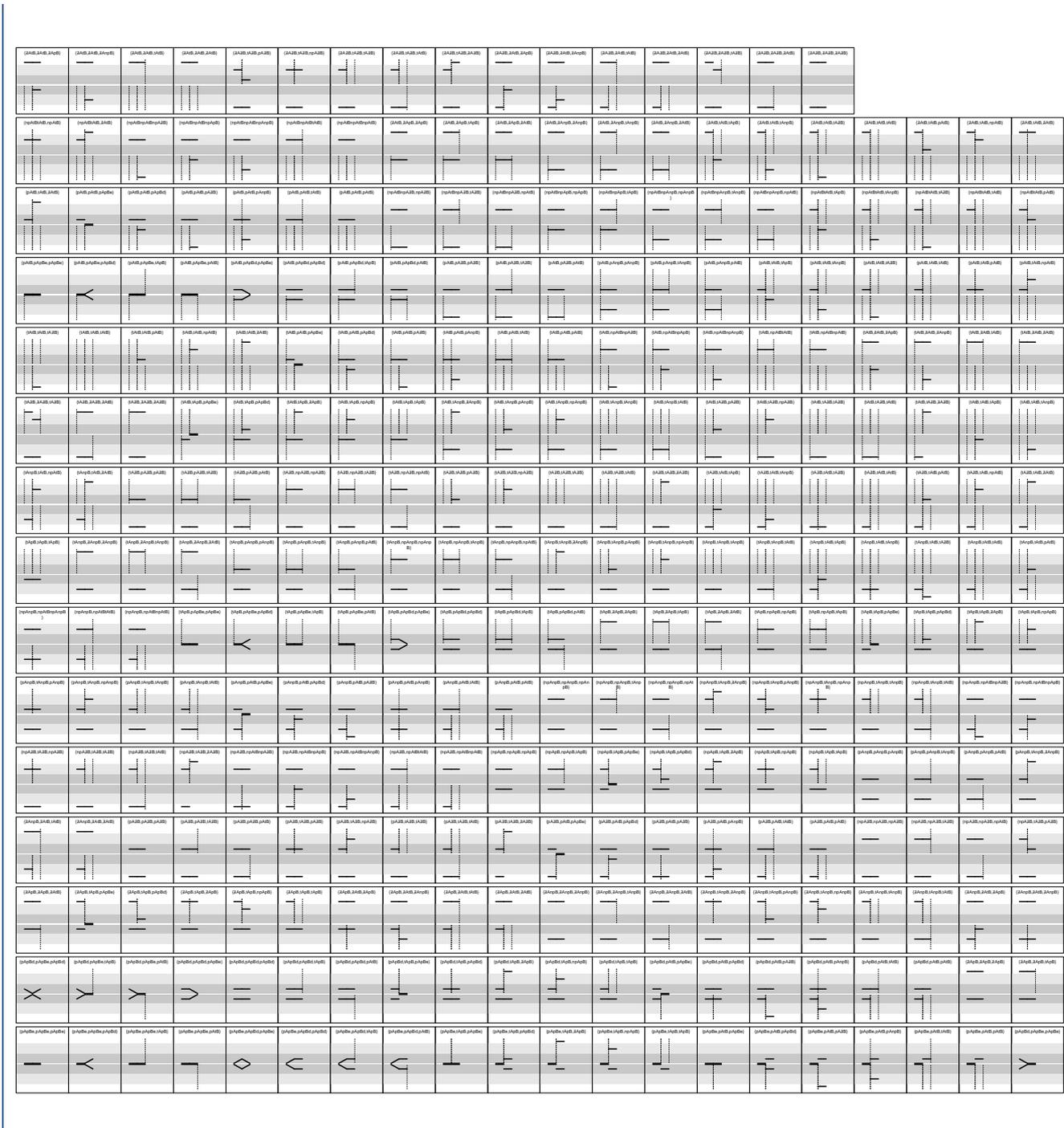


Figure VI-17 Représentation iconique des 296 configurations de vie et de mouvement de niveau 3. Les conventions graphiques sont identiques à celles de la Figure VI-16.

La représentation exhaustive sera quant à elle utilisée au chapitre suivant pour notamment généraliser la relation d'histoires spatio-temporelles en relation topologique. Par la représentation exhaustive de toutes les configurations possibles, nous pouvons affirmer avoir testé toutes les possibilités de généralisation d'histoires spatio-temporelles (dans le cadre des prédicats définis au chapitre suivant).

5. Applications et conclusions

Le calcul d'une configuration de vie et de mouvement sur un ensemble d'histoires spatio-temporelles n'est pas une opération compliquée si l'on se place dans une perspective numérique. En effet, pour chaque observation, il est simplement nécessaire d'établir la relation spatio-temporelle identitaire entre les deux objets concernés. La succession doit ensuite vérifier le diagramme conceptuel de voisinage. Plus qu'un exercice mental de vérification d'un ensemble de configurations possibles, la représentation iconique des configurations de vie et de mouvement fournit une réelle aide à la comparaison de deux histoires. Si on se réfère à la Figure VI-18, on voit notamment que la représentation proposée identifie directement et visuellement la différence entre les deux situations spatio-temporelles, alors qu'elles sont difficilement différenciables dans un espace temporel.

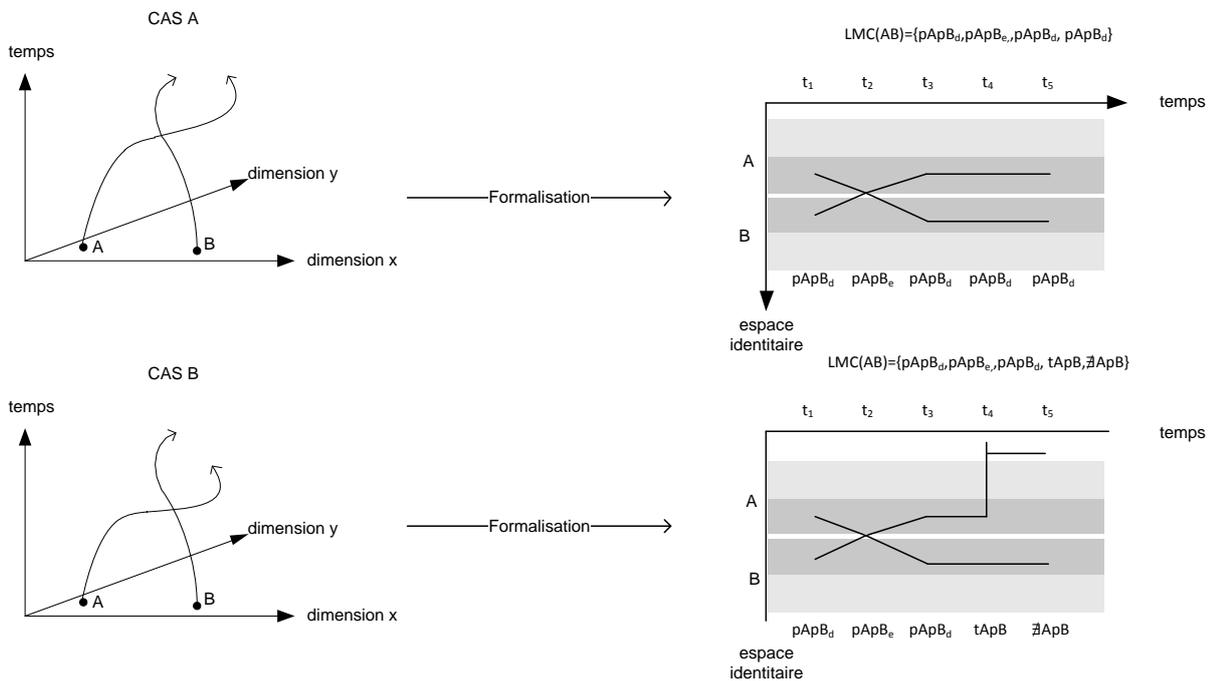


Figure VI-18 Comparaison de formalisation de relations entre histoires spatio-temporelles via deux configurations de vie et de mouvement. Les deux cas ne sont pas facilement différenciables dans l'espace temporel alors que les deux représentations iconiques des configurations de vie et de mouvement sont explicitement différentes. De plus, l'information identitaire est présente dans le cas des configurations de vie et de mouvement.

Dans la figure précédente, on ne distingue pas bien, du fait de la représentation tridimensionnelle, la fin ou le début des existences d'objets. De plus, les transitions entre les différents états de la relation entre histoires spatio-temporelles ne sont pas mises en exergue. Enfin, il n'est pas possible de présenter l'évolution d'objets dans un espace tridimensionnel à l'aide d'un espace temporel alors que cette représentation est possible via une configuration de vie et de mouvement.

Les configurations de vie et de mouvement sont également utiles au choix des zones de cooccurrences identitaires, spatiales et temporelles nécessaires à l'application de certains modèles de raisonnements spatio-temporels. Si l'on souhaite par exemple effectuer une application d'un modèle tel le QTC sur un jeu de données dont l'évolution spatio-temporelle est plus complexe qu'un simple intervalle de disjonction entre deux objets, les configurations de vie et de mouvement identifient directement les états spatio-temporels sur lesquels ce type de raisonnement peut être appliqué. La sélection des états successifs de disjonction correspond à une recherche de la succession d'états $pApB_d$ dans les configurations spatio-temporelles. La Figure VI-19 montre des configurations de vie et de mouvement décrivant des

évolutions de relations spatio-temporelles pour lesquelles un QTC ne peut être calculé sur l'ensemble de l'évolution. La recherche des états $pApB_d$ permet de trouver facilement les zones où un QTC peut être effectué.

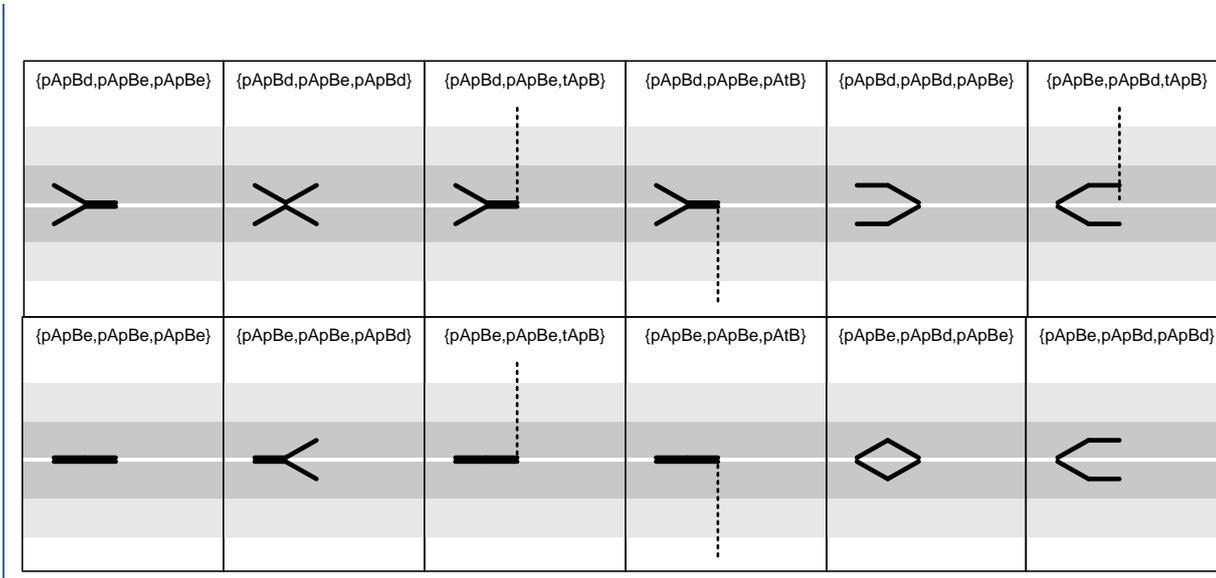


Figure VI-19 Configurations de vie et de mouvement qui n'admettent pas un calcul d'un QTC sur l'ensemble de l'évolution spatio-temporelle. La recherche des états $pApB_d$ dans la configuration permet de sélectionner rapidement les zones où le calcul peut être effectué.

Finalement, nous pouvons dire avoir répondu à notre objectif de recherche visant à définir un jeu de relations spatio-temporelles entre deux objets évoluant de manière complexe dans l'espace et le temps. De la même manière que l'ensemble des relations spatiales entre deux objets d'un point de vue topologique ont été recherchées afin de compléter la connaissance globale du monde, nous avons effectué une partie du travail quant à l'ensemble des successions possibles pour deux objets dans un espace temporel identitaire.

Chapitre VII.

Généralisation de LMC

*Penser, c'est oublier des différences, c'est généraliser, abstraire.
Jorge Luis Borges*

1. Introduction

La modélisation du mouvement de deux objets dans l'espace et le temps se visualise via un ensemble d'histoires spatio-temporelles. L'analyse de celles-ci peut être conceptualisée de deux façons. Soit par l'analyse des relations entre les formes spatio-temporelles, soit par la formalisation de la succession des états relatifs aux deux objets. Par la suite, il est possible d'utiliser la formalisation des histoires spatio-temporelles afin de déduire la relation entre les histoires spatio-temporelles des deux objets. De cette manière, la mise en place du calcul des relations entre histoires spatio-temporelles est directement tirée de la formalisation de la succession d'états. En d'autres termes, le calcul des relations entre histoires spatio-temporelles est directement déduit des configurations de vie et de mouvement. Ce chapitre a pour but d'exposer la manière dont les configurations de vie et de mouvement peuvent être généralisées en un jeu de relations entre les deux histoires spatio-temporelles. La généralisation des configurations de vie et de mouvement est une application possible du formalisme de représentation d'histoires spatio-temporelles définies au chapitre précédent.

D'autres motivations conduisent également à imaginer une généralisation des configurations de vie et de mouvement.

- Premièrement, le grand nombre de configurations de vie et de mouvement peut être perçu comme une limitation à leur utilisation. En effet, il n'est pas

envisageable d'utiliser les configurations de vie et de mouvement comme un jeu de relations entre deux objets tel que les 8 relations topologiques entre deux objets.

- La généralisation des configurations de vie et de mouvement peut conduire à une limitation du nombre de configurations décrivant les relations spatio-temporelles de deux objets.
- Ensuite, le travail sur un grand nombre de données est également une source de limitation. Le calcul des configurations de vie et de mouvement sur l'ensemble d'un grand jeu de données peut être lent. L'utilisation au préalable de relations généralisées permet alors de ne calculer le détail des configurations de vie et de mouvement que sur une fenêtre spatio-temporelle répondant à la relation recherchée pour l'application.

A. Limitations de l'utilisation directe des LMC

Comme nous l'avons montré, le nombre de configurations de vie et de mouvement grandit très rapidement en fonction du niveau de combinaisons de celles-ci. La description de phénomènes complexes peut cependant conduire à la combinaison d'un grand nombre d'états spatio-temporels. Lors de la description de phénomènes spatio-temporels, la succession d'états spatio-temporels peut être soit calculée à chaque instant de mesure, soit à chaque changement d'état. La description de chaque changement d'état réduit le niveau de la configuration de vie et de mouvement décrivant les objets. La fréquence d'enregistrement de données influence le nombre d'états enregistrés pour chaque objet. Le niveau de la configuration de vie et de mouvement sera donc d'autant plus élevé que la fréquence d'enregistrement est élevée. L'utilisation directe de configurations de vie et de mouvement est donc dans certains cas peu évidente.

La première opération à envisager afin de généraliser les configurations de vie et de mouvement est la réduction de la succession d'états similaires dans une configuration de vie et de mouvement. Lorsque dans une configuration de vie et de mouvement trois états pApBd se succèdent, celui du milieu n'est pas nécessaire dans tous les cadres d'analyse. Si le but est d'analyser la relation topologique entre deux histoires spatio-temporelles, la succession de trois états de disjonction n'est pas nécessaire. Le même raisonnement peut être appliqué aux 17 relations spatio-temporelles identitaires entre deux objets. L'intervalle de temps sur lequel est décrit l'état de l'objet peut être combiné à l'état suivant s'ils sont les mêmes. D'une manière générale on peut dire que si :

$$\text{Holds}(R_{AB}, i) \wedge \text{Holds}(R_{AB}, j) \wedge \text{Meets}(i, j) \quad (6.1)$$

alors :

$$\rightarrow (k = i \sqcap j) \wedge \text{Holds}(R_{AB}, k) \quad (6.2)$$

Les configurations de vie et de mouvement décrivant une succession d'états, si cette succession comporte deux états identiques successifs, ceux-ci peuvent être remplacés par un état défini comme la conjonction temporelle des deux états précédents. Notons qu'il n'y a pas de problème de dominance dans ce cas. En effet, la théorie de la dominance définit qu'un état est une perturbation de lui-même (2.66). Dans l'équation (6.1), on peut donc dire que l'état R_{AB} est une perturbation de lui-même sur l'intervalle k .

B. Grands jeux de données

Lors du travail d'un grand jeu de données, le calcul des configurations de vie et de mouvement sur l'ensemble des objets peut être onéreux quant à la consommation de ressources. L'utilisation d'une méthode d'analyse plus générale visant à sélectionner les objets montrant un intérêt prioritaire peut être utile. A cette fin, l'utilisation d'un modèle de relations généralisées offre une méthode permettant de sélectionner rapidement les objets répondant à une relation particulière. Le raisonnement est alors vu comme un ensemble pyramidal de relations liées les unes aux autres. La première étape consiste à utiliser un ensemble de relations très générales, permettant de choisir rapidement les objets dignes d'intérêt. Ensuite, un calcul de configurations de vie et de mouvement est effectué. Et enfin, un modèle de relations spatio-temporelles précis et restrictif sur les conditions d'existence et de présence des objets peut être réalisé.

C. Représentation simplifiée

La généralisation des configurations de vie et de mouvement conduit également à la simplification de la représentation de l'histoire spatio-temporelle d'objets. Plus le mode de représentation répond à une vue globale de l'information, plus la représentation de l'information est simple pour l'utilisateur. En effet, si l'on considère un modèle de raisonnement tel le QTC, l'information représentée est complexe et l'utilisation des relations spatio-temporelles ne peut être effectuée que par un opérateur averti de toutes les subtilités d'un tel langage. Au contraire, l'utilisation préalable d'une généralisation avancée de l'information spatio-temporelle conduit à l'utilisation d'une vision beaucoup plus simple de l'information. Ce n'est que par la suite qu'un modèle plus complexe peut être utilisé sur une petite partie des données sensibles à l'analyse proposée.

D. Perception limitée

Certains auteurs, dont (Clementini, Di Felice et al. 1993) ou (Nabil, Shepherd et al. 1995), établissent que seul un petit nombre de relations sont bien perçues par les utilisateurs. La différence entre toutes les configurations de vie et de mouvement n'est pas aisée surtout si le niveau des configurations devient élevé. Si l'on compare aux 8 relations topologiques définies entre deux régions ou aux 33 relations définies entre deux lignes, le nombre de configurations de vie et de mouvement est beaucoup plus élevé. Alors que la distinction entre les 8 relations

n'est pas toujours aisée pour un utilisateur non averti et que certains (Clementini and Di Felice 1997) plaident pour l'utilisation de seulement 5 relations, nous pensons qu'une généralisation des configurations de vie et de mouvement est d'autant plus intéressante. Notons cependant que cette remarque n'enlève en rien l'intérêt même des configurations de vie et de mouvement dans le cadre de la formalisation d'informations et d'un raisonnement semi-avancé quant aux relations qu'entretiennent deux objets dans l'espace et dans le temps.

2. Généralisation de configurations de vie et de mouvement

Les constatations de la section précédente nous amènent à proposer une méthode de généralisation des configurations de vie et de mouvement. Comme nous l'avons expliqué, la généralisation s'applique conceptuellement directement aux formes spatio-temporelles décrites par les objets en évolution dans l'espace-temps, mais le calcul s'effectue à partir des configurations de vie et de mouvement. L'intérêt d'effectuer le calcul à partir de celles-ci s'explique de deux façons. Premièrement, il n'est pas correct conceptuellement parlant d'appliquer directement une relation topologique sur un espace temporel. En effet, la nature des dimensions représentées ne permet pas directement d'effectuer un calcul topologique. Une méthode consiste en la projection de cet espace-temps dans un espace-temps primitif où la distinction des dimensions spatiales et temporelles n'est pas faite. La seconde raison s'explique de manière plus pratique par le fait que les systèmes de gestion de bases de données spatiales actuelles ne permettent pas l'étude de relations topologiques sur des objets tridimensionnels ou quadridimensionnels. La formalisation d'histoires spatio-temporelles en configurations de vie et de mouvement est toujours représentée dans un espace identitaire à deux dimensions quelle que soit le nombre de dimensions dans lesquelles évoluent les objets représentés. Seule l'information de succession temporelle et de contact topologique y est représentée. La Figure VII-1 représente les deux possibilités de généralisation d'histoires spatio-temporelles. Comme précisé préalablement, nous choisirons la possibilité supérieure qui consiste à dériver les relations topologiques entre histoires spatio-temporelles sur base de configurations de vie et de mouvement.

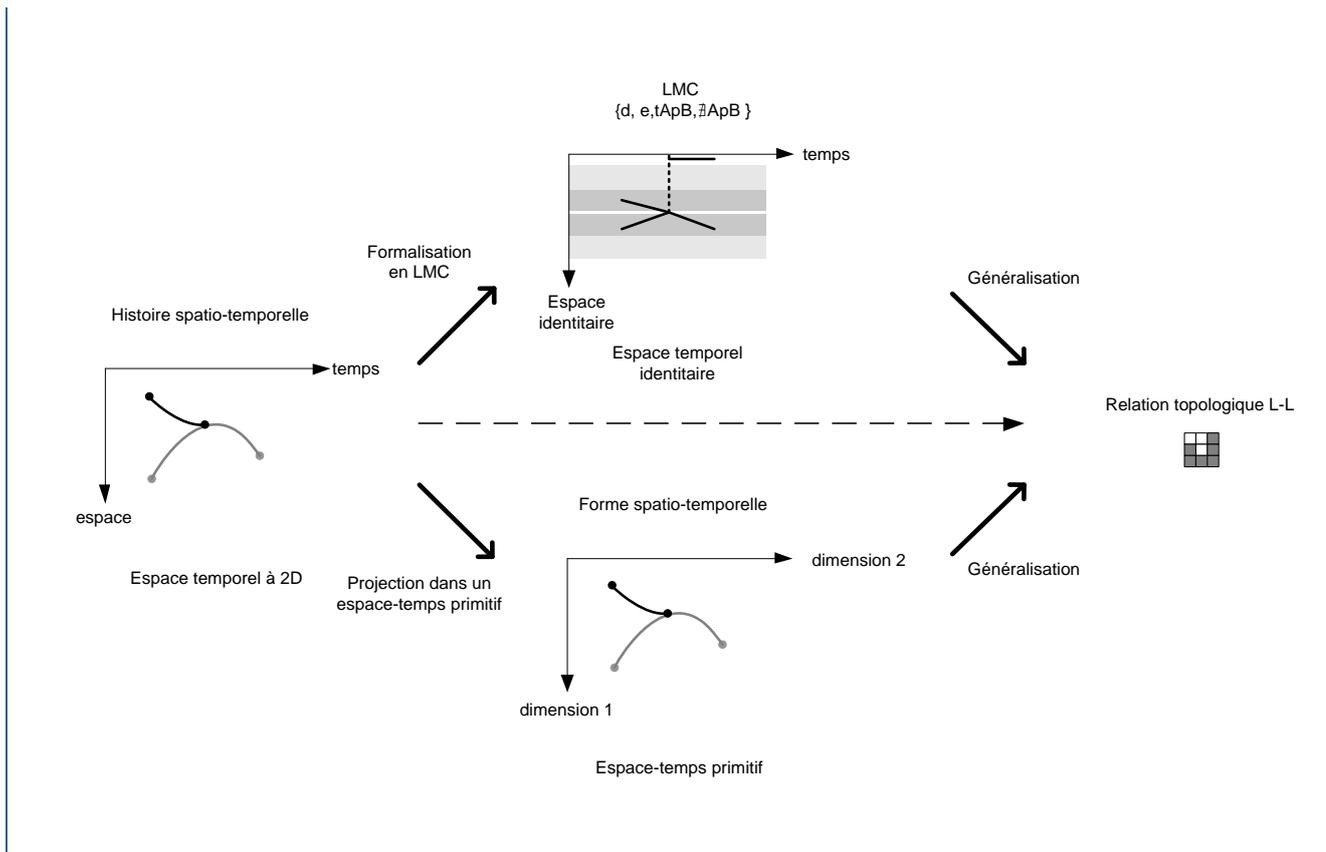


Figure VII-1 Schématisation du principe de généralisation des histoires spatio-temporelles soit via le traitement des configurations de vie et de mouvement (partie haute), soit par projection en espace-temps primitif (partie basse).

A. Raisonnement spatial utilisé lors de la généralisation

Plusieurs types de raisonnement spatial peuvent être utilisés afin de généraliser les configurations de vie et de mouvement. Comme présentés lors du Chapitre VI.2.C, chaque méthode de raisonnement spatial permet de déduire une série d'informations plus ou moins complexes à partir des histoires spatio-temporelles. Plus la géométrie de base du modèle de calcul qualitatif se rapprochera d'une analyse métrique, plus l'information extraite sera complexe et complète. Cependant, le but de cette généralisation n'est pas d'obtenir une information fine quant aux objets évoluant dans l'espace et le temps. *Rappelons que le but de la généralisation est de proposer une approche simple et rapide d'identification des fenêtres spatio-temporelles dignes d'intérêt.* La suite de ce chapitre est consacrée à l'étude de la généralisation d'histoires spatio-temporelles sur base de leurs configurations de vie et de mouvement respectives via deux modèles de raisonnement spatial qualitatif. Premièrement, nous utiliserons le modèle qualitatif le plus simple afin de décrire les contacts entre deux lignes. Il s'agit des relations topologiques entre deux lignes. Par la suite, nous effectuerons le même travail avec un modèle de relations topologiques entre deux lignes incluant une

distinction entre les frontières de chaque ligne. Ainsi les points de départ et d'arrivée des lignes sont différenciés et ils peuvent être associés aux instants de transition de début et de fin de présence de chaque objet.

B. Perte d'information dans la généralisation

Toute généralisation implique une perte d'information. Ce fait inéluctable s'applique également à la généralisation des configurations de vie et de mouvement. De plus, les modèles de raisonnements choisis s'appliquent uniquement à des lignes continues. Par la suite, la généralisation sera donc restreinte à des objets ayant une phase de présence continue dans le temps. De cette manière, l'histoire spatio-temporelle de l'objet représenté sera composée d'une ligne spatio-temporelle continue dans l'espace-temps. Dans le cas d'objets présentant une succession de phases de présences distinctes, soit par une ligne complexe dans l'espace-temps, nous proposons d'effectuer autant de fois la généralisation que ces objets possèdent de phases de présences. Par la suite, un modèle de raisonnement qualitatif s'appliquant sur des lignes complexes pourrait être utilisé afin de généraliser les configurations de vie et de mouvement. Nous détaillerons cette possibilité dans nos perspectives de recherche (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

3. Généralisation des LMC sur base de relations lignes-lignes

A. Principe de généralisation

D'après (Egenhofer and Herring 1990), il existe 33 relations topologiques entre deux lignes. La Figure VII-2 représente le diagramme conceptuel de voisinage des 33 relations ainsi que leur matrice d'intersection topologique. Par rapport aux relations topologiques entre deux régions, il existe moins de critères de restriction ; cela conduit donc à un plus grand nombre de relations (voir Chapitre XII.1 pour plus de détails quant aux conditions d'existence des relations topologiques).

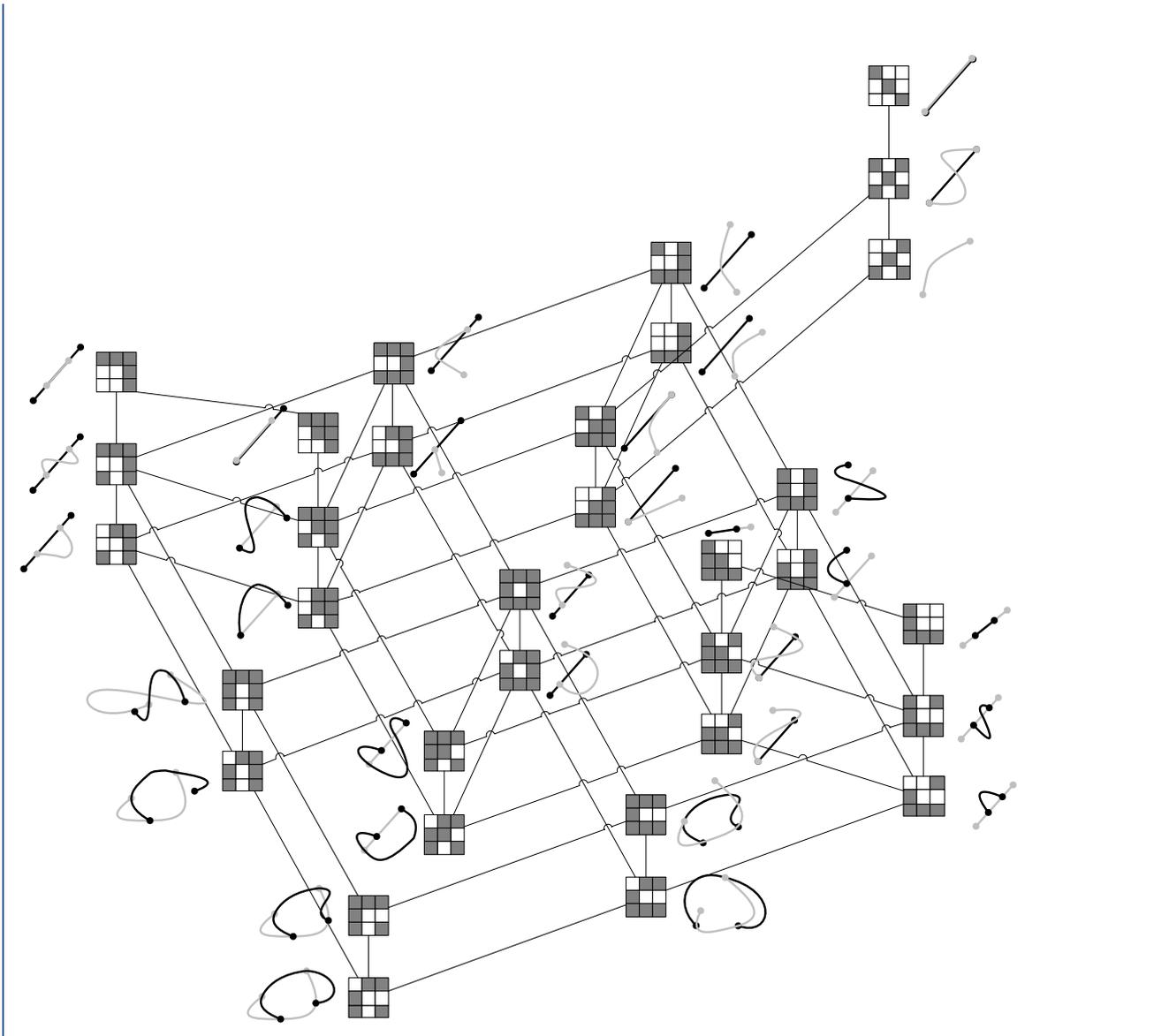


Figure VII-2 Diagramme conceptuel de voisinage des 33 relations topologiques entre deux lignes dans un espace à 2 dimensions. La représentation symbolise également la matrice d'intersection topologique du modèle.

Le principe de la généralisation consiste à calculer les relations topologiques entre histoires spatio-temporelles. Pour ce faire, nous analysons une succession d'états spatio-temporels. Deux approches sont envisageables afin de calculer les relations topologiques sur base de configuration de vie et de mouvement. Soit, pour chaque configuration de vie et de mouvement, on cherche à dériver la matrice d'intersection topologique entière, soit, pour chaque valeur matricielle, on recherche quelle succession de relations spatio-temporelles identitaires correspond à une valeur vide ou non. La Figure VII-3 exprime cette double possibilité. Dans la suite de ce chapitre, nous choisissons de réaliser la seconde possibilité présentée.

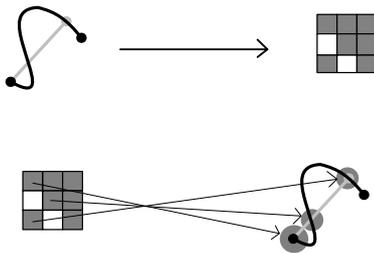


Figure VII-3 Présentation des deux possibilités de déduire la relation topologique entre deux histoires spatio-temporelles. La première solution (au dessus) déduit directement l'ensemble de la matrice d'intersection topologique sur base de la relation entre les deux histoires. La seconde possibilité (au dessous) recherche l'intersection pour chaque valeur de la matrice d'intersection topologique. La première méthode part d'une relation en particulier, la seconde déduit les matrices d'intersections pour un ensemble de relations entre histoires spatio-temporelles.

Les règles que nous avons établies correspondent à la seconde possibilité. Ainsi, pour chaque configuration de vie et de mouvement, nous passons en revue les 9 possibilités d'intersections et nous vérifions si la succession de relations correspond à une valeur non vide ou pas. Notons que, d'après les règles de restriction relatives aux matrices d'intersections topologiques, il n'est nécessaire en fait de passer que 8 possibilités matricielles. En effet, les extérieurs des objets A et B sont toujours en intersection, comme présenté à l'équation (12.1) présentée au Chapitre XII.1.

B. Règles de conversion de LMC en relation topologique

Pour chacune des intersections possibles, nous proposons de définir la configuration de vie et de mouvement qui établit le cas où l'intersection topologique n'est pas nulle. Par ailleurs, une représentation d'un exemple de configuration est également proposée.

- $R(A^0 B^0)$ - intérieur A / intérieur B

L'intersection est $\neg\emptyset$ si la relation spatio-temporelle identitaire $pApBe$ est strictement incluse dans la configuration de vie et de mouvement. Dans le cas où cette relation commence ou termine une configuration de vie et de mouvement, alors l'intersection est vide.

$$\forall LMC_{A-B}, \exists pApBe \subset LCM(2, \dots, n-1) \rightarrow R(A^0 B^0) = \neg\emptyset \quad (6.3)$$

La Figure VII-4 représente 4 exemples de configurations de vie et de mouvement dont la généralisation conduit à une intersection « intérieur-intérieur » entre les objets A et B.

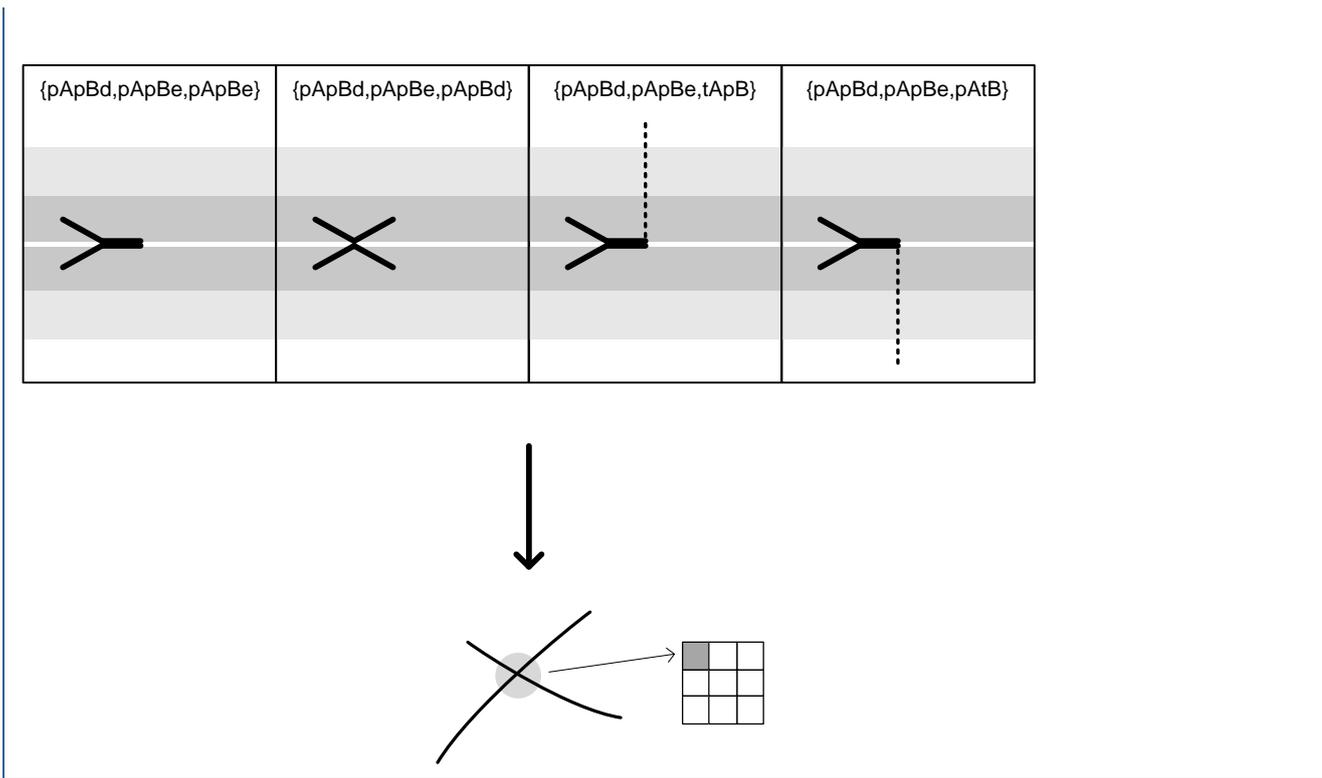


Figure VII-4 Exemple de 4 configurations de vie et de mouvement dont la généralisation conduit à une intersection intérieur/intérieur entre les objets A et B.

Notons que l'état égalitaire peut être instantané dans une transition respectant un critère topologique. Ceci pourrait sembler être antagoniste vis-à-vis de la définition que nous avons réalisée des états spatio-temporels identitaires en précisant que seul l'état de transition pouvait être instantané. Dans la représentation des configurations de vie et de mouvement que nous avons réalisée, nous considérons un modèle de relation topologique entre deux points. Ce modèle affine l'état spatio-temporel identitaire $pApB$ qui, lui, dure obligatoirement pendant un intervalle de temps. Dans cet intervalle, il est possible d'avoir un état égalitaire instantané selon la théorie de la dominance. L'état de disjonction est quant à lui toujours valable durant un intervalle de temps.

- $R(A^0\partial B)$ - intérieur A / frontière B

Cette relation topologique correspond aux cas où l'objet B termine ou débute sa présence au même endroit spatial et temporel que l'objet A. De ce fait, il est nécessaire de rechercher dans la configuration de vie et de mouvement une succession entre un état de transition et un état d'égalité. L'état de transition doit correspondre à la frontière de l'objet B et la relation d'égalité directement successive ou directement précédente montre que l'objet apparaît à la même position spatiale que l'objet A. De plus, la relation doit se produire durant la phase de présence de l'objet A et donc ne peut être prise comme une frontière de sa

présence. C'est la raison pour laquelle nous excluons les temporalités 1 et n de la configuration de vie et de mouvement.

$$\begin{aligned}
 &\forall LMC_{A-B}, \exists pApBe, \exists pAtB : \\
 &hold(pApBe, i) \subset LCM(2, \dots, n-1) \wedge \\
 &hold(pAtB, t) \subset LMC \wedge lim(t, i) \\
 &\rightarrow R(\partial AB^0) = \neg \emptyset
 \end{aligned}
 \tag{6.4}$$

La Figure VII-5 représente quelques exemples de configurations de vie et de mouvement répondant à ce critère. La représentation montre également la valeur de la matrice d'intersection topologique sur laquelle nous nous focalisons.

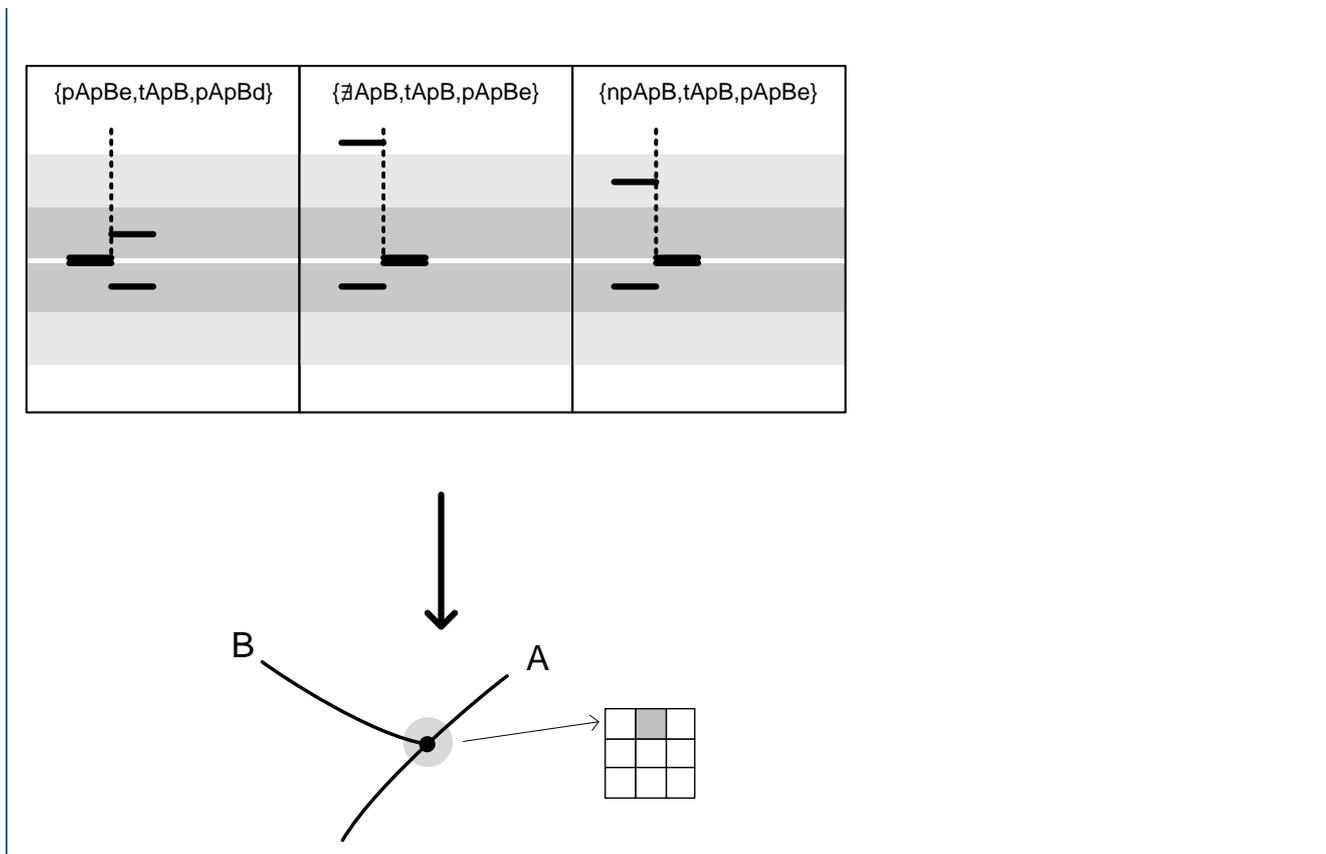


Figure VII-5 Représentation de trois configurations de vie et de mouvement généralisées en la relation topologique d'intersection entre l'intérieur de l'objet A et la frontière de l'objet B. La représentation indique également la case du symbole du motif de relation topologique correspondant.

- $R(A^0 B^-)$ - intérieur A / extérieur B

L'intersection entre l'intérieur de A et l'extérieur de B aura lieu dès lors que les objets seront disjoints ou que l'objet A aura une présence précédant ou suivant l'objet B. La recherche de la succession dans la configuration de vie et de mouvement peut être définie comme :

$$\begin{aligned} &\forall LMC_{A-B}, \\ &\forall (pA) : \exists (npB) \vee \exists (\#B) \vee \exists (pApBd) \\ &\rightarrow R(\partial AB^-) = \neg \emptyset \end{aligned} \tag{6.5}$$

La représentation de ces intersections est proposée à la Figure VII-6. On y voit trois cas de configurations de vie et de mouvement pour lesquels l'objet B est soit non présent, soit non existant ou bien que les deux objets sont disjoints d'un point de vue topologique.

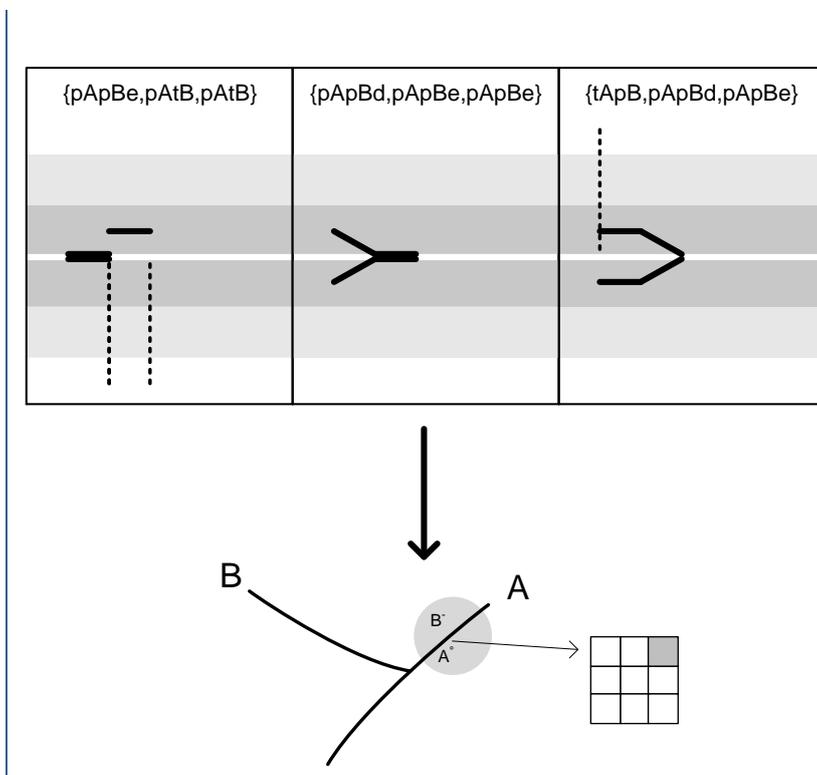


Figure VII-6 Représentation de trois possibilités d'intersections entre l'intérieur de l'objet A et l'extérieur de l'objet B d'un point de vue des configurations de vie et de mouvement. On y voit que, dès que l'objet B présente une relation spatio-temporelle identitaire de non-présence, de non-existence ou de disjonction avec l'objet A, alors l'intérieur de l'objet A est en relation avec l'extérieur de l'objet B.

- $R(\partial AB^0)$ - frontière A / intérieur B

Cette condition se formalise sensiblement comme le corollaire de la proposition $R(A^0 \partial B)$. Il est alors nécessaire de rechercher la succession de configuration où il existe un état de transition pour l'objet B directement précédant ou suivant un état d'égalité entre les deux objets. La formalisation est la suivante :

$$\begin{aligned}
 &\forall LMC_{A-B}, \exists pApBe, \exists tApB : \\
 &hold(pApBe, i) \subset LCM(2, \dots, n-1) \wedge \\
 &hold(tApB, t) \subset LMC \wedge lim(t, i) \\
 &\rightarrow R(A^0 \partial B) = \neg \emptyset
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

La Figure VII-7 donne un exemple de configurations de vie et de mouvement qui sont généralisées de la sorte.

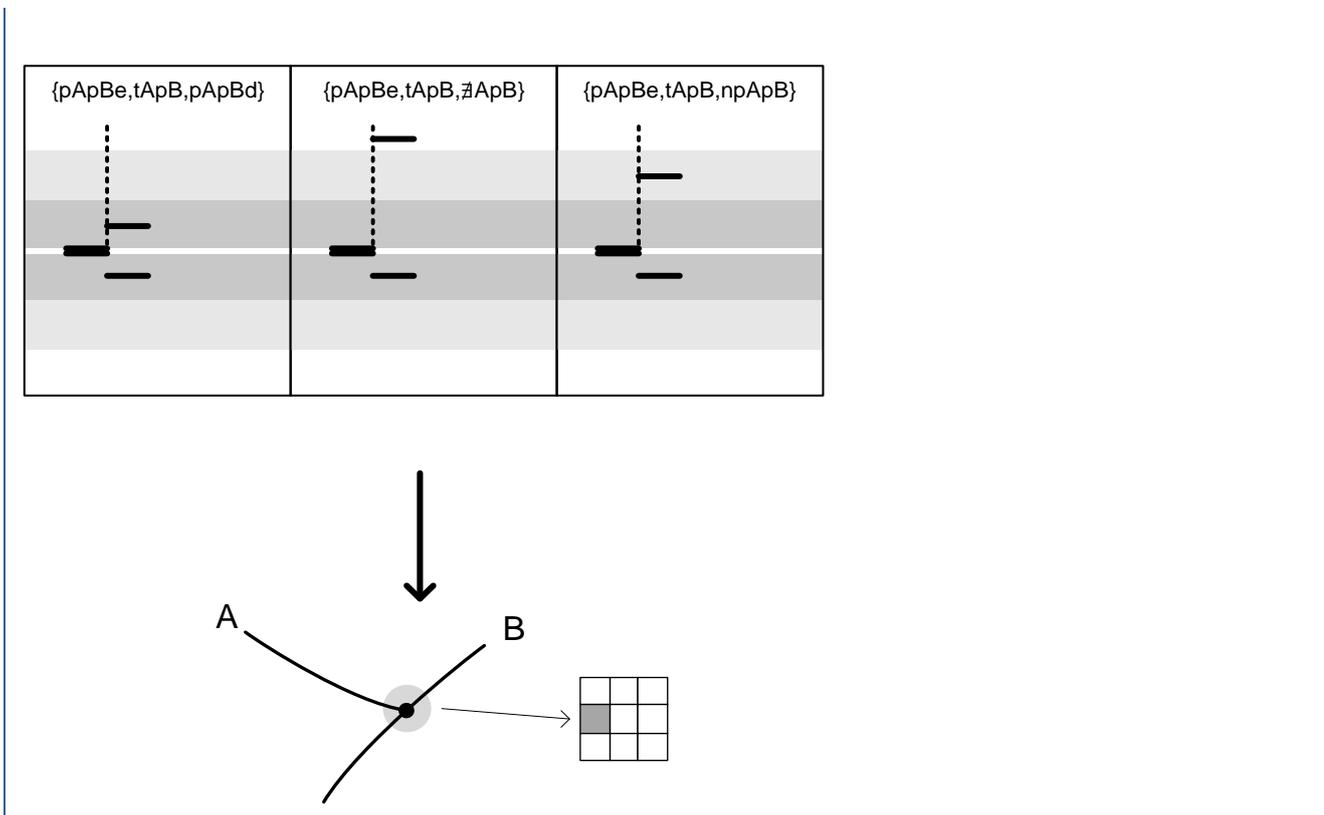


Figure VII-7 Visualisation de la généralisation de configurations de vie et de mouvement vers la relation topologique entre la frontière de l'objet A et l'intérieur de l'objet B. La relation est obtenue du fait de la succession directe d'un état d'égalité avec un état de transition (représentant la frontière des objets).

- $R(\partial A \partial B)$ - frontière A / frontière B

La relation entre les deux frontières d'objets représente la situation où les objets sont en phase d'apparition ou de disparition simultanée. Afin d'obtenir une configuration de la sorte, il est nécessaire que les deux objets passent par une phase de transition commune après une phase d'égalité. Lors de la description non complète de configurations de vie et de mouvement, c'est-à-dire lorsque le début et la fin des configurations de vie et de mouvement ne passent pas par une phase de transition commune, cette relation peut être exprimée simplement comme une relation d'égalité en début ou en fin de configuration de vie et de mouvement. La formalisation de cette relation topologique correspond à :

$$\begin{aligned} & \forall LMC_{A-B}, \exists pApBe, \exists LCM(0, \dots, n) : \\ & Hold(pApBe, 0) \vee Hold(pApBe, n) \\ & \rightarrow R(\partial A \partial B) = \neg \emptyset \end{aligned} \quad (6.7)$$

Dans le cas d'une formalisation complète on obtient alors la formalisation suivante :

$$\begin{aligned} & \forall LMC_{A-B}, \exists pApBe, \exists tAtB, \exists LCM(0, \dots, n) : \\ & [Hold - at(tAtB, 0) \wedge Hold(pApBe, i) \wedge lim(0, i)] \\ & \wedge [Hold - at(tAtB, n) \wedge Hold(pApBe, j) \wedge lim(n, j)] \\ & \rightarrow R(\partial A \partial B) = \neg \emptyset \end{aligned} \quad (6.8)$$

Cette condition exprime bien le fait qu'il doit y avoir un double état de transition avant une phase d'égalité des deux objets. Ces notions de formalisations complètes viennent de l'entrée dans le graphe de voisinage conceptuel des relations spatio-temporelles identitaires. Une formalisation non-complète est issue d'une entrée par n'importe quelle relation du graphe, tandis qu'une formalisation complète débutera toujours par le double état de transition. Cette notion de formalisation complète est plus envisageable dans le cas d'un graphe de voisinage autorisant un changement simultané de deux systèmes (voir Chapitre V.4.B). Notons que nous devons restreindre la relation de présence commune à la relation d'égalité topologique afin de ne pas considérer le cas où deux objets deviennent présents simultanément à des positions spatiales différentes. La Figure VII-8 représente en haut la généralisation sur base d'une représentation non complète et en bas la généralisation sur base de configuration de vie et de mouvement complète.

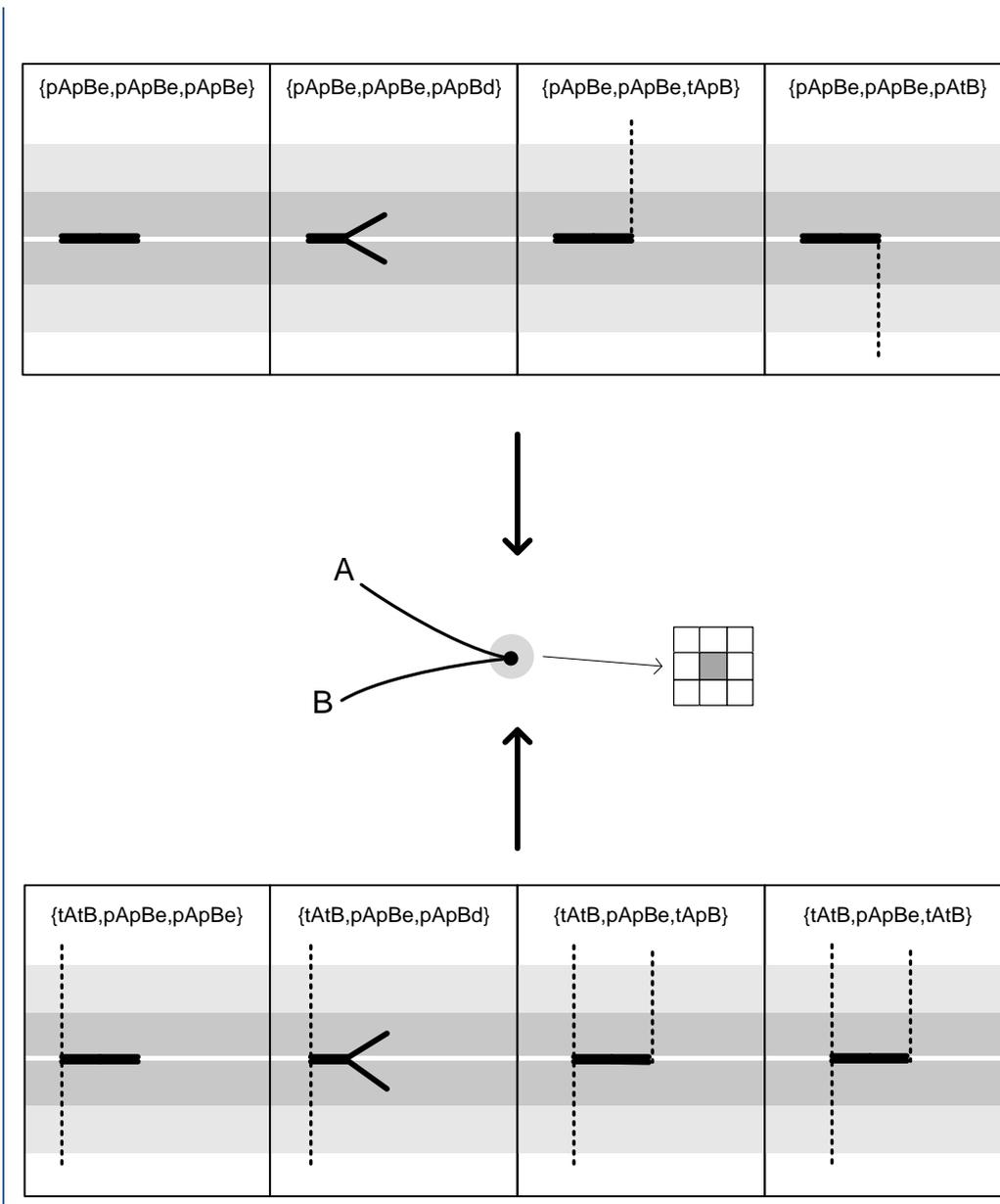


Figure VII-8 La partie supérieure montre la généralisation de configurations de vie et de mouvement d'une représentation non-complète vers la relation entre les deux frontières des objets A et B. La partie inférieure montre des configurations dont le début commence par la double relation de transition vers la relation entre les deux frontières des objets A et B. Dans tous les cas, l'information quant à l'intersection du début ou de la fin de période d'existence est perdue.

Signalons finalement que, dans le cadre d'une application de généralisation topologique de configuration de vie et de mouvement, l'information quant au début et à la fin de période d'existence est perdue. En effet, il n'est pas possible sur base de l'intersection matricielle des 9-intersections de définir si les objets se rencontrent lors de la fin de leur présence ou lors du début de celle-ci.

- $R(\partial AB^-)$ - frontière A / extérieur B

Cette relation qualifie le fait que l'objet A ne termine et ne débute pas sa phase de présence à la même position spatio-temporelle que l'objet B. La vérification de cette relation est plus facilement conceptualisable en recherchant la situation inverse. En effet, il est plus simple de rechercher les configurations pour lesquelles la frontière de l'objet A sera en relation totale avec l'intérieur de B et / ou l'extérieur de B et d'exclure ces cas. Dans toutes les autres situations, cette condition sera vérifiée. La formalisation de cette relation passe donc par la combinaison des conditions (6.6) et (6.8). La formulation est la suivante :

$$\begin{aligned}
 & \forall LMC_{A-B}, \exists pApBe, \exists tApB, \exists LCM(0, \dots, n) : \\
 & \left(\begin{array}{l} hold(pApBe, i) \subset LCM(2, \dots, n-1) \wedge \\ hold(tApB, t) \subset LMC \wedge lim(t, i) \end{array} \right) \\
 & + \hspace{15em} (6.9) \\
 & \left(\begin{array}{l} [Hold - at(tAtB, 0) \wedge Hold(pApBe, i) \wedge lim(0, i)] \\ \wedge [Hold - at(tAtB, n) \wedge Hold(pApBe, j) \wedge lim(n, j)] \end{array} \right) \\
 & \rightarrow R(\partial AB^-) = \emptyset
 \end{aligned}$$

Dans tous les autres cas, la relation sera non nulle. Nous parlons de relation totale dans le sens où toutes les frontières de l'objet A doivent participer à la relation. Une représentation de ce type de relation est courante et assez simple. La Figure VII-9 montre cette situation.

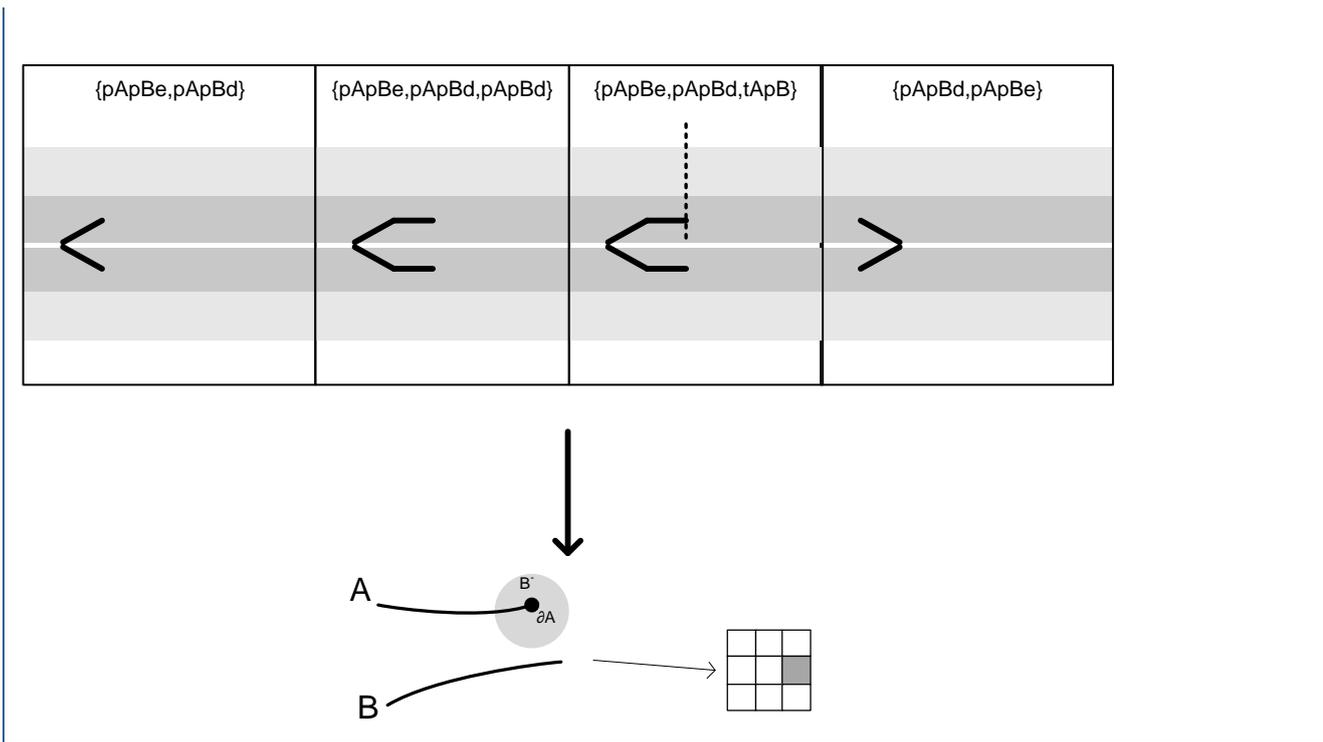


Figure VII-9 Représentation de configurations de vie et de mouvement généralisées vers la relation topologique entre l'extérieur de l'objet B et la frontière de l'objet A. Ces relations sont les situations qui ne répondent pas à l'équation (6.9).

- $R(A^-B^0)$ - extérieur A / intérieur B

La relation entre l'extérieur de A et l'intérieur de B est la situation inverse de la proposition (6.5). Sa formalisation est donc :

$$\begin{aligned}
 &\forall LMC_{A-B}, \\
 &\forall (pB) : \exists (npA) \vee \exists (\#A) \vee \exists (pApBd) \tag{6.10} \\
 &\rightarrow R(A^-B^0) = \neg \emptyset
 \end{aligned}$$

La représentation de configuration de vie et de mouvement répondant à ce critère est proposée à la Figure VII-10.

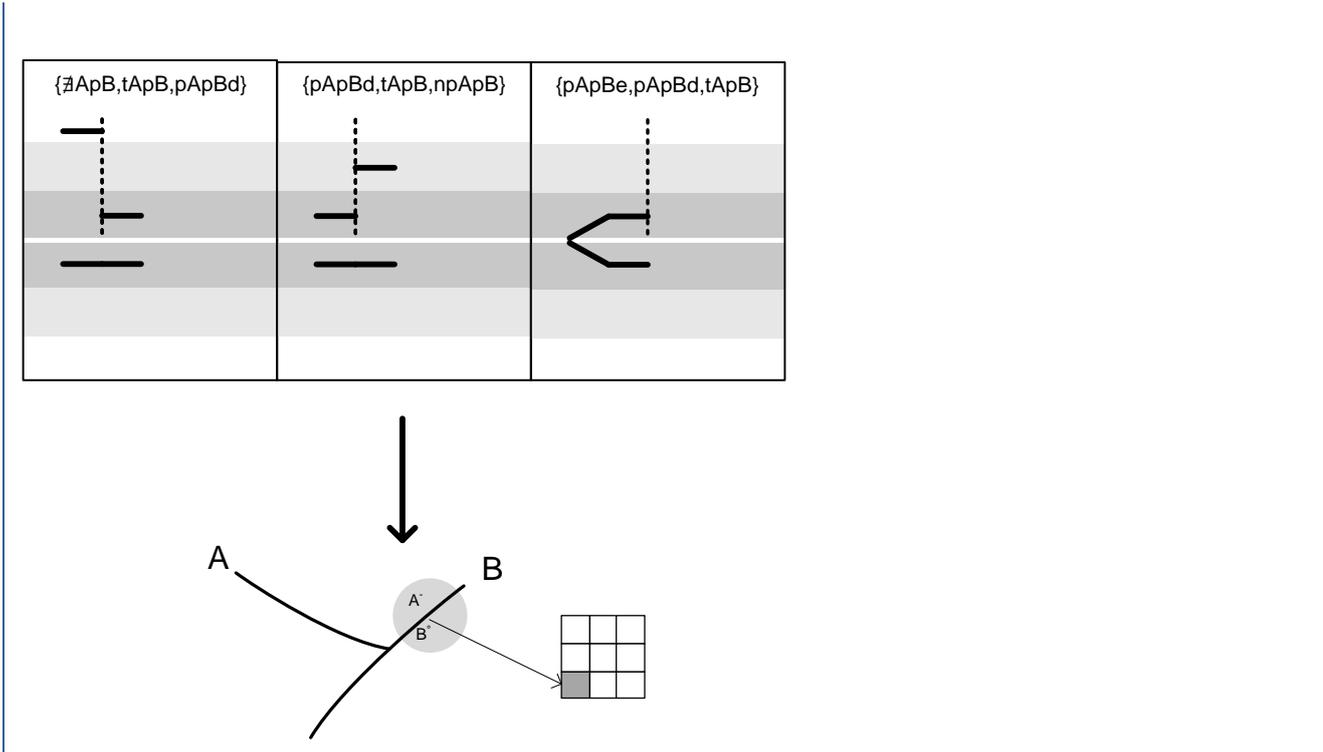


Figure VII-10 Représentation de la généralisation de configurations de vie et de mouvement vers la relation entre l'extérieur de l'objet A et l'intérieur de l'objet B. Cette généralisation est l'inverse de celle présentée à la proposition (6.5)

- $R(A^- \partial B)$ - extérieur A / frontière B

De la même manière que précédemment, la relation entre l'extérieur de l'objet A et la frontière de l'objet B est analysée comme via la situation inverse. On recherche alors toutes les possibilités d'avoir une intersection nulle entre les deux objets. La généralisation est également définie comme l'inverse de la proposition (6.9).

$$\begin{aligned}
 & \forall LMC_{A-B}, \exists pApBe, \exists pAtB, \exists LCM(0, \dots, n) : \\
 & \left(\begin{array}{l} hold(pApBe, i) \subset LCM(2, \dots, n-1) \wedge \\ hold(pAtB, t) \subset LMC \wedge lim(t, i) \end{array} \right) \\
 & + \\
 & \left(\begin{array}{l} [Hold - at(tAtB, 0) \wedge Hold(pApBe, i) \wedge lim(0, i)] \\ \wedge [Hold - at(tAtB, n) \wedge Hold(pApBe, j) \wedge lim(n, j)] \end{array} \right) \\
 & \rightarrow R(A^- \partial B) = \emptyset
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$

La généralisation précédente peut être représentée comme à la Figure VII-11.

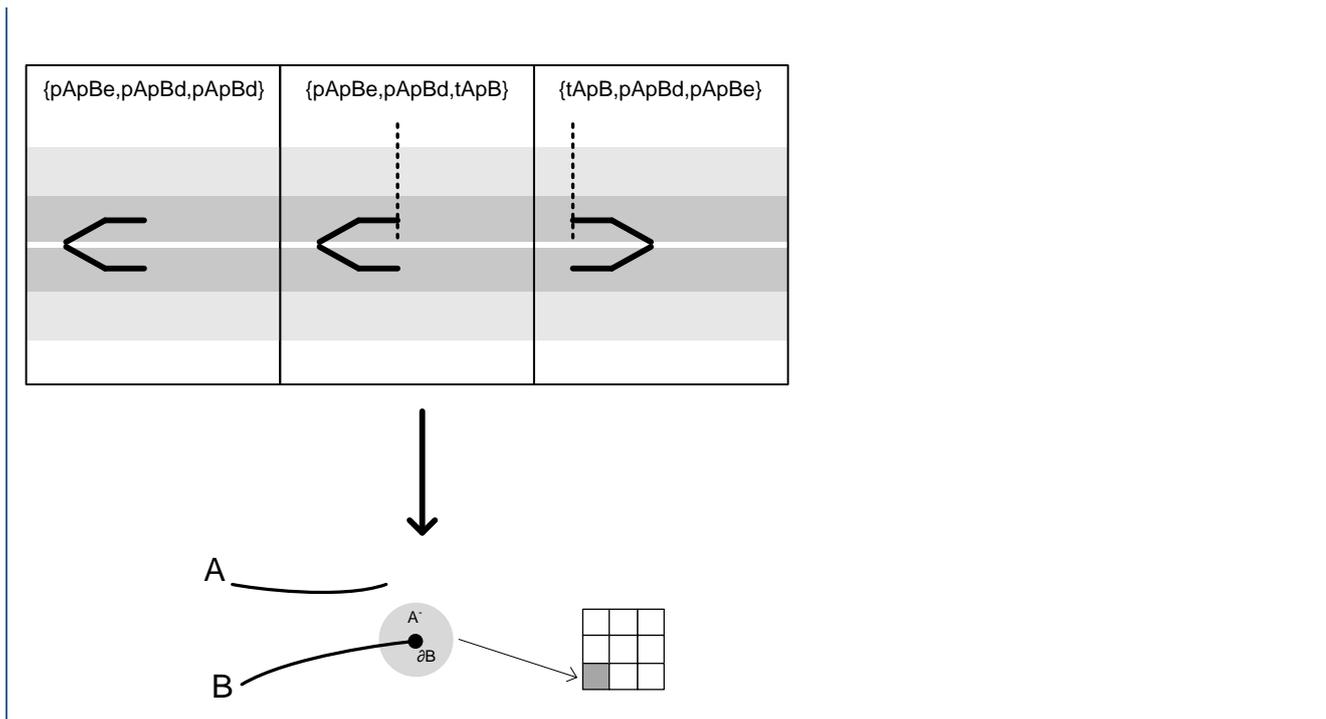


Figure VII-11 Généralisation de configurations de vie et de mouvement vers la relation topologique entre l'extérieur de l'objet A et la frontière de l'objet B. La recherche s'effectue en considérant la proposition inverse, soit la recherche des cas où toutes les frontières de B ne sont pas en intersection avec l'intérieur de A.

- $R(A^- B^-)$ - extérieur A / extérieur B

Comme défini dans les règles générales de relations topologiques entre deux lignes dans un espace euclidien, l'extérieur de deux objets seront toujours en relation. En effet, l'espace-temps étant infini, il existera toujours une partie de cet espace où les objets ne seront plus présents et dès lors où leur extérieur pourra être en contact. La formalisation est donc triviale.

$$\forall LMC_{A-B} \rightarrow R(A^- B^-) = -\emptyset \tag{6.12}$$

C. Relations impossibles

L'application successive de ces règles de généralisation permet de définir les relations topologiques d'un ensemble de configurations de vie et de mouvement. Nous avons implémenté ces règles au niveau du logiciel de génération de configurations de vie et de mouvement afin de vérifier que toutes les configurations soient bien généralisées. Ce processus nous a conduits à deux constatations.

Premièrement, il est nécessaire de considérer un niveau de 8 états successifs dans les configurations de vie et de mouvement afin de représenter l'ensemble des relations topologiques. Cette valeur est obtenue par la généralisation automatique de l'ensemble des

configurations de mouvement par notre logiciel. Au-delà du niveau 8 de configurations spatio-temporelles, toutes les configurations sont généralisées vers une relation topologique possible. Nous en déduisons qu'un niveau supérieur n'apportera pas de relation topologique supplémentaire. D'autre part, certaines relations topologiques entre deux lignes ne généralisent aucune configuration spatio-temporelle. Il s'agit des 8 relations présentées à la Figure VII-12.

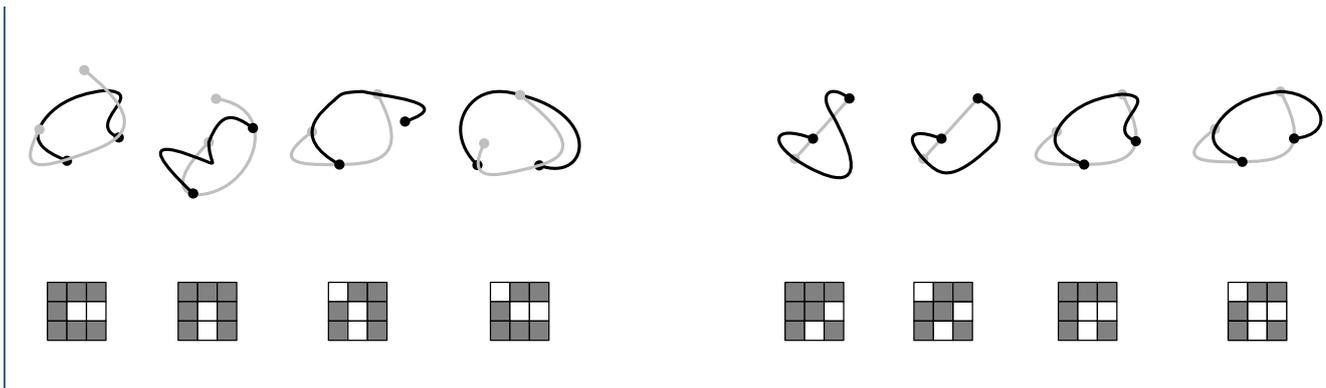


Figure VII-12 Relations topologiques ne généralisant pas de configuration de vie et de mouvement. La forme de deux histoires spatio-temporelles ne peut jamais conduire à ce type de relation topologique. Les 4 relations de gauche nécessitent un déplacement instantané tandis que les 4 relations de droite nécessitent un retour dans le passé.

Si l'on analyse ces relations, et quelle que soit la transformation topologique qui leur est appliquée, on constate qu'elles ne généraliseront jamais de configuration de vie et de mouvement. Certaines de ces relations imposent un déplacement instantané d'un des deux objets. Or, comme nous l'avons défini préalablement, un déplacement instantané n'est pas possible dans le monde physique. Ces relations ne généraliseront donc jamais la configuration de vie et de mouvement de deux objets du monde physique. Il en est de même lors de l'application directe de ces relations sur les formes spatio-temporelles. Un second groupe de relations imposerait un retour dans le passé d'un des deux objets afin d'être mis en œuvre. Cette situation est impossible dans un monde physique et également en contradiction vis-à-vis des axiomes que nous avons posés. Lorsqu'on analyse la position de ces relations sur le diagramme de voisinage des 33 relations topologiques entre deux lignes, on constate également qu'elles se situent toutes sur la même zone du diagramme. Les 8 relations impossibles sont grisées dans le diagramme conceptuel de voisinage de la Figure VII-13.

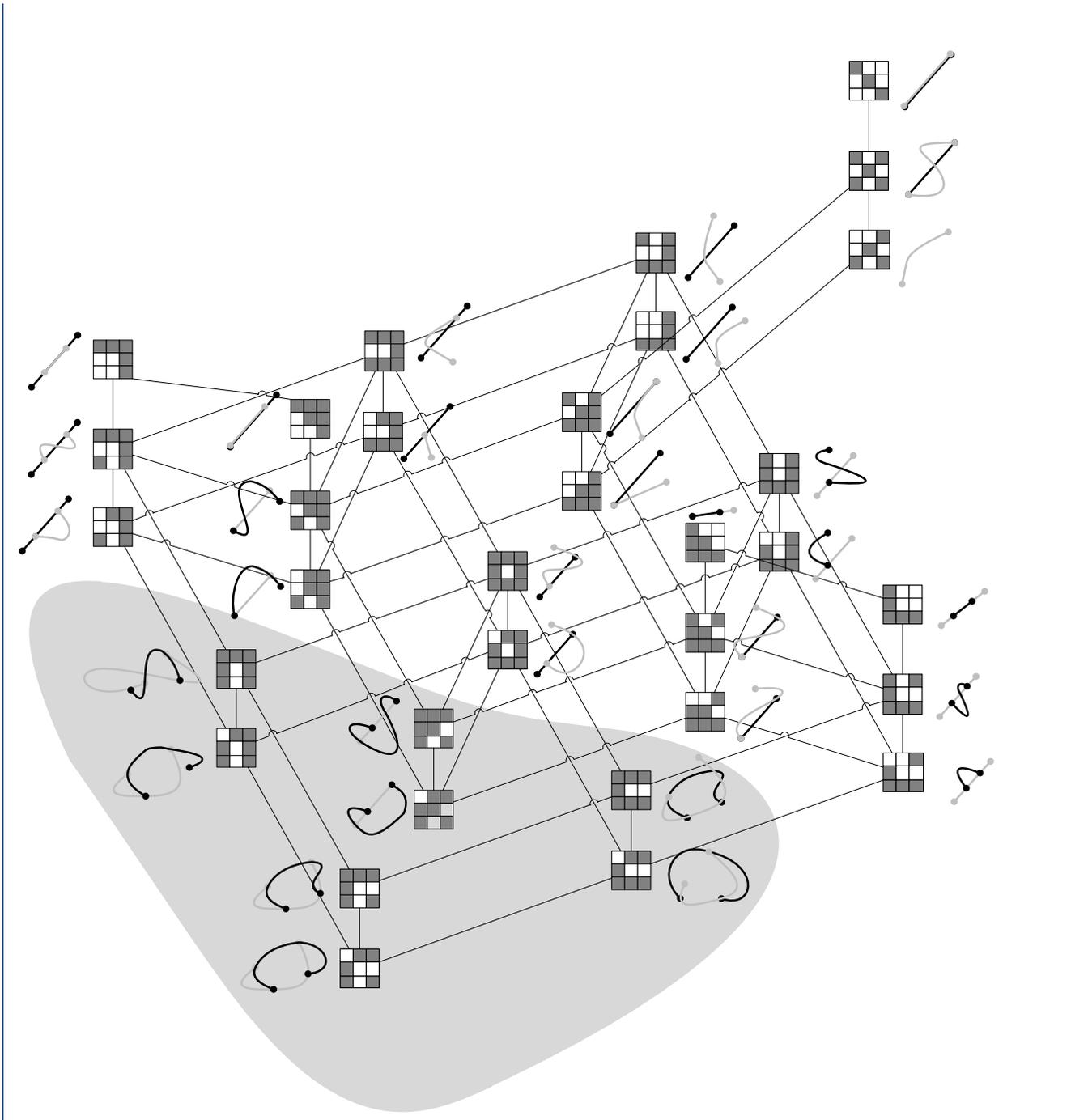
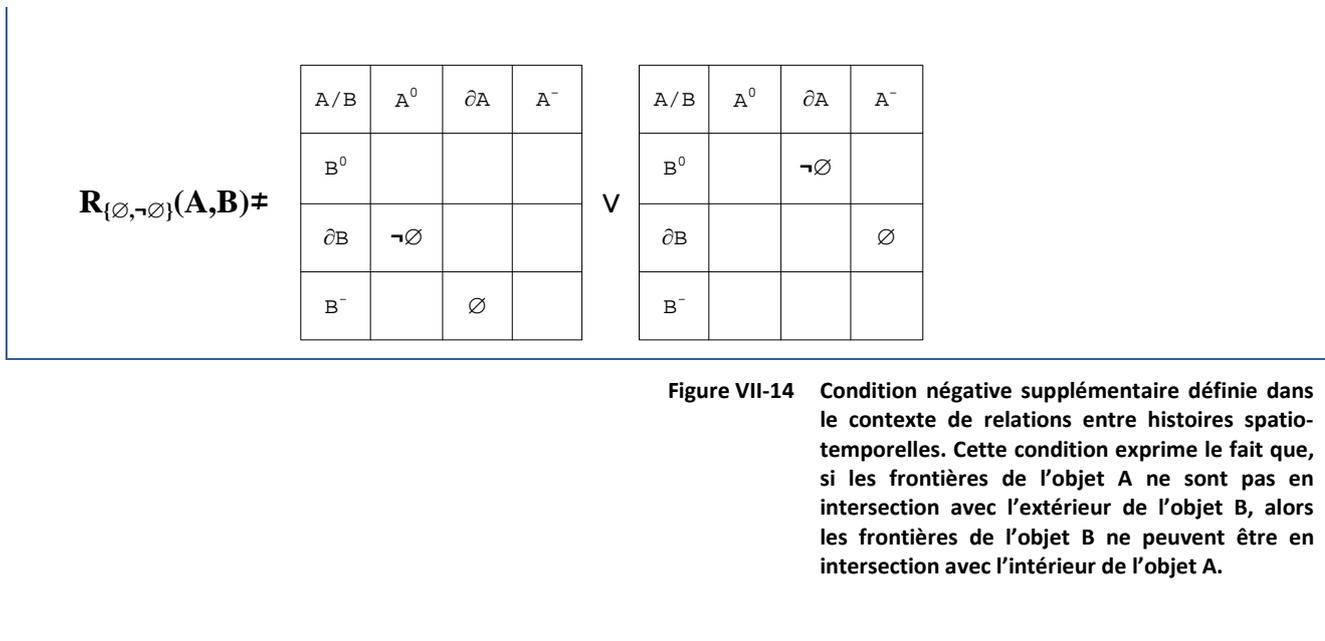


Figure VII-13 Diagramme conceptuel de voisinage des 33 relations topologiques entre deux lignes. Les 8 relations de la zone grisée ne peuvent décrire la relation entre deux histoires spatio-temporelles. Il existe donc 25 relations topologiques possibles dans un contexte spatio-temporel.

L'analyse des matrices d'intersections de ces 8 relations permet de définir une condition négative commune à toutes ces relations. Cette condition exprime le fait que si les frontières de A ne sont pas en intersection avec l'extérieur de B, alors les frontières de B ne peuvent être

en intersection avec l'intérieur de A, et vice-versa. La représentation matricielle de cette condition est exprimée à la Figure VII-14.



La description de cette condition négative dans un contexte spatio-temporel permet une compréhension plus claire de sa signification. La condition exprime le fait que, si un objet A débute et termine sa phase de présence durant la phase de présence de l'objet B ou en même temps que son apparition et sa disparition, alors l'objet B ne peut pas débiter et / ou terminer sa présence durant celle de l'objet A. En effet si, l'objet A apparait et disparaît pendant la présence de B, alors il doit temporellement être inclus dans la présence de l'objet B. Si maintenant l'objet B termine ou débute sa présence durant celle de A, alors il doit également avoir une relation de recouvrement temporel avec l'objet A. Or ces deux conditions ne sont pas compatibles. A ne peut pas être inclus temporellement dans B alors que A recouvre temporellement B.

La définition d'une condition d'existence supplémentaire permet de vérifier la cohérence de données spatio-temporelles. En effet, si lors d'un enregistrement de données, on constate que la relation entre les histoires spatio-temporelles correspond à un des 8 cas exclus d'un point de vue topologique, alors il y a une incohérence des informations enregistrées. D'autre part, ce type d'analyse montre l'efficacité de raisonner sur base de configurations de vie et de mouvement.

Sur base d'un jeu de 9 conditions de configurations de vie et de mouvement, il est possible de déduire la relation topologique entre deux histoires spatio-temporelles sans avoir à calculer une relation topologique entre lignes tridimensionnelles voire plus.

4. Généralisation de LMC sur base de relation D-line/D-line

A. Principe de généralisation

De la même manière que précédemment, il est possible de généraliser les configurations de vie et de mouvement en utilisant un autre modèle de raisonnement spatial qualitatif. La généralisation sur base du modèle de raisonnement qualitatif topologique conduit à une perte d'informations. Dans le cadre strict d'une relation topologique, il n'y a pas de distinction entre les deux frontières d'un segment de droite. Dès lors, il n'y a pas de différence entre la transition de début et de fin de phase de présence dans un contexte spatio-temporel. Plusieurs modèles de raisonnement qualitatifs ont été développés afin de différencier les points de départ et d'arrivée de segments de droites. Citons, entre autres, le CBM (Clementini and Di Felice 1998), le $9i+$ intersection (Kurata and Egenhofer 2007),... qui correspondent à ce type de modèles. La suite de cette section sera consacrée à une généralisation des configurations de vie et de mouvement via le modèle des $9i+$. Comme présenté au Chapitre II.3.D, ce modèle est formalisé de façon très similaire au modèle des 9-intersections. En effet, la seule différence avec celui-ci est une division des frontières en deux zones symbolisées comme le point de départ (tail) et le point d'arrivée (head). Ce formalisme conduit à un ensemble de 68 relations spatiales entre deux lignes dirigées. L'ensemble des 68 relations de ce formalisme est présenté à la Figure VII-15.

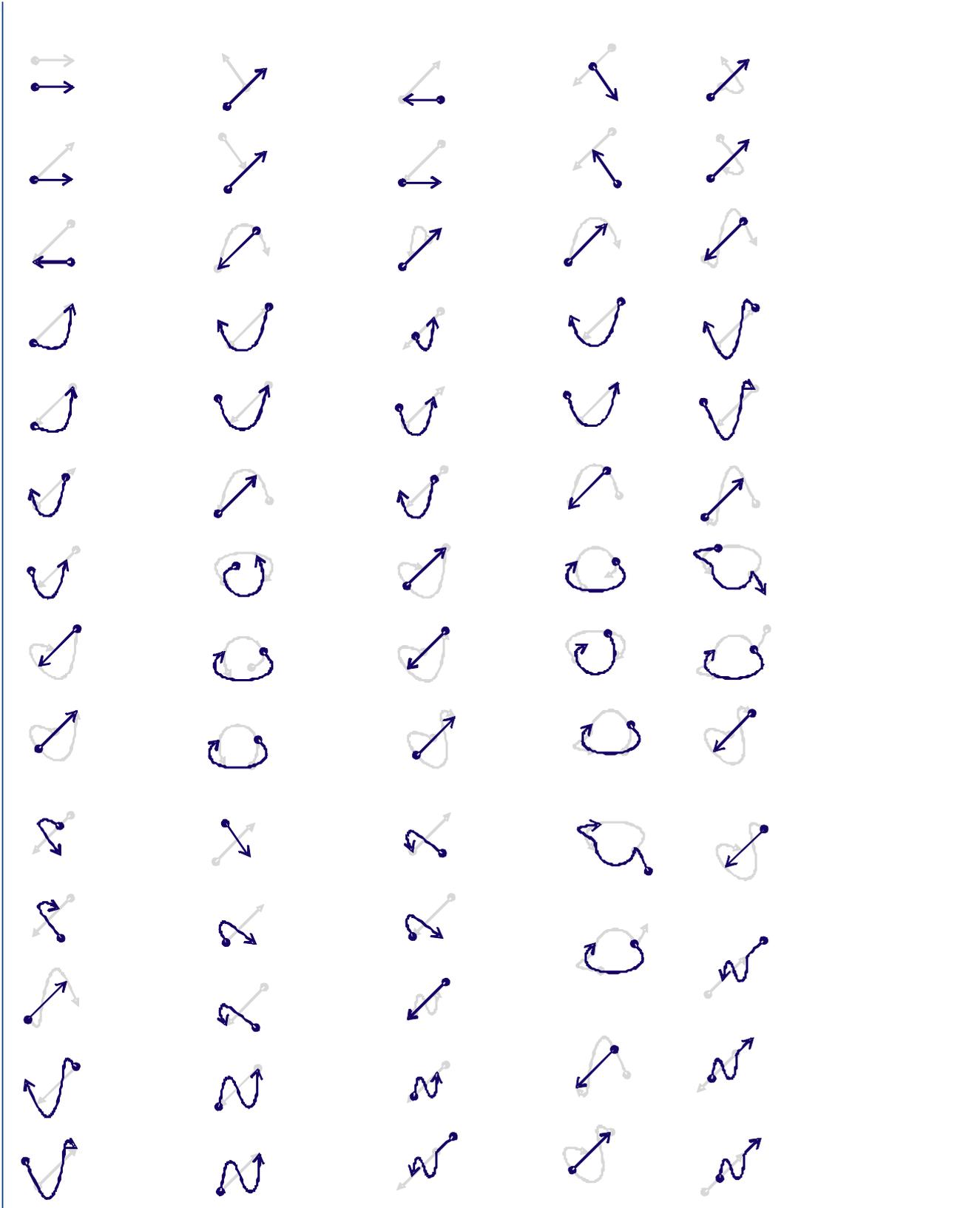


Figure VII-15 Représentation des 68 relations du formalisme Head-Tail Body intersection entre deux lignes orientées. Cette représentation est inspirée de Kurata (Kurata 2007).

Le raffinement des relations conduit évidemment à un plus grand nombre de successions de relations spatio-temporelles identitaires à concevoir. D'une manière simple, les 5 intersections concernant des frontières dans le formalisme des 9 intersections deviennent 12 intersections lorsque l'on différencie les deux frontières d'un élément linéaire. L'application de la généralisation conduit à la même restriction que lors de l'analyse du modèle de relation topologique ; les relations impossibles sont uniquement définies par la condition négative définie à la Figure VII-14.

5. Conclusion

Les configurations de vie et de mouvement constituent une base de raisonnement spatio-temporel utile à plusieurs applications. Par leur généralisation en relations topologiques entre histoires spatio-temporelles, nous avons présenté une des applications possibles de ce formalisme. De plus, la généralisation des configurations de vie et de mouvement conduit à la définition de 25 relations entre histoires spatio-temporelles permettant de raisonner sur le déplacement spatial, temporel et identitaire de deux objets. Le cheminement de recherche a également abouti à la définition de relations topologiques impossibles dans un contexte spatio-temporel. Cette formalisation est fondamentale dans des applications de vérification de cohérence de données spatio-temporelles.

D'autres formalismes peuvent être utilisés afin de généraliser les configurations de vie et de mouvement. Comme nous l'avons expliqué, plus le raisonnement qualitatif utilisé lors de la généralisation est complexe, plus l'information spatio-temporelle extraite sera importante. En d'autres termes, on peut dire que, plus le modèle sera complexe, moins la perte d'informations due à la généralisation sera importante. Dans la première application, nous avons volontairement utilisé un des formalismes les plus simples d'un point de vue de sa formalisation afin de rendre compte que, même à ce niveau, la généralisation est tout à fait pertinente et qu'elle peut être utilisée afin de raisonner sur des objets en mouvement dans l'espace-temps.

Une attention toute particulière doit cependant être portée lors de l'interprétation des relations généralisées. En effet, nous avons pour habitude de visualiser ces relations comme application à des objets spatiaux. Il ne faut pas oublier qu'elles sont utilisées ici dans un contexte spatio-temporel. L'exemple des 8 relations topologiques entre lignes impossibles exprime bien cette mise en garde. De prime abord, ces relations semblent tout à fait cohérente vis-à-vis de l'information que nous représentons. Or, comme on a pu le constater, elles ne généralisent jamais de configuration de vie et de mouvement. Le chapitre suivant est consacré à l'interprétation des relations entre histoires spatio-temporelles afin de proposer un premier aperçu de la pertinence sémantique d'une telle généralisation.

Chapitre VIII.

Interprétation en langage naturel

*Tous les moyens de l'esprit sont enfermés dans le langage;
et qui n'a point réfléchi sur le langage n'a point réfléchi du tout.
Emile-Auguste Chartier*

1. Interprétation et langage naturel

Il existe un grand nombre de modèles de relations spatiales qualitatives, temporelles ou encore spatio-temporelles. Afin d'aider à la compréhension de ces modèles, il est nécessaire de donner du sens aux relations définies. En effet, la recherche de relations a pour but d'aider à l'interprétation de l'information décrite par ces mêmes relations. Une définition purement mathématique de relations spatio-temporelles fournit une interprétation limitée aux seuls utilisateurs au fait de leurs définitions et à même de comprendre les formalismes utilisés dans leurs définitions. L'utilisateur final a besoin, quant à lui, d'une interprétation dans son langage naturel, d'une explication du sens des relations proposées. La bonne compréhension du sens des relations aidera l'utilisateur à bien formuler des requêtes et lui permettra d'extraire d'autant plus de connaissances à partir de ses données qu'il en maîtrisera l'interprétation (Egenhofer and Shariff 1998; Lawson, Van Der Zee et al. 2009). L'interprétation en langage naturel de relations qualitatives dépend évidemment du langage utilisé. La perception de la spatialité quant à elle peut varier d'une culture à une autre (Traugott 1978). Notre but dans ce chapitre est de proposer deux interprétations aux formalismes que nous avons établis. Premièrement, nous rechercherons une interprétation cohérente des relations spatio-

temporelles généralisées à partir des configurations de vie et de mouvement. Cette étape correspond à l'analyse faite des relations vues comme un tout. D'autre part, nous proposerons une interprétation non pas en se basant sur les relations et en leur cherchant un sens, mais bien en partant d'expressions spatio-temporelles du sens commun et ensuite en recherchant une interprétation mathématique à celles-ci. Cette interprétation est alors vue comme une analyse des composants de la définition même d'une relation. Afin d'aider le lecteur à bien comprendre l'interprétation de formalismes de raisonnement qualitatif, nous effectuerons un bref rappel de l'interprétation de langages connus. Notons également l'importance de l'interprétation pour un domaine d'application particulier. L'étude du sens des relations change en fonction des applications dans lesquelles elles s'appliquent (Klippel and Montello 2007). Nous pensons que l'interprétation de relations spatio-temporelles est d'autant plus complexe que le modèle qu'elle décrit l'est aussi. Des formalismes tels le QTC, la temporalisation du RCC,... rendent l'interprétation en langage naturel complexe car le niveau de détail et de complexité de tels modèles est très élevé. Un modèle proposant un ensemble de relations très généralisées, apportant une vision élevée de l'information, sera d'autant plus proche de la perception qu'en fait un utilisateur final que celui-ci restera simple.

A. Exemples avec le modèles des 9-i ou RCC

Le modèle de raisonnement spatial qualitatif le plus utilisé est sans doute le modèle du RCC-8 ou des 9-i. Ces deux modèles proposent un même ensemble de 8 relations qualitatives entre deux régions dans l'espace. L'interprétation de ces 8 relations aide à visualiser directement le type de contact qu'entretiennent deux régions (Andrew U 1992; Mark and Egenhofer 1994; Egenhofer and Mark 1995; Egenhofer and Shariff 1998; Galton and Duckham 2006; Kurata 2007). C'est d'ailleurs par ces interprétations que l'utilisateur fait aujourd'hui appel à ces relations et non pas, par exemple, par une matrice d'intersection décrivant la relation. La Figure VIII-1 fournit l'interprétation des 8 relations spatiales entre deux régions. Chaque interprétation est liée de manière univoque à une relation ; il ne peut y avoir de doute entre l'interprétation et la relation qui lui est associée.

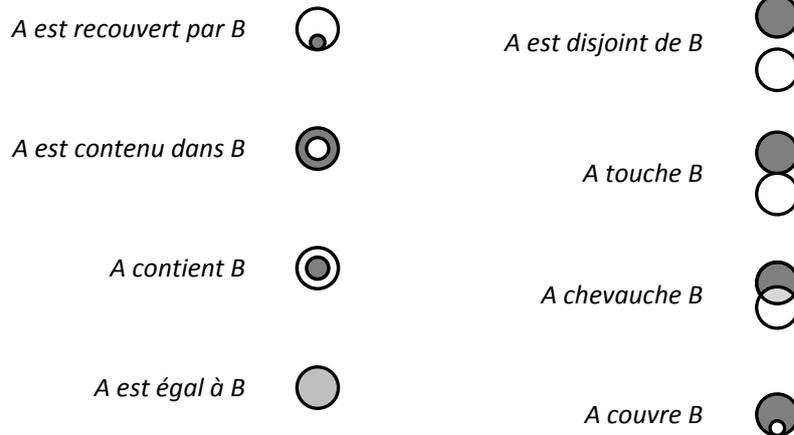


Figure VIII-1 Interprétation en langage naturel des 8 relations du modèle des 9-i. Chaque interprétation est liée de manière univoque à sa description géométrique.

L'interprétation doit toujours être considérée avec à l'esprit la géométrie utilisée afin de définir les relations. Souvent l'interprétation par l'utilisateur final ne rend pas bien compte de toutes les possibilités de relations. Il a tendance à regrouper des distinctions ou, au contraire, à plus en différencier d'autres. Si on considère l'exemple du modèle des 9-intersections, toutes les situations de la Figure VIII-2 sont décrites par une même interprétation. Pour beaucoup d'utilisateurs cependant, s'ils ne sont pas avertis du type de géométrie qui sous-tend le formalisme, ils auront tendance à vouloir différencier ces exemples.

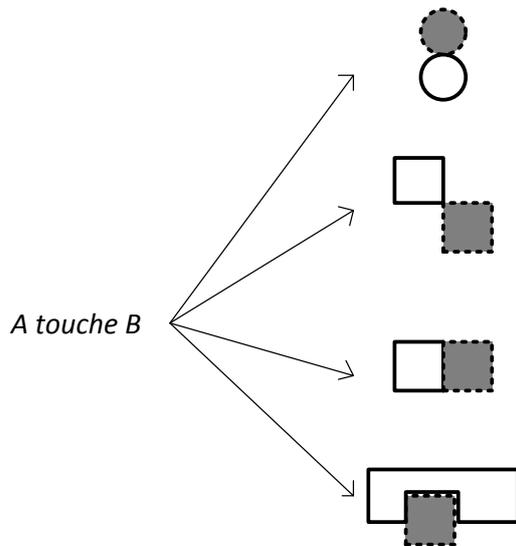


Figure VIII-2 La figure montre quatre exemples de relations spatiales ayant la même interprétation en langage naturel par rapport au modèle des 9-i. L'utilisateur final aura cependant tendance à différencier certains de ces exemples estimant qu'il ne s'agit pas de mêmes relations. Cet exemple montre l'importance de la compréhension de la géométrie qui sous-tend le modèle décrit. La frontière du second objet est volontairement représentée de façon pointillée afin de la rendre plus visible.

L'analyse de l'interprétation en langage naturel de relations ou de prépositions spatiales passe également par l'étude statistique sur des utilisateurs formés ou pas aux modèles de raisonnements qualitatifs (Mark and Egenhofer 1994; Lawson, Van Der Zee et al. 2009). De cette manière, il est possible d'étudier la corrélation statistique établie entre une interprétation et une représentation spatiale. Cette méthode, bien qu'utile pour la création de systèmes intelligents interprétant au maximum l'information afin de fournir à l'utilisateur un résultat textuel, n'est pas toujours suivie dans le cadre de développements qualitatifs. En effet, le développement d'un raisonnement spatio-temporel contraint par la compréhension directe d'un utilisateur final sans formation empêcherait le développement de relations intéressantes. Dans ce cas, il ne serait pas envisageable de développer des modèles tels le QTC ou le modèle de trajectoires relatives. Nous monterons également par la suite que l'interprétation présentée des relations généralisées par le formalisme topologique n'est pas directement exploitable par un utilisateur final. La fin de la présentation de ces relations effectue une critique des solutions proposées. Notons que l'interprétation est systématiquement plus explicite lorsqu'elle est appliquée à un domaine particulier.

La seconde possibilité d'interprétation du formalisme topologique a été proposée par Clementini (Clementini, Di Felice et al. 1993). Cette méthode décortique les intersections topologiques de la matrice d'intersection afin de rechercher quel niveau de spécialisation est

nécessaire pour proposer une interprétation. La Figure VIII-3 représente l'arbre de décision d'interprétation réalisé. La seconde méthode d'interprétation que nous développons par la suite est basée sur ce principe.

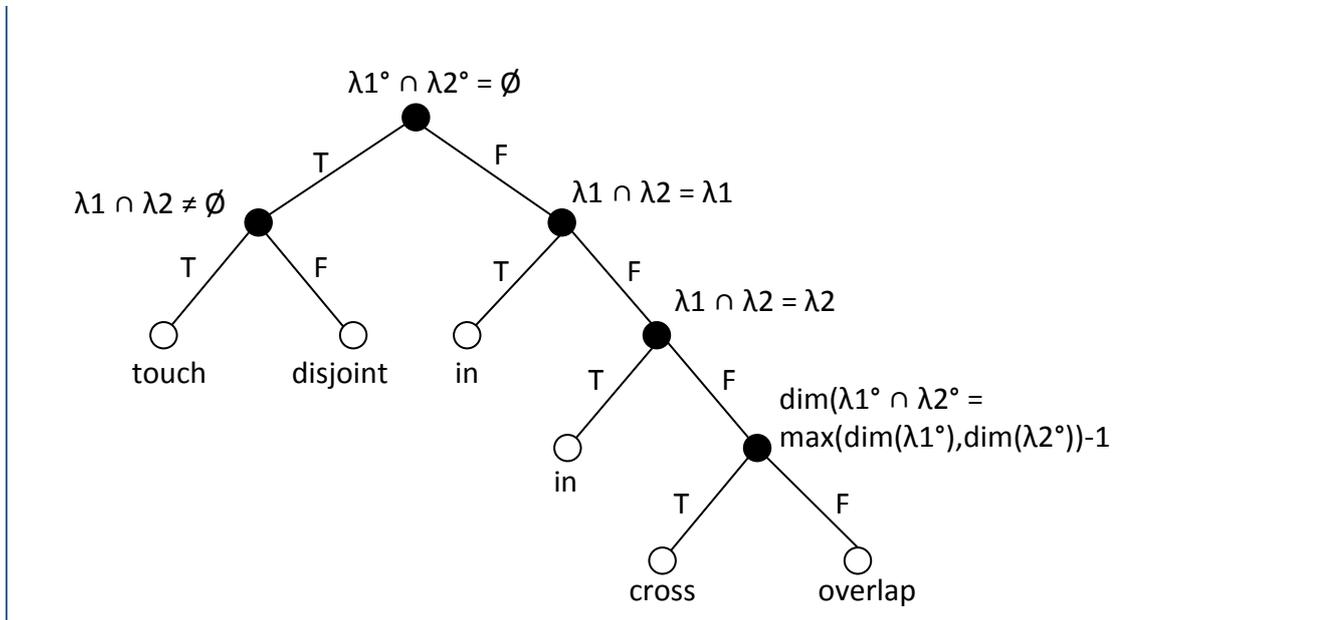


Figure VIII-3 Arbre de décision de l'interprétation des relations topologiques. Cet arbre de décision permet d'identifier des interprétations sans nécessairement analyser l'ensemble des intersections topologiques entre deux objets. La figure est issue de Clementini (Clementini, Di Felice et al. 1993).

B. Interprétation en milieu spatio-temporel

L'interprétation de relations dans un milieu spatio-temporel se heurte à une difficulté supplémentaire qui est la représentation des phénomènes. Comme discuté dans le Chapitre VI.2.A, la représentation de phénomènes dynamiques passe par une symbolisation faisant déjà elle-même l'objet de discussions. La représentation d'une relation spatiale de contact est sensiblement la même lorsque l'on représente l'information en 2D ou en 3D. Cette représentation du mouvement, si on veut la confronter à un utilisateur final, nécessite une phase de formation à la représentation utilisée. Bien que la trace temporelle d'un objet en mouvement soit souvent admise comme représentation, la conceptualisation, par exemple d'une ligne en mouvement, ou d'un point en mouvement dans un espace tridimensionnel, reste complexe pour ceux-ci. L'interprétation que nous proposons doit être réalisée avec la connaissance des notions de relations topologiques, de matrices d'intersections topologiques et, finalement, avec une bonne perception des représentations en espaces temporels identitaires.

2. Relations spatio-temporelles généralisées

L'interprétation des 25 relations spatio-temporelles généralisées est proposée ci-dessous. Comme nous l'avons exprimé lors de la généralisation des configurations de vie et de mouvement, le regroupement de plusieurs configurations en une seule relation conduit à une perte d'information ou à un groupement de certaines interprétations. Nous pensons que l'utilisateur final n'a pas systématiquement besoin d'une interprétation fine de l'évolution spatio-temporelle de la relation de deux objets. En première approche, une interprétation de relations plus générale permet à cet utilisateur de sélectionner ou de se focaliser sur un phénomène précis afin de vérifier qu'il est présent ou pas dans son jeu de données et, alors, d'aborder une interprétation plus complexe ou un modèle de raisonnement spatio-temporel plus détaillé. L'interprétation que nous faisons des 25 relations spatio-temporelles généralisées utilise volontairement des termes généraux indépendants d'applications. Le choix de certaines expressions doit être vu de façon tout à fait a-contextuelle, comme par exemple la « génération ».

A. Interprétation des 25 relations spatio-temporelles généralisées

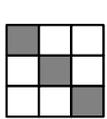
L'interprétation des relations spatio-temporelles généralisées se base sur une analyse topologique des relations entre histoires spatio-temporelles. Dans ce cadre, trois parties des histoires spatio-temporelles nous intéressent. Premièrement, l'intérieur des histoires spatio-temporelles qui représentent la phase de présence d'un objet en évolution. Cette partie peut alors être en intersection avec toutes les autres parties du second objet. Deuxièmement, les frontières topologiques de l'histoire spatio-temporelle représentent à la fois la transition vers un état de présence et la transition depuis un état de présence. Comme expliqué au chapitre précédent, la distinction entre le commencement de la phase de présence et la fin ne peut se faire dans le cadre d'une analyse sous-tendue par une géométrie topologique (Chapitre VII.2.B). Il s'agit là d'une des principales pertes d'information liée à la généralisation par un tel modèle. L'utilisation d'un modèle comme le 9i+ permet quant à lui de différencier ces deux frontières et finalement aide à fournir une interprétation rendant compte de cette différence entre le début et la fin de phase de présence. La troisième partie d'histoire spatio-temporelle que nous utiliserons implicitement est son extérieur. Cette partie représente l'ensemble des positions spatiales et temporelles où l'objet n'a pas été présent. Lorsqu'un objet se déplace, il n'occupe qu'une seule position spatiale par instant. La relation entre l'extérieur d'un objet avec un autre indique donc que ces objets ne sont pas en contact. Comme nous l'avons montré, une représentation de l'évolution d'objets par leur projection dans un espace spatial peut conduire à une mauvaise interprétation des relations ; un contact peut sembler exister alors que les objets sont bien passés à la même position spatiale mais pas à la même position temporelle (Chapitre VII.3.B).

Pour chacune des 25 relations, nous proposons une interprétation en utilisant les trois propriétés précédentes. L'interprétation est également exclusive. C'est-à-dire que, si on ne

décrit pas une situation entre deux histoires spatio-temporelles, c'est qu'elle ne se produit pas. Par exemple, si on n'exprime pas le fait que deux objets se rencontrent durant leur phase de présence, c'est qu'ils ne s'y rencontrent pas. Rappelons enfin que la relation représentée est une des interprétations possibles des histoires spatio-temporelles. La relation reste valable pour toute transformation topologique sur celles-ci.

- Relation 1 : Égalité totale

Cette relation exprime le fait que les objets A et B partagent l'ensemble de leur phase de présence. L'interprétation est alors : « *L'objet A et l'objet B partagent l'ensemble de leur phase de présence* ».



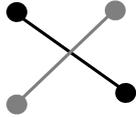
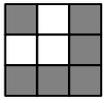
L'objet A et l'objet B
partagent l'ensemble de leur phase de présence

Figure VIII-4 Relation spatio-temporelle identitaire généralisée d'égalité totale. L'objet A et l'objet B partagent l'ensemble de leur présence dans cette relation. La figure exprime également la matrice d'intersection topologique de la relation entre histoires spatio-temporelles.

Ce type de relation exprime le cas de deux objets étant systématiquement à la même position spatio-temporelle. Il peut notamment s'agir de relations spatio-temporelles entre un constituant et un tout. Chaque partie possède son identité mais les deux objets possèdent la même position spatio-temporelle durant toute l'observation. Cette relation représente par exemple l'évolution d'une pièce de deux euros et de la partie de métal constituant cette même pièce.

- Relation 2 : Rencontre spatio-temporelle

Cette relation représente une rencontre entre deux objets durant leur phase de présence. Le croisement entre les deux intérieurs montre que les objets se sont situés au moins une fois durant leur évolution à la même position spatiale et temporelle. Les objets ont par ailleurs continué à être présents après cette rencontre. L'interprétation est alors : « *L'objet A et l'objet B se rencontrent durant leur phase de présence* ».



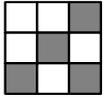
L'objet A et l'objet B
se rencontrent durant leur phase de présence.

Figure VIII-5 Relation spatio-temporelle identitaire généralisée de rencontre spatio-temporelle. L'objet A et l'objet B ont une rencontre spatio-temporelle durant leur présence. La figure exprime également la matrice d'intersection topologique de la relation entre histoires spatio-temporelles.

Cette relation exprime toutes les rencontres que deux objets peuvent avoir durant leur évolution. Dans le cadre d'une application d'épidémiologie par exemple, la recherche d'individus étant en contact avec un autre peut être trouvée via cette relation. Par la suite, il est alors possible de détailler si le contact a eu une durée suffisante pour qu'une contamination ait eu lieu. Notons que le modèle d'égalité que nous proposons de considérer tient compte d'une certaine distance topologique entre les deux objets car il est rare que deux objets soient exactement à la même position spatiale. Dans l'exemple de la transmission d'une maladie, un seuil de distance suffit à considérer les objets comme étant en position égalitaire.

- Relation 3 : Rencontre de début et de fin de présence

La relation 3 exprime le fait que les deux objets ont débuté et terminé leur état de présence à la même position spatiale et temporelle. Bien que l'interprétation ne l'exprime pas de manière explicite, cette relation indique également le fait que les objets ne se sont pas rencontrés d'une autre manière. L'interprétation en langage naturel d'une telle relation peut être réalisée de deux façons. Soit en exprimant uniquement l'information explicite : « *L'objet A et l'objet B débutent et terminent leur phase d'existence ensemble* ». Soit en exprimant également l'information implicite de leur non-rencontre durant leur phase de présence. L'expression devient alors : « *L'objet A et l'objet B débutent uniquement et terminent uniquement leur phase de présence ensemble* ». Afin de rester cohérent vis-à-vis de nos définitions futures, nous préférons la formulation reprenant uniquement l'information représentée explicitement par la relation.



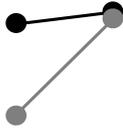
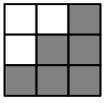
L'objet A et B débutent et terminent leur phase de présence ensemble.

Figure VIII-6 Relation spatio-temporelle identitaire généralisée de début et de fin de présence commune. L'objet A et l'objet B ne se rencontrent qu'au moment du début et de la fin de leur phase de présence. La figure exprime également la matrice d'intersection topologique de la relation entre histoires spatio-temporelles.

Cette relation représente par exemple le démontage d'une grue de chantier afin de la transporter. Du moment où l'engin est démonté, chacun de ses constituants acquiert une nouvelle identité. Le déplacement des pièces peut se faire via des moyens de transport différents qui n'entrent pas en rencontre spatio-temporelle. Le remontage de la grue conduit à la fin de l'identité de ses constituants lors de leur rencontre afin d'attribuer une nouvelle identité à l'engin de chantier (notons que dans le cadre strict de notre modélisation, on peut considérer l'état de la grue comme étant absent durant sa phase de transport).

- Relation 4 : Début ou fin de présence commune

Cette relation possède une interprétation semblable au cas précédent si ce n'est que le « et » doit être remplacé par un « ou » exclusif. En effet, cette situation décrit le cas de deux objets qui n'entrent en contact qu'au moment de leur début ou de fin de phase de présence. La condition est exclusive sans quoi on se reporte alors au cas précédent. L'interprétation de cette relation est : « *L'objet A et l'objet B se rencontrent à leur début ou à leur fin de phase de présence* ». De la même manière que précédemment, une formulation prenant en compte l'information implicite pourrait être : « *L'objet A et l'objet B se rencontrent uniquement que à leur début de phase de présence ou uniquement à la fin de leur phase de présence* ». La seconde formulation exprime alors l'exclusivité du « ou » et la non-rencontre durant leur phase d'existence.



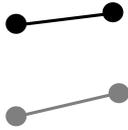
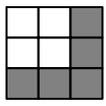
L'objet A et l'objet B se rencontrent à leur début ou à leur fin de phase de présence.

Figure VIII-7 Relation spatio-temporelle identitaire généralisée de début ou (exclusif) de fin de présence commune. L'objet A et l'objet B ne se rencontrent qu'au moment du début ou qu'au moment de la fin de leur phase de présence. La figure exprime également la matrice d'intersection topologique de la relation entre histoires spatio-temporelles.

De nombreuses situations spatiales correspondent à cet exemple. Toutes les situations où les objets se détruisent mutuellement à leur rencontre par exemple. Le cas d'un missile détruisant un véhicule correspond à cette relation. De la même manière, le cas de deux objets se créant au même instant et au même endroit peut être exprimé par cette relation. L'incertitude quant au fait de savoir si les objets se rencontrent à l'instant de leur apparition ou de leur disparition peut être levée en utilisant un autre modèle de généralisation des configurations spatio-temporelles. Comme expliqué au chapitre précédent, la généralisation utilisant un modèle topologique simple induit une perte d'information quant à l'évolution des objets étudiés. L'utilisation d'un modèle tel le modèle du « D-line segment » ou son équivalent formel le CBM pourrait résoudre cette incertitude. Dans ce cas, les segments étant dirigés, il serait alors possible de distinguer 4 situations : l'objet A apparaît lorsque l'objet B apparaît, l'objet A apparaît lorsque l'objet B disparaît, l'objet A disparaît lorsque l'objet B apparaît, l'objet A disparaît lorsque l'objet B disparaît.

- Relation 5 : Relation d'évitement

Cette relation décrit le cas où les deux objets ne se rencontrent jamais d'un point de vue spatio-temporel. La non-rencontre spatio-temporelle indique que les objets ne sont jamais au même endroit et ce au même moment. Rien n'empêche cependant un objet d'occuper la même position que l'autre du moment qu'il ne l'occupe pas au même instant. On peut alors formuler que si l'objet A occupe la même position que l'objet B, alors il ne l'occupe pas au même instant et vice-versa. La description en langage naturel de cette relation peut être : « *L'objet A et l'objet B ne se rencontrent pas* ». Cette relation pourrait être qualifiée de relation d'évitement, à comprendre dans le sens de non-rencontre, pas dans le sens où un objet chercherait volontairement à fuir un autre.



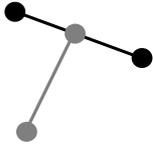
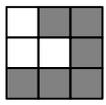
L'objet A et l'objet B ne se rencontrent pas.

Figure VIII-8 Relation spatio-temporelle identitaire généralisée d'évitement. L'objet A et l'objet B ne se rencontrent jamais durant leur existence. Même s'ils sont à la même position spatiale, alors ils n'y sont pas à la même position temporelle et vice versa. La figure exprime également la matrice d'intersection topologique de la relation entre histoires spatio-temporelles.

Il existe également de nombreux exemples de cette relation. On peut même pressentir que la majeure partie des relations spatio-temporelles entre deux objets dans certains cadres d'analyse seront de ce type. Notons que cette relation permet de sélectionner tous les cas où un formalisme d'étude spatio-temporelle, ne considérant que des objets disjoints, peut être appliqué. Si l'on s'en réfère au QTC par exemple, il ne peut théoriquement être appliqué qu'à des objets disjoints. L'application d'un QTC pourrait néanmoins être réalisée sur toutes les phases de coprésence disjonctive des deux objets.

- Relation 6 : Relation de capture/génération d'un objet

La relation de capture semble interprétable de façon claire pour un utilisateur final. Il s'agit des cas où un objet termine sa phase de présence durant la phase de présence d'un autre. De même, la relation de génération est à interpréter de façon identique hormis que le premier objet débute sa phase de présence au lieu de la terminer durant la phase de présence du second. A nouveau, la distinction entre les deux solutions n'est pas possible via un formalisme de généralisation topologique. L'étude de segments dirigés permettrait également de visualiser la différence. Notons cependant qu'une analyse temporelle permettrait de réaliser aisément la distinction. Une autre solution serait encore de directement analyser la configuration de vie et de mouvement à l'origine de cette généralisation. L'interprétation proposée est « *L'objet B apparaît ou disparaît en rencontre avec la phase de présence de l'objet A* ».



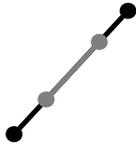
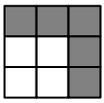
L'objet B débute ou termine sa phase de présence en rencontre avec la phase de présence de l'objet A.

Figure VIII-9 Relation spatio-temporelle identitaire généralisée de génération/capture. Cette relation décrit le cas où un objet est généré ou capturé par un autre durant sa phase de présence. La différenciation entre les deux possibilités n'est pas possible du point de vue d'une analyse purement topologique des histoires spatio-temporelles. La figure exprime également la matrice d'intersection topologique de la relation entre histoires spatio-temporelles.

L'exemple d'une mère accouchant d'un enfant est une image simple à concevoir afin de présenter cet exemple. La relation de capture quant à elle peut être facilement vue comme une proie capturée par un prédateur. Nous verrons par la suite que ce type de relation peut être mieux interprété par l'utilisation de propriétés topologiques simples.

- Relation 7 : Relation d'inclusion totale stricte

La relation décrite ici exprime qu'un objet B possède une phase complète de présence, soit son apparition, sa présence et sa disparition durant la présence de l'objet A. C'est en quelque sorte une relation de contenance ou d'inclusion pour laquelle deux restrictions supplémentaires sont définies. Premièrement, l'inclusion est totale, cela signifie que l'objet B ne peut avoir un instant où il n'est pas exactement spatialement et temporellement à la même position que l'objet A. Ensuite, l'inclusion est stricte, cela rend compte du fait que l'objet B ne peut pas être présent jusqu'à la disparition de l'objet A ou apparaître en même temps que l'objet A. On peut constater que cette description inclut en quelque sorte une condition négative introduite par la relation 3 où les objets débutent et terminent leur présence au même endroit spatial et temporel. L'interprétation en langage naturel est donc : « *L'évolution de l'objet B est totalement et strictement incluse dans la phase de présence de l'objet A* ».



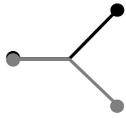
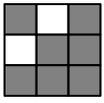
Toute la phase de présence de l'objet B est strictement incluse dans celle de l'objet A.

Figure VIII-10 Interprétation de la relation spatio-temporelle identitaire généralisée d'inclusion totale stricte. L'objet B est totalement inclus durant la phase de présence de l'objet A. De plus, ils n'apparaissent ou ne disparaissent pas ensemble. L'interprétation représente également la matrice d'intersection topologique de la relation.

La généralisation d'histoires spatio-temporelles cohérentes fournira toujours le schéma de transition suivant : apparition de l'objet A, présence de l'objet A, apparition de l'objet B en rencontre avec l'objet A, coprésence des deux objets, disparition de l'objet B en rencontre avec l'objet A, présence de l'objet A, disparition de l'objet A. En effet, la succession temporelle impose cet ordre. L'inversion des instants d'apparition et de disparition induirait un retour dans le passé. L'exemple d'une telle relation est par exemple l'apparition d'une maladie dans un individu qu'il maîtrise finalement. D'un point de vue moins spatial, on peut voir cette relation comme l'acquisition d'une capacité temporaire pour un objet. Prenons le cas d'un ordinateur qui temporairement reçoit la capacité de connexion à un serveur. L'identité de cette capacité vient donc se greffer temporairement sur l'identité de l'ordinateur.

- Relation 8 : Relation d'apparition / disparition et de rencontre

Cette relation propose deux objets qui soit apparaissent ensemble, soit disparaissent ensemble tout en partageant également une partie de leur coprésence. La représentation suivante n'indique pas que la partie de coprésence est directement successive à l'apparition ou la disparition. A nouveau, cette relation peut être vue comme la combinaison de deux relations précédentes. Il s'agit à la fois des propriétés de la relation 4 et de la relation 2. Nous qualifions cette relation d'apparition/disparition et de rencontre pour signifier le cumul des deux relations précédentes. L'interprétation de cette relation est : « *L'objet A et l'objet B partagent leur apparition ou leur disparition et une partie de leur présence* ».



L'objet A et l'objet B partagent leur apparition ou leur disparition et une partie de leur présence.

Figure VIII-11 Interprétation en langage naturel de la relation spatio-temporelle identitaire généralisée d'apparition disparition rencontre. Cette relation représente tous les objets possédant à la fois les propriétés de la relation 2 et de la relation 4. La matrice d'intersection topologique est également représentée dans l'interprétation.

Un exemple de l'apparition commune de cette interprétation est par exemple la vie de jumeaux. Ils débutent leur présence au même moment et au même endroit, se rencontrent par la suite de leur évolution et ne la terminent pas au même endroit. On peut également décrire par cette relation la division d'un objet afin d'en créer deux autres. Un exemple amusant serait la division d'une tarte en deux parties. En effet, à considérer que les constituants de la tarte (ses deux parties) sont déjà identifiées lors de la fabrication de la tarte, elles restent à la même position spatiale et temporelle jusqu'au service. D'un point de vue plus philosophique, l'interprétation de cette relation peut également décrire l'évolution de deux personnes se mariant. Dans un espace conceptuel de relations, leur phase de présence débute au moment de leur naissance, ils se rencontrent par la suite et terminent leur présence ensemble. La fin de l'existence d'un couple ne se produit pas, bien sûr, systématiquement au même endroit et au même instant.

- Relation 9 : Relation de filiation

La relation suivante est décrite comme une relation de filiation (dans le sens héréditaire du terme). En effet, cette relation décrit à la fois la génération d'un objet B par un objet A, la rencontre de ceux-ci et leur rencontre à la disparition de l'objet A. L'image d'un enfant qui durant sa phase de présence rencontre un parent et assiste à sa disparition est donc proche de cette description. L'interprétation inverse peut également être donnée de cette relation. L'objet B peut alors générer l'objet A, le rencontrer et assister à sa disparition. La configuration spatiale de cette relation ne permet pas d'envisager d'autres possibilités d'interprétation, l'information généralisée étant cohérente d'un point de vue spatio-temporel. L'interprétation de cette relation est donc : « *L'objet A génère l'objet B et le rencontre ; l'objet B rencontre l'objet A à sa disparition, et vice-versa* ».

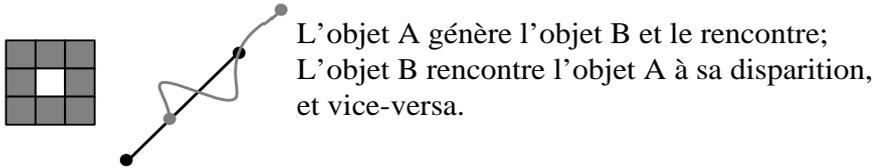


Figure VIII-12 Interprétation en langage naturel de la relation spatio-temporelle identitaire généralisée de filiation. Cette relation décrit la génération d'un objet B par un objet A, leur rencontre et la rencontre de l'objet B avec l'objet A lors de sa disparition. Le corollaire est également valable.

L'interprétation des relations spatio-temporelles identitaires devient assez complexe et fait souvent intervenir une combinaison de descriptions de relations préalablement définies. Des exemples peuvent cependant toujours être trouvés afin de présenter ces relations. La compréhension de ces situations par un utilisateur final ne peut cependant pas être parfaite.

- Relation 10 : Relation de fidélité

La relation interprétée ici n'a pas de corollaire, c'est-à-dire que l'inversion des objets A et B donne la même interprétation. La relation décrit deux objets qui apparaissent, se rencontrent et disparaissent à la même position spatiale et temporelle. Cette similitude nous conduit à qualifier cette relation de relation de fidélité. L'interprétation de cette relation est : « *Les objets A et B apparaissent, se rencontrent et disparaissent ensemble* ». A nouveau la description de cette relation n'inclut pas d'information implicite comme le fait que les objets ne sont pas à la même position spatiale et temporelle durant toute leur existence, comme cela serait le cas avec la relation d'égalité.

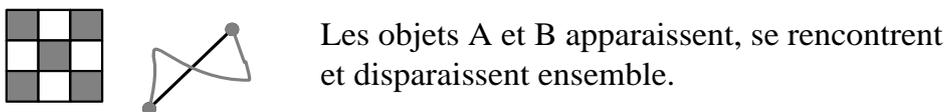


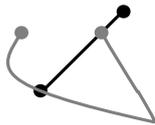
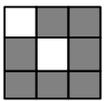
Figure VIII-13 Interprétation en langage naturel de la relation spatio-temporelle identitaire de fidélité. Les objets A et B partagent leur apparition, de leur présence et leur disparition. La matrice d'intersection topologique est également représentée.

Cette relation peut par exemple interpréter le suivi de deux personnes covoiturant et travaillant sur un même site. D'un point de vue du modèle des relations spatio-temporelles identitaires, le jeu de fonctions de présence définit uniquement le site de travail comme espace de travail. Les deux personnes apparaissent ensemble sur leur site de travail, se

rencontrent durant la journée et quittent le site ensemble. D'autres exemples peuvent être proposés en combinant les descriptions des relations 2 et 3.

- Relation 11 : Relation de suivi

La relation de suivi qualifie un objet A qui, durant sa phase de présence, « génère » un objet B. L'objet B rencontre l'objet A pendant sa disparition. Les deux objets ne se rencontrent pas hormis ces deux instants. Le corollaire de cette description est également valable. Ce type de relation ne possède pas de relation inverse. En effet, la description est valable tant pour l'objet A que pour l'objet B. L'analyse de la symétrie diagonale de la matrice d'intersection topologique nous renseigne sur le fait qu'il y ait ou pas une relation inverse. Si la matrice est symétrique selon la première diagonale, alors il n'y a pas d'inverse, sinon elle possède une relation inverse d'un point de vue des objets A et B.



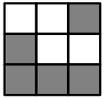
L'objet A génère l'objet B qui le rencontre à sa disparition et vice-versa.

Figure VIII-14 Description en langage naturel de la relation spatio-temporelle identitaire généralisée de suivi. Dans cette relation l'objet A génère l'objet B qui le rencontre à sa disparition et vice versa. Cette relation n'admet pas d'inverse car la matrice d'intersection topologique la décrivant est symétrique par rapport à sa première diagonale.

Nous interprétons cette relation comme un suivi. En effet, l'objet généré revient afin de suivre une des phases d'évolution de l'objet mère. Ainsi il le rencontre durant sa disparition.

- Relation 12 : Relation de curiosité

Nous qualifions cette relation comme un phénomène de curiosité. En effet, cette relation décrit un objet à la fois présent à l'apparition et à la disparition d'un autre. Un exemple d'une telle relation serait par exemple une personne assistant à la construction et à la destruction d'un immeuble. L'interprétation de cette relation est : « *L'objet A rencontre l'objet B à son apparition et à sa disparition* ».



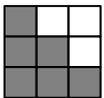
L'objet A rencontre l'objet B à son apparition et à sa disparition.

Figure VIII-15 Interprétation de la relation spatio-temporelle identitaire généralisée de curiosité. Cette relation décrit un objet présent à l'apparition et à la disparition d'un autre.

Comme chaque fois, la description ne considère que l'information explicite. Cette relation interdit notamment d'avoir une rencontre entre les deux objets durant leur coprésence.

- Relation 13 : Relation de correspondance temporelle partielle

Cette situation décrit le cas où un objet correspond tout à fait à un autre pendant toute sa phase de présence (ils apparaissent ou disparaissent ensemble) avec en plus le fait que le second objet a une phase de présence plus courte temporellement que le premier. De plus, il est implicitement établi que les objets sont tout le temps en rencontre spatio-temporelle. L'interprétation en langage naturel de cette relation est : « *L'objet A correspond totalement à l'objet B, de l'apparition de celui-ci jusqu'à ce qu'il disparaisse à la même position spatio-temporelle que l'objet A* ». Le fait de correspondre totalement doit être vu comme une égalité parfaite. Si un objet apparaît, alors l'autre apparaît également au même instant et à la même position spatiale. Comme l'objet B correspond totalement jusqu'à ce qu'il disparaisse, la différence entre cette relation et la relation d'égalité totale est établie.



L'objet A correspond totalement à l'objet B, de l'apparition jusqu'à la disparition de celui-ci.

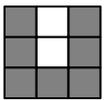
Figure VIII-16 Interprétation de la relation spatio-temporelle identitaire généralisée d'égalité temporelle partielle. Dans cette relation, l'objet B égale l'objet A de son apparition jusqu'avant sa disparition en rencontre avec la présence de l'objet A. L'inverse est également valable, l'objet B égale l'objet A de sa phase de présence jusqu'à leur disparition commune.

Cette relation décrit par exemple un objet qui possède une propriété lors de sa génération et qui la perd par la suite. L'identité de cette propriété est spatialement et temporellement liée à l'objet lui-même jusqu'à ce qu'elle disparaisse. De la même manière, on

peut voir cette relation comme une maladie fatale pour un patient. En effet, celui-ci contracte la maladie durant sa phase de présence et la possède jusqu'à sa disparition.

- Relation 14 : Relation de filiation temporaire / préméditation

Cette situation décrit une relation de filiation temporaire ou une relation de préméditation. En effet, comme la relation de filiation, l'objet B est généré par l'objet A. Cependant, au lieu de le rencontrer à la disparition de l'objet A, ils se rencontrent durant leur coprésence. L'interprétation de cette relation est par exemple : « *L'objet A génère l'objet B et le rencontre par la suite* ». L'inverse de cette propriété est décrite par deux objets A et B qui se rencontrent puis dont l'objet B termine sa phase de présence durant celle de l'objet A. L'interprétation devient alors dans ce cas : « *L'objet A rencontre l'objet B puis le fait disparaître* ». Nous qualifions cette relation de préméditation. En effet, avant de mettre fin à la présence de l'objet B, l'objet A l'a préalablement rencontré.



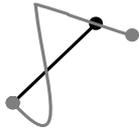
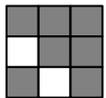
L'objet A génère l'objet B et le rencontre par la suite ou l'objet A prémédite la disparition de l'objet B.

Figure VIII-17 L'interprétation en langage naturel de la relation spatio-temporelle identitaire de préméditation / filiation temporaire. En fonction du sens de lecture des histoires spatio-temporelles généralisées, on obtient une programmation de la disparition de l'objet B par une rencontre préalable. Dans le cas d'une filiation partielle, l'objet A génère l'objet B et le rencontre par la suite.

La situation de la préméditation peut être d'autant plus justifiée que la rencontre spatio-temporelle aura toujours lieu préalablement à la disparition de l'objet B. Dans un cadre de représentation purement spatial, rien n'empêche d'avoir une relation de contact entre les intérieurs des objets A et B avant et après le point de rencontre entre la frontière de B avec A. Cependant, dans un contexte spatio-temporel, le fait d'avoir un point de rencontre après le point de rencontre entre la fin de la présence de B avec la présence de A impliquerait un retour dans le passé, ce qui n'est pas possible. On voit donc par cet exemple que l'analyse des histoires spatio-temporelles peut également conduire à l'étude de la morphologie propre de celles-ci dans un espace temporel. Comme nous l'avons énoncé, la géométrie topologique utilisée comme base de généralisation laisse une partie de l'information de côté.

- Relation 15 : Relation de suivi total

Nous interprétons cette relation comme un suivi total car les propriétés de rencontre entre les objets A et B sont identiques à la relation 11 de suivi avec le fait supplémentaire que les objets se rencontrent également durant leur existence. De ce fait, l'interprétation en langage naturel devient : « *L'objet A génère l'objet B qui le rencontre durant leur coprésence et à sa disparition et vice-versa* ».



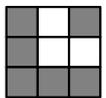
L'objet A génère l'objet B qui le rencontre durant leur coprésence; à sa disparition et vice-versa.

Figure VIII-18 Interprétation en langage naturel de la relation de suivi total. Cette relation est conceptuellement proche de la relation 11 de suivi. En plus de partager une apparition et une disparition, les objets se rencontrent et l'objet B assiste à la disparition de l'objet A.

Cette relation peut également être conçue comme la combinaison de la relation 11 de suivit avec la relation 2 de rencontre spatio-temporelle.

- Relation 16 : Relation de curiosité totale

De la même manière que la relation de suivi devient, conceptuellement parlant, la relation de suivi total par l'ajout d'une rencontre spatio-temporelle pendant la phase de coprésence des deux objets, la relation de curiosité devient la relation de curiosité totale par l'ajout d'une rencontre spatio-temporelle entre l'objet A et l'objet B. L'interprétation devient alors : « *L'objet A assiste à l'apparition, la rencontre et la disparition de l'objet B* ».



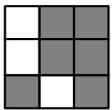
L'objet A assiste à l'apparition, rencontre et assiste à la disparition de l'objet B.

Figure VIII-19 Interprétation en langage naturel de la relation spatio-temporelle identitaire généralisée de curiosité totale. Dans cette situation l'objet A assiste à l'apparition, la rencontre et la disparition de l'objet B.

L'exemple précédent convient également à la description de cette relation. La situation d'une personne assistant à l'apparition, la vie et la disparition d'un immeuble peut être décrite par cette relation. Cette relation est alors vue comme l'addition de la relation 2 et 12.

- Relation 17 : Relation d'apparition ou de disparition commune et de disparition de l'objet A durant la phase de présence de l'objet B.

De la même manière que la relation 11 de suivi total décrit la rencontre suivie de l'objet A et de l'objet B, cette relation décrit la rencontre entre l'objet A et l'objet B à l'instant de leur apparition ou de leur disparition. Par la suite, l'objet A apparaît ou disparaît durant la phase de présence de l'objet B.



L'objet A et l'objet B partagent leur apparition ou disparition. L'objet A apparaît ou disparaît pendant la phase de présence de l'objet B.

Figure VIII-20 Interprétation en langage naturel de la relation spatio-temporelle identitaire d'apparition ou de disparition commune des objets A et B. L'objet A disparaît durant la phase de présence de l'objet B.

- Les relations 18 à 25 sont des relations inverses de celles déjà décrites. La figure suivante représente la représentation de ces relations inverses en parallèle de la relation de base. La description de ces relations est identique aux relations de base avec une simple inversion des objets A et B.

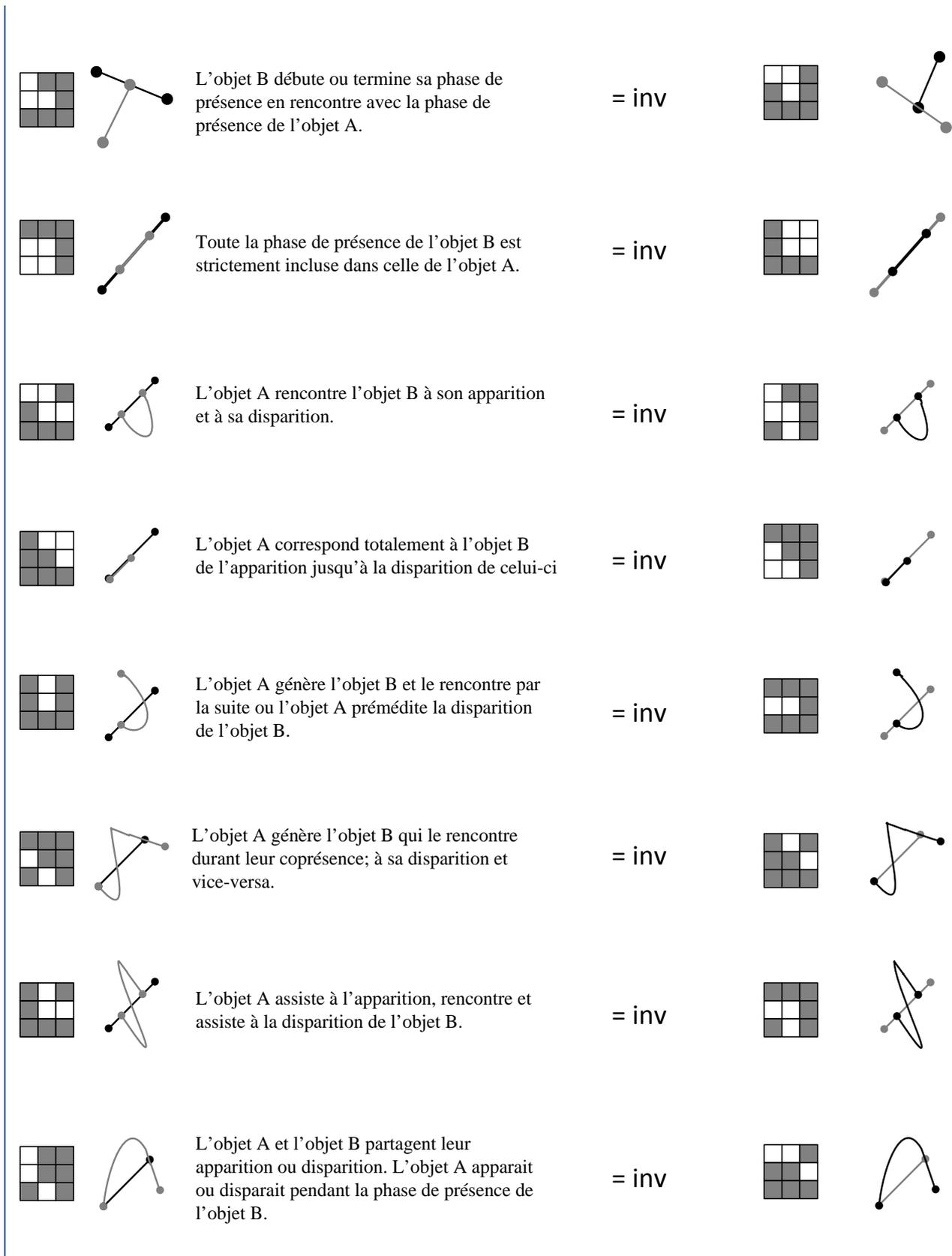


Figure VIII-21 Représentation des relations inverses interprétées en langage naturel. L'interprétation de ces relations spatio-temporelles identitaires généralisées se fait un inversant les objets A et B.

B. Remarques quant à l'interprétation

La description en langage naturel que nous venons de réaliser amène à se poser plusieurs questions. Comme on peut le constater, la description en langage naturel de ces 25 relations n'est pas toujours aisée. L'objectif de trouver une description univoque, claire et la plus courte possible de chaque relation n'est pas réellement abouti. A tout le moins le résultat n'est pas comparable à la simplicité de description des 8 relations du modèle des 9-intersections.

Notre analyse de ces difficultés d'interprétation nous conduit à quatre constats ; Premièrement, l'interprétation des 25 relations spatio-temporelles généralisées conduit à beaucoup de répétitions. Bien que chaque description soit univoque par rapport à la relation qu'elle décrit, l'utilisation directe d'une telle interprétation est souhaitable surtout dans un contexte d'utilisation spatio-temporel où la perception du mouvement nécessite déjà une réflexion avancée de la part de l'utilisateur final.

Ensuite, comme on peut le remarquer, la description des relations en langage naturel des relations répète régulièrement des termes interprétés tels que « l'objet A rencontre l'objet B », « l'objet A et l'objet B apparaissent ou disparaissent à la même position spatiale et temporelle ». Cette répétition est en fait due à des similarités matricielles dans la matrice d'intersection topologique. Chaque fois que l'on retrouve ces similarités dans la matrice d'intersection d'une relation, son interprétation sera semblable ou à tout le moins fort proche.

De plus, nous remarquons également que, comme précisé plus haut, la description de certaines relations est en fait la composition de descriptions de relations plus simples à interpréter visuellement comme la relation de rencontre, la relation d'égalité, etc. Une relation complexe à interpréter pourrait alors être vue comme la somme de propriétés simples en posant une question binaire pour chacune de celles-ci. Par exemple, une des interrogations pourrait être : est-ce que les deux objets se rencontrent ou pas durant leur phase de coprésence, etc.

Enfin, la description de toute l'information implicite contenue dans les relations spatio-temporelles généralisées conduirait à des descriptions en langage naturel fort lourdes et inutilisables par un utilisateur final. Seule une bonne compréhension de la liaison entre toutes les valeurs de la matrice d'intersection et l'interprétation en langage naturel permet de connaître exactement l'information implicite. Par ailleurs, le choix d'une des 25 relations comme base de recherche à une requête spatio-temporelle est délicat. En effet, la recherche de certains phénomènes serait trop restrictive et ne rendrait pas compte de toutes les situations possibles. Des modèles comme le QTC ne s'appliquent pas qu'à la relation de début ou de fin de présence commune mais bien à toutes les relations dans lesquelles les deux objets ont une phase de disjonction.

Tous ces constats nous amènent à penser une interprétation en langage naturel de l'information spatio-temporelle plus claire et plus directe pour l'utilisateur final. L'idée qui

sous-tend la suite de notre recherche est donc de proposer, cette fois, sur base de prépositions spatio-temporelles :

- une correspondance topologique permettant de réaliser la requête.
- une méthode d'interprétation qui n'admet pas ou très peu d'informations implicites dans les relations. Ainsi l'utilisateur ne se verrait pas masquer une partie de l'information sans réellement le vouloir.
- une interprétation additive ou qui soit organisable en arbre de décision.
- une méthode qui devrait permettre de sélectionner plusieurs interprétations compatibles entre elles afin d'obtenir une recherche détaillée sur base de fonctions explicitées simplement en langage naturel.

3. Interprétation de configurations matricielles

L'interprétation de configurations matricielles particulières vise en fait à rechercher parmi toutes les relations spatio-temporelles généralisées lesquelles répondent à la condition exprimée par la configuration matricielle. De cette manière, l'interprétation ne se situe plus au niveau de la relation même mais bien au niveau des constituants de celle-ci. Rappelons que cette méthode est proposée par Clementini (Clementini, Di Felice et al. 1993). La question que l'on se pose devient alors : « Quelle propriété conduit à quelle situation spatio-temporelle ? » Afin de réaliser cette interprétation, nous proposons un ensemble de prépositions spatio-temporelles que nous tenterons d'interpréter par une configuration matricielle. Notons que cette méthode pourrait également être appliquée directement au niveau des configurations de vie et de mouvement et non pas au niveau des relations spatio-temporelles généralisées. Des règles de recherche de successions particulières peuvent être établies de la façon similaire à la généralisation des configurations de vie et de mouvement en relations spatio-temporelles. Cette solution ne fait pas partie de nos objectifs de recherche actuels, mais ils seront étudiés dans les perspectives de recherche.

A. Choix de propriétés

Le langage commun regorge de prépositions spatiales et temporelles. Des termes de positionnement sont utilisés quotidiennement afin de décrire la position d'objets par rapport à d'autres. Lorsque l'on décrit ou situe des éléments, on dit qu'ils sont « sur un autre », « devant un autre », « à gauche de », « dans telle armoire », « au Nord de »... Toutes ces prépositions spatiales peuvent être interprétées de façon qualitative par un formalisme de description. Bien qu'il ne soit pas possible de décrire certaines de ces prépositions via le seul formalisme topologique, des méthodes telles les relations projectives, directionnelles peuvent expliquer ces prépositions. Il en est de même d'un point de vue temporel. Lorsque l'on situe un événement ou un fait dans le temps, on parle d' « avant », d' « après », de « pendant », etc. De

la même manière, les formalismes temporels peuvent décrire ces prépositions. Nous remarquons même que les logiques temporelles sont plus souvent dérivées d'une analyse de situations spatiales qu'à partir de modèles mathématiques purs. Le langage naturel, par contre, n'utilise que peu de prépositions simples afin de décrire une situation spatio-temporelle. La description de phénomènes à la fois spatiaux et temporels sera plus souvent explicitée comme la combinaison de deux prépositions spatiale et temporelle. On peut cependant parler de la « rencontre de deux personnes » qui précise une rencontre à la fois dans l'espace et dans le temps. La « génération », dans notre cas, explicite le fait qu'un objet débute une phase de présence depuis la position spatiale et temporelle d'un autre. Le choix des prépositions ou descriptions spatio-temporelles du langage commun que nous proposons d'analyser n'est pas issu d'une liste de termes prédéfinis à expliquer. Nous pensons cependant que la majeure partie des situations peuvent être décrites par la simple utilisation de l'interprétation de configurations de vie et de mouvement. Rappelons à cet effet que les configurations de vie et de mouvement peuvent inclure un formalisme de relations spatiales plus complexe que la simple prise en compte d'états de disjonction et d'égalité.

B. Interprétation de prépositions spatio-temporelles

Par la suite, nous décrirons un ensemble de termes spatio-temporels et nous proposerons d'une part une interprétation en langage naturel de notre vision de ces termes ainsi que la propriété topologique lui étant associée. Nous proposerons également une représentation simplifiée de l'interprétation en histoire spatio-temporelle de ces situations. L'interprétation fera également appel à des raisonnements spatiaux autres que le modèle des 9-intersections. Nous utiliserons le modèle du « Dimensional extended model » (DEM) de Clementini (Clementini and Di Felice 1998) qui qualifie la taille de l'intersection topologique entre deux objets, le « D-line segment » (Kurata and Egenhofer 2007) qui différencie les points de départ et d'arrivée de lignes ainsi qu'une proposition de modèle de description projective de lignes inspiré de Billen (Billen 2002; Billen and Kurata 2008).

- Rencontre spatio-temporelle

La rencontre spatio-temporelle est ici vue comme la présence de deux objets au même endroit et au même moment pendant un certain intervalle de temps. Le croisement qui sera expliqué par la suite exprime une rencontre instantanée. Afin de définir une rencontre spatio-temporelle, le seul formalisme topologique appliqué aux histoires spatio-temporelles ne suffit pas (Figure VIII-22 partie A). En effet, l'information quant à l'intersection des deux intérieurs des histoires spatio-temporelles n'indique pas si l'intersection est ponctuelle (cas d'un croisement) ou linéaire (cas d'une rencontre).

L'utilisation du modèle de raisonnement DEM qui fournit la dimension de l'intersection fournit, quant à lui, toute l'information nécessaire afin de qualifier une rencontre spatio-temporelle entre deux objets. La condition B de la Figure VIII-22 exprime que l'intersection entre les intérieurs des objets A et B doit être de dimension 1.

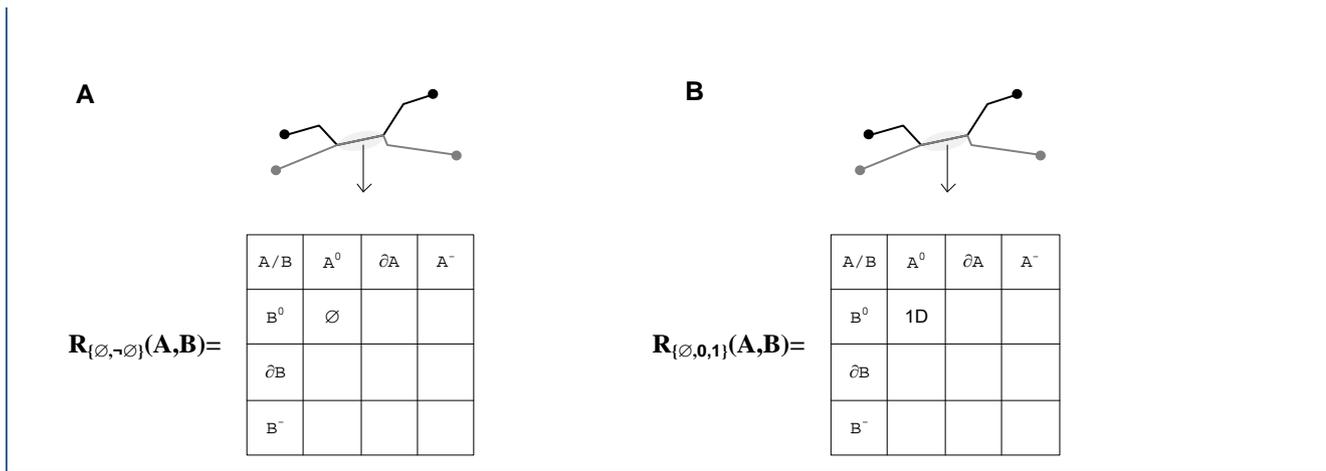


Figure VIII-22 Représentation de la préposition spatio-temporelle de rencontre selon la généralisation topologique des histoires spatio-temporelles (A) et selon le modèle du DEM (B).

La recherche de toutes les relations partageant une relation entre leurs intérieurs de dimension 1 rendra compte de tous les objets en rencontre avec un autre. Si deux objets sont amenés à se croiser plusieurs fois, l'intersection du DEM sera une collection de points. La différence entre la rencontre et le croisement sera donc conservée.

L'analyse directe des configurations de vie et de mouvement peut également prétendre à décrire cette expression spatio-temporelle. En effet, les états spatio-temporels sont soit définis sur un intervalle de temps ou sur un instant. Comme précisé par la théorie de la dominance, seul l'état de double transition peut être instantané. Cependant, dans le cas d'une succession d'état de coprésence disjonctive vers une coprésence égalitaire puis à nouveau d'une coprésence disjonctive, l'état de coprésence égalitaire peut être instantané. C'est l'ensemble de ces trois successions qui forme l'état de coprésence qui, lui, est bien valable durant un intervalle de temps. La recherche dans les configurations se limite donc à la recherche des relations spatio-temporelles identitaires définies comme :

$$\begin{aligned} &\forall LMC(A, B), \\ &\exists(\dots, Holds(pApBe, i), \dots) \rightarrow A \text{ rencontre } B \end{aligned} \tag{7.1}$$

- Croisement spatio-temporel

Le croisement spatio-temporel est défini de façon similaire à la rencontre si ce n'est qu'il n'est valable que pour une rencontre instantanée entre les deux objets. A nouveau, la simple généralisation topologique utilisant le formalisme des 9-intersections ne peut résoudre toute la définition de cette préposition spatio-temporelle (Figure VIII-22 partie A). L'utilisation du formalisme du DEM permet quant à lui de vérifier la dimension de la rencontre. Ainsi, si elle est ponctuelle, cela signifie d'un point de vue spatio-temporel que la rencontre sera instantanée entre les deux objets. La même approche que précédemment peut être définie

afin de directement déduire cette préposition depuis les configurations de vie et de mouvement. La condition devient alors :

$$\begin{aligned} &\forall LMC_n(A, B), \\ &\exists(\dots, Holds - at(pApBe, t), \dots) \rightarrow A \text{ croise } B \end{aligned} \quad (7.2)$$

La vision d'un croisement spatio-temporel peut encore être raffinée par l'utilisation de formalismes de généralisations d'histoires spatio-temporelles plus complexes. Si l'on considère une géométrie projective comme sous-tendant la généralisation, il est alors possible de repérer les points de non-continuités projectives dans une histoire spatio-temporelle. L'ordre projectif de ces points sera de 0 au lieu de 1. Lors d'un croisement avec un ordre projectif 1, les objets ne changent pas brusquement de trajectoire tandis que, lors du croisement avec un ordre projectif 0, l'objet dont l'ordre est 0 change brutalement de trajectoire spatio-temporelle. On peut alors qualifier la seconde possibilité de « *rebond spatio-temporel* ». La différence entre les deux types de croisements est présentée aux points C et D de la Figure VIII-23.

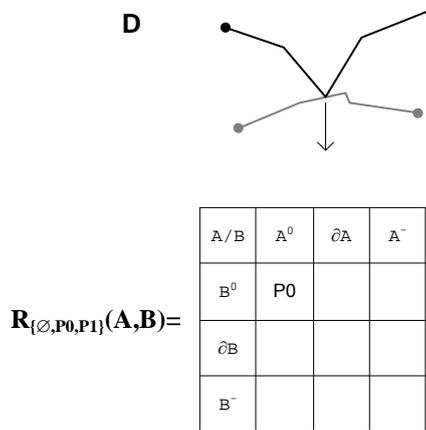
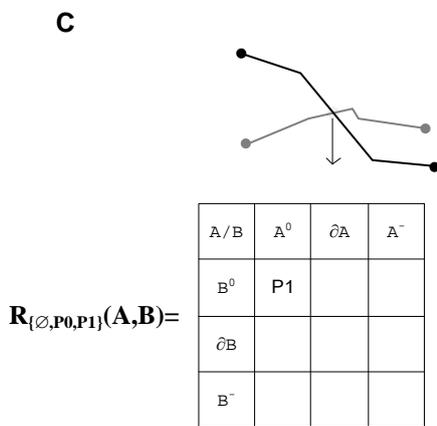
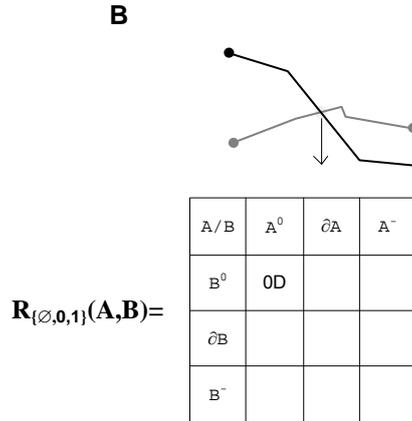
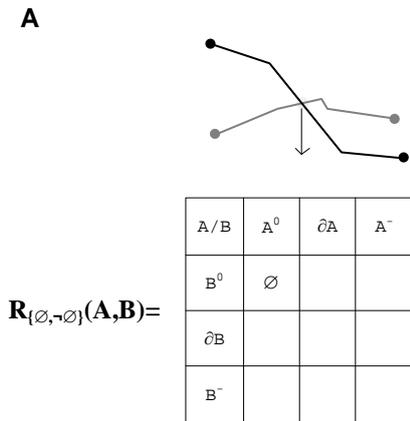


Figure VIII-23 Représentation des interprétations possibles de la préposition spatio-temporelle de croisement en fonction de la géométrie utilisée afin de généraliser les configurations de vie et de mouvement ou les histoires spatio-temporelles. L'utilisation de la topologie simple ne différencie pas la durée de la rencontre (A), le DEM précise que la rencontre est ponctuelle temporellement (B), la géométrie projective indique si la rencontre n'influence pas l'évolution des objets (C) ou si elle modifie leur trajectoire spatio-temporelle (D).

- Génération spatio-temporelle

La génération d'un objet par un autre est un phénomène souvent observé en raisonnement spatial. Le cas typique est celui d'une mère procréant un enfant, de la construction d'un objet par division avec un autre élément, etc. La notion de génération que nous prenons ici en compte représente le fait d'avoir un début de présence d'un objet (B) durant la phase de présence de l'objet générateur (A). Le but de cette interprétation étant de pouvoir additionner les prépositions spatio-temporelles, nous ne définissons pas d'autres

contraintes quant à la rencontre des deux objets. Celle-ci peut évidemment être ajoutée afin de rendre la durée de préparation de la génération, comme dans le cas où une mère porte son enfant en elle avant d'accoucher. La Figure VIII-24 montre les différentes interprétations de cette préposition en fonction des logiques de généralisation utilisées. Le cas de la géométrie topologique (A) va, à nouveau, ne pas distinguer les cas de génération avec ceux de capture spatio-temporelle (voir préposition suivante). L'utilisation du formalisme des 9-i+ qui différencie le début et la fin des segments permet quant à elle de faire cette distinction (B).

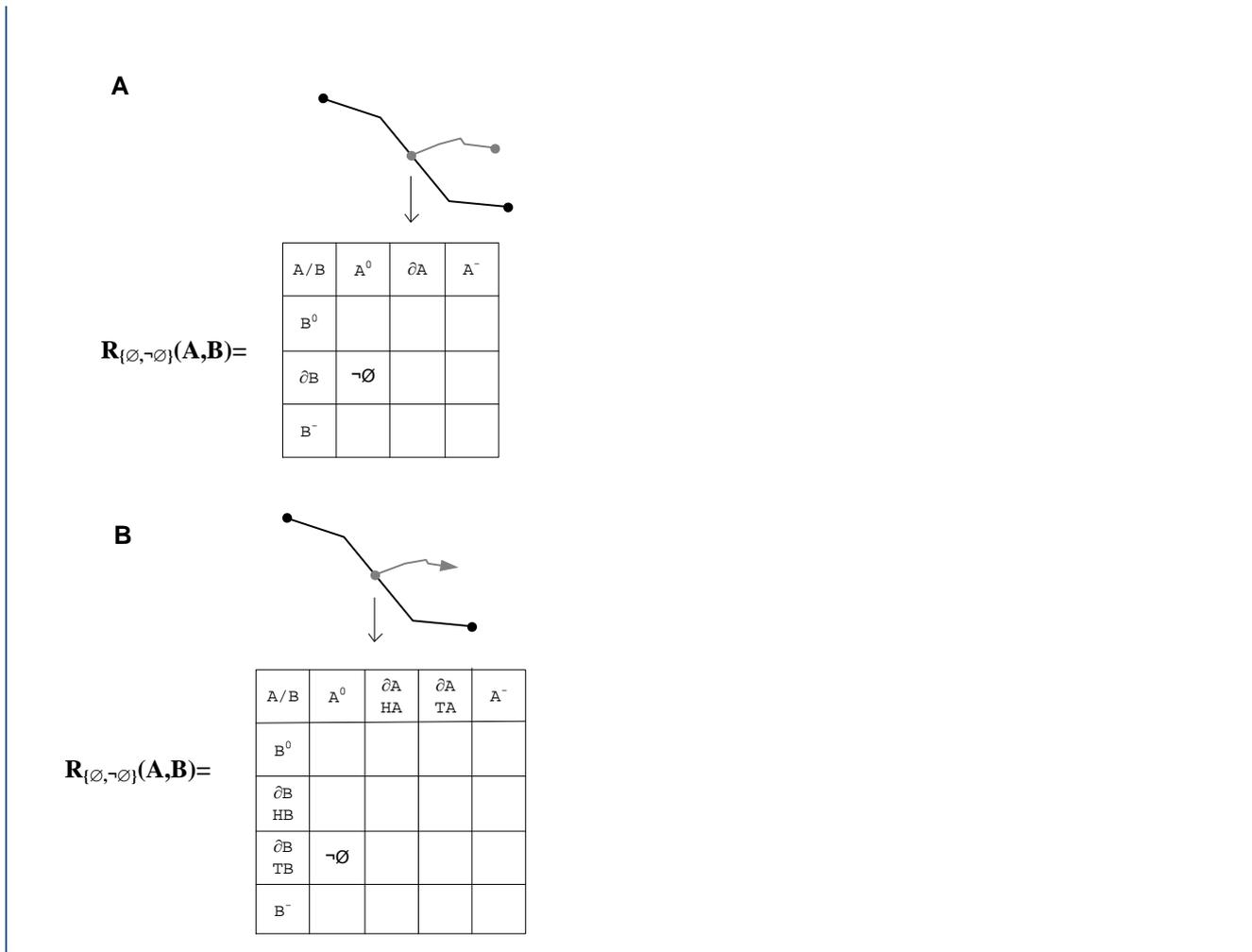


Figure VIII-24 Représentation des conditions matricielles topologique et du modèle des 9-i+ afin d'obtenir l'expression d'une génération spatio-temporelle. L'utilisation d'une topologie simple ne différencie pas la capture de la génération (A), tandis que le modèle des 9-i+ bien (B).

La seule condition nécessaire à représenter une génération est le fait d'avoir une intersection non vide entre le début de l'histoire spatio-temporelle de l'objet généré et l'intérieur de l'histoire spatio-temporelle de l'objet générateur. L'interprétation au niveau des

configurations de vie et de mouvement permet aussi de rendre compte de cette préposition spatio-temporelle. L'interprétation est alors :

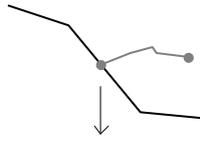
$$\forall LMC_n(A, B), \exists (... , (pAnpB) \vee (pA\#B), pAtB, pApBe, ...) \rightarrow A \text{ génère } B \quad (7.3)$$

Comme précisé dans le Chapitre VI.3, la succession directe entre un état de transition et un état d'égalité entre les deux objets indique que la transition peut être interprétée comme apparaissant sur la phase de présence spatio-temporelle du premier objet. Nous ajoutons la condition que l'objet B soit non présent ou n'existe pas avant la transition afin qu'il ne soit pas présent avant la génération et qu'il ne s'agisse pas d'un simple rebond ou d'un croisement.

- Capture spatio-temporelle

La capture spatio-temporelle est définie comme la relation inverse de la précédente. Il s'agit des cas où un objet (B) cesse d'être en phase de présence à la suite de la rencontre avec la phase d'existence du prédateur (A). Comme dans le cas précédent, la généralisation topologique des configurations de vie et de mouvement conduit à une non-distinction des cas de génération et de capture spatio-temporelle. Le formalisme du 9-i+ permet de s'affranchir de ce problème en établissant la relation entre l'intérieur d'un objet (A) prédateur et la frontière de fin d'un objet (B) proie. La Figure VIII-25 exprime les conditions de capture spatio-temporelle.

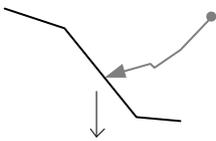
A



$R_{\{\emptyset, \neg\emptyset\}}(A, B) =$

A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰			
∂B	¬∅		
B ⁻			

B



$R_{\{\emptyset, \neg\emptyset\}}(A, B) =$

A/B	A ⁰	∂A HA	∂A TA	A ⁻
B ⁰				
∂B HB	¬∅			
∂B TB				
B ⁻				

Figure VIII-25 Représentation de l'interprétation matricielle de la préposition spatio-temporelle de capture. Comme dans le cas de la génération, le modèle des 9-i (A) ne différencie pas la capture de la génération tandis que le modèle des 9-i+ permet d'effectuer la différence (B).

L'interprétation de cette préposition spatio-temporelle peut également être réalisée au niveau des configurations de vie et de mouvement. L'interprétation suit alors la règle suivante :

$$\forall LMC_n(A, B), \exists (... , pApBe, pAtB, (pAnpB) \vee (pA\#B), ...) \rightarrow A \text{ capture } B \quad (7.4)$$

La condition (7.4) exprime l'inverse de la condition (7.3). En effet, la succession attendue dans la configuration de vie et de mouvement est simplement exprimée dans un ordre inverse. L'objet B doit être à la même position spatiale et temporelle que l'objet A puis ne plus exister ou ne plus être visible. L'expression au niveau de la configuration de vie et de mouvement pourrait rendre plus de sens à la préposition spatio-temporelle de capture. En effet, en fonction de l'état spatio-temporel de l'objet B après la capture, on peut savoir si sa spatialité est détruite ou si elle est simplement masquée (sort de l'espace de travail) par l'objet A. Une personne mettant une clé dans un poche correspond au second cas, la clé n'est pas

spatialement détruite par le fait d'être placée dans une poche. L'exemple d'une personne mangeant une pomme correspond lui au premier cas. La spatialité de la pomme est détruite par sa mastication, alors que son identité persiste pour la personne qui la digère.

- Division spatio-temporelle / Agrégation spatio-temporelle

La division spatio-temporelle ou l'agrégation spatio-temporelle est un phénomène proche respectivement de la génération et de la capture spatio-temporelle. En effet, cette situation impose, en plus du fait d'avoir une génération que les objets partagent, un intervalle de rencontre spatio-temporelle. Cette préposition spatio-temporelle représente toutes les divisions d'objets ou les regroupements d'objets. Comme lors de l'interprétation des relations spatio-temporelles généralisées, le cas d'une personne qui possède une propriété ou qui l'acquiert jusqu'à la fin de sa phase de présence sont des exemples de ces divisions ou agrégations spatio-temporelles. La Figure VIII-26 propose l'interprétation matricielle de ces prépositions. Lors d'une interprétation purement topologique (A), la distinction entre la division et l'agrégation n'est pas faite. Le formalisme des 9-i+ différencie la division (B) de l'agrégation (C). Notons que, dans ce cas, la complexité de la préposition induit des conditions plus restrictives afin de traduire formellement l'interprétation.

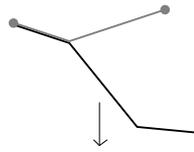
Au niveau des configurations de vie et de mouvement, il est également possible de décrire les prépositions spatio-temporelles de division ou d'agrégation spatio-temporelle. Plus la complexité de l'expression décrite augment, plus la succession de relations spatio-temporelles attendues dans la configuration de vie et de mouvement sera longue. Cependant, la recherche d'une telle succession n'induit pas plus de complexité lors de la recherche dans les configurations de vie et de mouvement et ne nécessite pas l'utilisation d'une géométrie particulière lors de la définition des configurations de vie et de mouvement. L'expression de la condition de division peut être :

$$\begin{aligned} & \forall LMC_n(A, B), n \in \mathbb{N}, \\ & \exists (pApBe, pApBd, n(STS - iR)) \vee (\forall n, (STS - iR_n) \neq pApBe) \quad (7.5) \\ & \rightarrow A \text{ et } B \text{ se divisent} \end{aligned}$$

La condition (7.5) exprime que, pour toute configuration de vie et de mouvement entre les objets A et B, si la configuration débute par une relation d'égalité suivie d'une relation de disjonction et si pour toutes les relations suivantes, il n'y a pas de relation d'égalité, alors les objets A et B se divisent. La démarche inverse est utilisée pour définir une agrégation. La condition devient alors :

$$\begin{aligned} & \forall LMC_n(A, B), n \in \mathbb{N}, \\ & \exists (n(STS - iR), pApBd, pApBe) \vee (\forall n, (STS - iR_n) \neq pApBe) \quad (7.6) \\ & \rightarrow A \text{ et } B \text{ s'agrègent} \end{aligned}$$

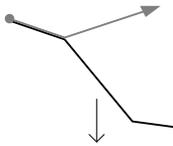
A



$R_{\{\emptyset, \neg\emptyset\}}(A, B) =$

A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰	¬∅		
∂B		¬∅	
B ⁻			

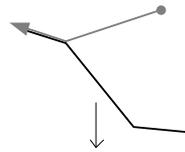
B



$R_{\{\emptyset, \neg\emptyset\}}(A, B) =$

A/B	A ⁰	∂A HA	∂A TA	A ⁻
B ⁰	¬∅			
∂B HB				¬∅
∂B TB			¬∅	
B ⁻		¬∅		

C



$R_{\{\emptyset, \neg\emptyset\}}(A, B) =$

A/B	A ⁰	∂A HA	∂A TA	A ⁻
B ⁰	¬∅			
∂B HB		¬∅		
∂B TB				¬∅
B ⁻			¬∅	

Figure VIII-26 Formalisation de l'interprétation des prépositions spatio-temporelles d'agrégation et division spatio-temporelle. Le groupement des deux prépositions peut être interprété par une matrice d'intersection topologique (A) ou alors différenciée par le modèle des 9-i+ en division (B) et agrégation (C).

- Egalité spatio-temporelle

L'égalité spatio-temporelle indique que deux objets sont égaux durant toute leur évolution. Il ne faut pas confondre l'égalité spatio-temporelle avec la relation spatio-temporelle identitaire d'égalité qui indique que les deux objets sont spatialement au même endroit. Bien que l'égalité spatio-temporelle soit composée de relations spatio-temporelles identitaires d'égalité, elle précise également qu'il ne peut y avoir d'autre type de relations spatio-temporelles identitaires durant l'évolution des objets. L'utilisation d'un modèle de généralisation topologique suffit à la définition de cette préposition spatiale. L'analyse effectuera la recherche d'intersections vides entre les éléments d'un objet avec l'extérieur du second.

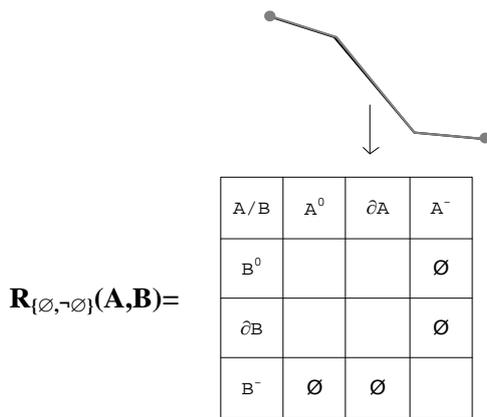


Figure VIII-27 Interprétation topologique de la relation spatio-temporelle d'égalité. Cette préposition spatiale indique que les deux objets sont en concordance spatiale et temporelle durant l'ensemble de leur phase de présence.

Notons que l'interprétation de cette préposition spatiale en étudiant la projection spatiale des objets dans un plan ne pourrait pas systématiquement rendre un bon résultat. En effet, si l'on imagine deux objets se déplaçant d'un point X à un point Y en empruntant le même trajet, en partant en même temps et en arrivant en même temps, la projection de leurs histoires spatio-temporelles serait alors identique à celles représentées à la Figure VIII-27. Cependant si, durant le trajet, un des deux objets accélère puis ralentit avant son arrivée, la projection des histoires spatio-temporelles dans un espace spatial ne montrera pas ce phénomène alors que la généralisation des histoires spatio-temporelles ou des configurations de vie et de mouvement bien (voir Figure VIII-28).

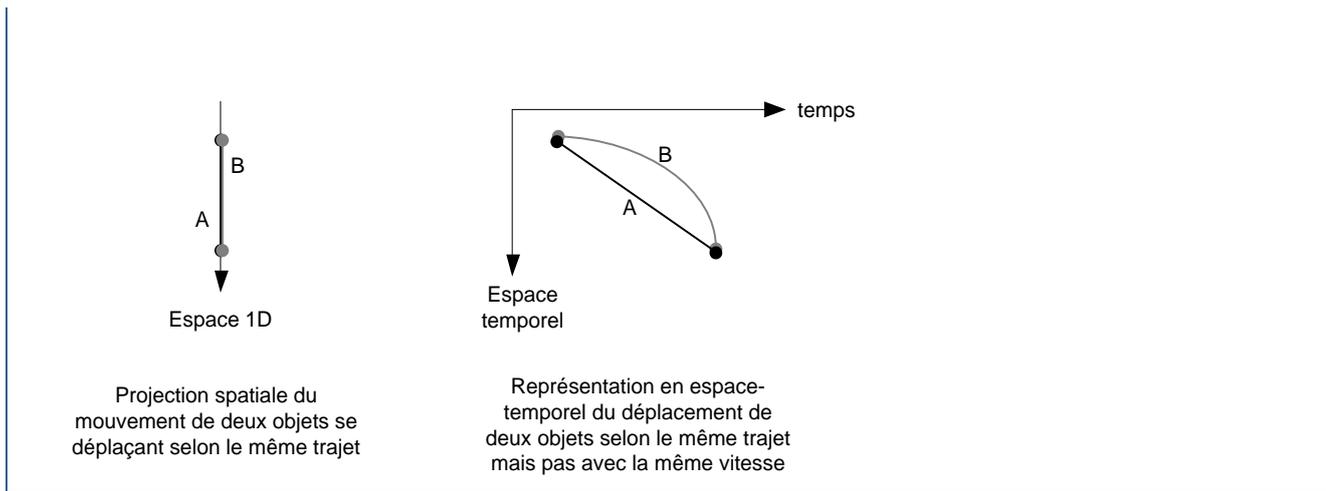


Figure VIII-28 Représentation du trajet de deux objets d'une part selon un espace à 1D (symbolisant le trajet) à gauche et en espace-temps à droite. On voit que l'interprétation des projections spatiales fait croire à une rencontre spatio-temporelle permanente. La description en espace-temps montre cependant que l'objet B avance moins vite que l'objet A puis accélère pour arriver au même instant à la fin du trajet.

D'un point de vue de l'interprétation en configuration de vie et de mouvement, l'interprétation est évidente. L'ensemble des relations spatio-temporelles identitaires doivent être des relations d'égalités spatiales :

$$\begin{aligned}
 &\forall LMC_n(A, B), n \in \mathbb{N}, \\
 &\forall n(STS - iR_n) = pApBe \tag{7.7} \\
 &\rightarrow A \text{ égale spatio-temporellement } B
 \end{aligned}$$

- Disjonction spatio-temporelle

La disjonction spatio-temporelle, ou l'ignorance spatio-temporelle d'un objet par rapport à l'autre, indique que deux objets ne se sont jamais rencontrés durant l'ensemble de leur phase de présence. Cette préposition indique en quelque sorte l'inverse de la rencontre avec en plus le fait que les objets n'apparaissent ou ne disparaissent pas au même instant et à la même position spatiale.

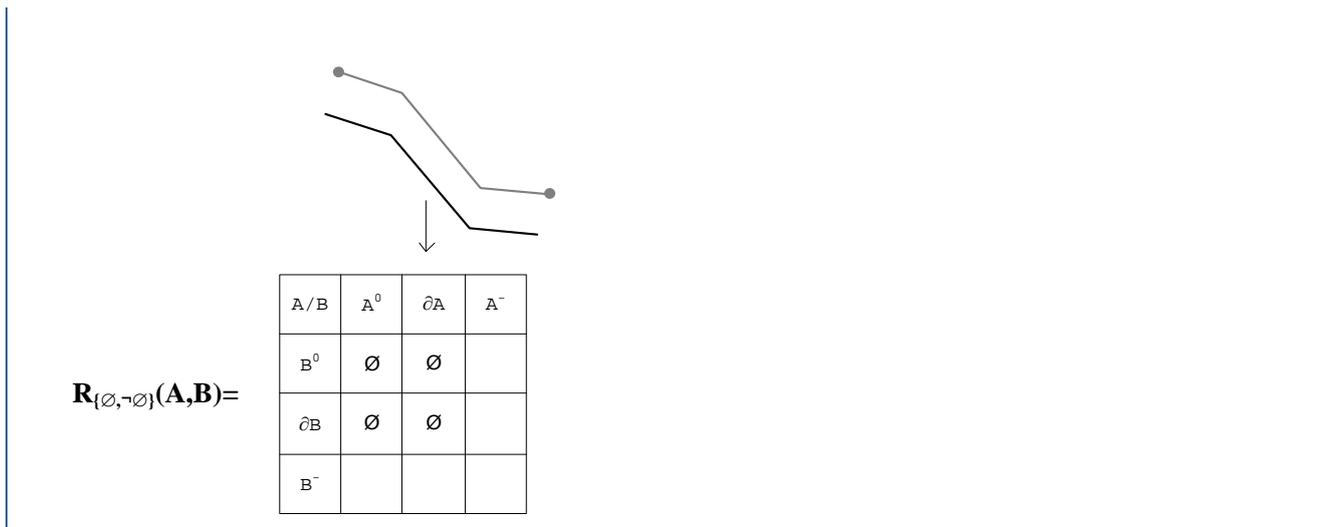


Figure VIII-29 Représentation de l'interprétation de la relation spatio-temporelle de disjonction entre deux objets. La représentation peut être expliquée via une matrice d'intersection topologique des 9-i en imposant que les intersections entre les intérieurs et frontières ne peuvent être en intersection.

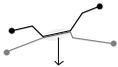
L'interprétation en configuration de vie et de mouvement de cette préposition est donnée par :

$$\begin{aligned} \exists LMC_n(A, B), n \in \mathbb{N} \\ \forall n, (STS - iR_n) \neq pApBe \end{aligned} \tag{7.8}$$

En guise de récapitulation de l'ensemble des interprétations proposées, la Figure VIII-30 reprend les différentes configurations matricielles, l'interprétation en langage naturel et spatiale que nous en faisons. La figure ne présente que l'interprétation sur base du formalisme topologique des 9-intersections. Comme nous pouvons le constater, plus de différenciations sont obtenues par l'utilisation d'autres modèles de raisonnement spatial tels le DEM, le 9i+ ou encore les relations projectives. Cette représentation est à mettre en parallèle avec la Figure VIII-21.

Rencontre spatio-temporelle

$$R_{\{\emptyset, \sim\emptyset\}}(A, B) =$$



A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰	∅		
∂B			
B ⁻			

Division spatio-temporelle
ou
Agrégation spatio-temporelle

$$R_{\{\emptyset, \sim\emptyset\}}(A, B) =$$



A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰	~∅		
∂B		~∅	
B ⁻			

Croisement spatio-temporel

$$R_{\{\emptyset, \sim\emptyset\}}(A, B) =$$



A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰	∅		
∂B			
B ⁻			

Égalité spatio-temporelle

$$R_{\{\emptyset, \sim\emptyset\}}(A, B) =$$



A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰			∅
∂B			∅
B ⁻	∅	∅	

Génération spatio-temporelle
ou
Capture spatio-temporelle

$$R_{\{\emptyset, \sim\emptyset\}}(A, B) =$$



A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰			
∂B	~∅		
B ⁻			

Ignorance spatio-temporelle

$$R_{\{\emptyset, \sim\emptyset\}}(A, B) =$$



A/B	A ⁰	∂A	A ⁻
B ⁰	∅	∅	
∂B	∅	∅	
B ⁻			

Figure VIII-30 Résumé de l'interprétation de prépositions spatio-temporelles sur base de l'analyse de configurations matricielles. Les exemples présentés ici se basent uniquement sur le formalisme topologique. Plus de détails peuvent être obtenus par l'utilisation de formalisme DEM, 9i+, projectifs...

4. Conclusion

Les deux méthodes d'interprétation en langage naturel de prépositions spatio-temporelles que nous avons présentées fournissent des résultats de complexités différentes. En effet, l'exploitation des relations spatio-temporelles généralisées entraînent de nombreuses répétitions au niveau des descriptions et conduisent souvent à des difficultés d'interprétation pour l'utilisateur final. Par contre, comme on peut le constater dans la seconde partie, la recherche de configurations matricielles ou de configurations de vie et de mouvement se rapportant à un prédicat spatio-temporel défini conduit, dans la majeure partie des cas, à une interprétation bien plus performante et proche de la perception de l'utilisateur final. Cette interprétation, souvent plus directe, montre l'intérêt de gérer des relations spatiales qualitatives généralisées au niveau des relations entre histoires spatio-temporelles. Un tel

niveau d'abstraction permet de concevoir simplement et de coller à la perception de l'utilisateur final. De plus, cette interprétation montre toute l'utilité des configurations de vie et de mouvement qui dans ce cas servent réellement de formalisme de base à partir duquel il est possible de dériver des applications de haut niveau. Une de nos perspectives de recherche va maintenant être de confronter cette seconde interprétation à la perception d'utilisateurs finaux afin de tester la relation entre nos définitions et la définition du sens commun des prépositions spatio-temporelles de ceux-ci.

Chapitre IX.

Conclusions et perspectives

*Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible.
Antoine de Saint-Exupéry*

1. Conclusions

Durant toute cette recherche, nous abordons la modélisation de concepts liés à l'identité, l'espace et le temps. Notre principale question de recherche vise à modéliser l'évolution complète d'un objet dans l'espace-temps. Nous pensons apporter plusieurs solutions de modélisation à cette question.

La perception que nous avons d'un objet géographique est plus complexe que la simple représentation de sa spatialité. En effet, dès lors que l'on considère l'évolution temporelle d'un objet, il devient nécessaire de prendre en compte son identité. L'évolution dans le temps produit le changement. La question que l'on peut alors poser est : « L'identité suffit-elle à définir un objet ? ». En d'autres termes, est-il nécessaire qu'un objet possède une extension spatiale dans le monde physique afin d'être considéré comme existant ? Les différentes applications que nous avons mises en œuvre nous amènent à penser que la spatialité ne conditionne pas l'existence. Dès la définition de son identité, un objet peut être considéré comme existant, alors que sa spatialité n'existe pas encore. Beaucoup d'exemples de notre quotidien confirment cette hypothèse. Une habitation en cours de planification, une future division cadastrale, un pays en devenir sont autant d'exemples d'objets géographiques pour

lesquels des relations spatiales sont définies alors même que leur spatialité n'a pas d'existence dans le monde physique. De la même manière, la question de la continuité de l'existence d'un objet géographique après la destruction de son extension spatiale peut se poser : « Un objet dont la spatialité disparaît existe-t-il toujours ? ». Une vision statique du monde aurait tendance à considérer que non. Cependant, la connaissance du passé nous amène à établir des relations vers des objets participant à notre « histoire ». Ainsi, toutes les relations de « mémoire » que nous entretenons vis-à-vis d'objets dont la spatialité n'existe plus, sont bien réelles (dans notre espace de modélisation). En fait, nous posons que dans cette situation, l'identité de tels objets persiste dans le temps. La destruction de l'extension physique d'une chose ne détruit pas pour autant son identité. Pour aller plus loin, il est alors logique de s'interroger sur la durée de validité de l'identité des objets. La question à se poser devient alors : « Jusqu'à quand l'identité d'un objet est-elle définie ? ». La réponse à cette question s'inscrit dans une réflexion essentiellement contextuelle. C'est le cadre de travail qui va, le plus souvent, induire cette notion de persistance temporelle de l'identité. Cependant, nous montrons que d'une façon générale, l'identité d'un objet persiste tant qu'une relation entre cet objet et un autre peut être établie. Ainsi, la connaissance de l'existence passée d'un objet est suffisante afin de justifier la persistance de son identité dans le temps.

La première partie du travail donne une vision formelle de cette réflexion. Par la définition de l'identité au travers de l'espace et du temps. Le résultat de cette modélisation sont les états spatio-temporel d'un objet. Ces états, définis à partir des postulats de base de la gestion identitaire, spatiale et temporelle, permettent d'affirmer que la gestion de l'identité d'un objet ne doit pas être temporellement liée à sa représentation spatiale. Par ailleurs, la complexité de l'évolution d'un objet dans l'espace et le temps produit des phases où l'objet n'est pas visible dans l'espace de travail. Ces pertes de spatialité temporaire ne détruisent cependant pas l'identité des objets concernés. La gestion étendue que nous plébiscitons gère à la fois les objets dont la spatialité n'existe pas et dont la spatialité n'est pas visible.

Nous percevons le monde qui nous entoure par les relations que nous entretenons vis-à-vis de lui. En effet, c'est essentiellement par des relations de visibilité égocentrique que nous visualisons notre environnement. Ainsi les relations spatio-temporelles que nous effectuons en permanence vers notre milieu conditionnent notre perception du monde. La modélisation de ces relations est donc primordiale afin de définir l'évolution spatio-temporelle des objets géographiques. Afin de décrire ces relations, nous proposons un modèle de relations entre états spatio-temporels identitaires. Comme un objet est toujours en relation avec son environnement, et que, l'objet, comme l'environnement est en perpétuelle évolution, la gestion des relations spatio-temporelles entre objets spatio-temporels est donc une nécessité. La réponse que nous apportons à ce besoin de modélisation est un ensemble de relations définissant les liens possibles entre deux objets d'un point de vue identitaire, spatial et temporel. Ce jeu de relations est, à notre sens, la vision la plus générale de modèles de raisonnements spatiaux et spatio-temporels. Le développement d'une théorie de transition qualitative permet également de justifier la définition et les différentes transitions des

relations spatio-temporelles possibles. La continuité de l'espace-temps n'étant pas conservée lors d'une représentation qualitative, une théorie de dominance permet de retrouver la continuité de transition lors du passage d'un état qualitatif à un autre. En appliquant cette théorie à notre modèle, nous avons également montré l'existence et la nécessité de gérer un état spatio-temporel de transition entre les phases d'existence d'un objet spatio-temporel.

Les relations spatio-temporelles que nous entretenons avec son entourage évoluent également. La représentation de cette évolution est assez complexe. Il s'agit d'étudier la succession temporelle des relations spatio-temporelles identitaires préalablement définies. Afin d'aider à la visualisation de cette évolution, nous définissons un langage formel et iconique de représentation des relations spatio-temporelles. De plus, ce modèle permet, via le filtre du raisonnement spatio-temporel qualitatif, la formalisation et l'interprétation des relations entre histoires spatio-temporelles de deux objets. Le langage proposé pour répondre à cette modélisation sont les configuration de vie et de mouvement. Ce langage permet également le développement de nouvelles applications spatio-temporelles. Nous avons montré que ce formalisme suffit à de nombreuses applications de raisonnement spatio-temporel. Nous pensons qu'une génération automatisée de configurations de vie et de mouvement dans un système de gestion de base de données spatio-temporelles est une méthode intéressante à l'étude de relations entre objets au cours du temps. Cette formalisation générale doit être vue comme une vision d'un haut niveau d'abstraction utile à tous les modèles de raisonnement spatio-temporel.

L'utilisation du formalisme des configurations de vie et de mouvement donne lieu à plusieurs applications. S'agissant d'une base conceptuelle de raisonnement, nous l'utilisons pour présenter plusieurs applications. Lorsque l'on traite de l'évolution spatio-temporelle entre deux objets, on peut s'interroger sur l'existence d'un ensemble de relations primitives propre à n'importe quel concept applicatif. En d'autres termes, on peut se demander si les relations entre histoires spatio-temporelles répondent toujours à un ensemble de relations et, si oui, quel est cet ensemble ? Afin de répondre à cette interrogation, nous généralisons un ensemble exhaustif de configurations de vie et de mouvement. Nous pensons que cette vision élevée de l'information spatio-temporelle se rapproche de la perception que peut en faire un utilisateur final. D'un point de vue de la logique des relations topologique, il est possible de montrer que toutes les relations possibles entre histoires spatio-temporelles sont au nombre de 25. Nous avons également prouvé que, par rapport à un contexte uniquement spatial, il est possible d'exclure 8 relations qui ne peuvent n'existeront jamais dans un contexte purement spatio-temporel.

L'utilisation de modèles de relations implique la compréhension et l'expression de ces relations dans le langage de l'utilisateur final. En effet, il n'y a que très peu d'utilisateurs des relations spatiales topologiques qui sont au fait des principes mathématiques sous-tendent la construction de ces relations. L'utilisation des relations se fait par la représentation et l'expression qu'en font les utilisateurs par rapport à leurs applications. Afin de donner à la possibilité d'exploiter pleinement les relations spatio-temporelles identitaires généralisées,

nous en donnons également une interprétation générale en langage naturel. Cette interprétation ne renvoie cependant pas toujours un résultat clair et univoque entre la description sémantique et la relation. Afin de combler cette lacune, nous proposons une démarche d'interprétation différente. En effet, bien que la sémantique de relations soit plus explicite lorsqu'elles sont utilisées dans une application précise, nous pensons que la formalisation d'expressions spatio-temporelles générales peut être une base de développement. A cette fin, nous proposons une formalisation en configurations de vie et de mouvement d'un ensemble de prépositions spatio-temporelles du langage commun.

Par l'approche séquentielle des différents apports de ce travail, nous pensons avoir répondu aux différentes questions de recherches que nous avons posées. La recherche spatio-temporelle est autant en évolution que le monde qu'elle tente de modéliser. Nous pensons que cette discipline récente nécessite encore une phase de théorisation importante avant de plonger dans une implémentation ne rendant pas correctement compte de la perception que l'homme a de l'espace-temps. Le traitement de l'information spatiale peut être vu sous l'angle de différentes géométries. Nous sommes formés à l'utilisation de ces géométries, ces différentes clés de lecture permettent de concevoir des systèmes multiples représentant cette information. Les clés de lecture de l'information spatio-temporelle sont, quant à elles, moins nombreuses. Bien que souvent dérivées de représentations spatiales temporalisées, on constate que seul le développement d'une nouvelle méréologie spatio-temporelle et de l'étude des relations entre formes spatio-temporelles permet une bonne perception des phénomènes liés à l'espace-temps.

Nous espérons finalement avoir l'opportunité de continuer nos recherches dans ce domaine. Plus que d'apporter des réponses, nous pensons avoir soulevé de nouvelles questions. La représentation de l'espace-temps, de la conceptualisation de l'évolution d'objets et d'espaces temporels identitaires nous semble être d'un intérêt primordial quant au traitement de l'information spatio-temporelle. Au-delà des perspectives soulevées par cette recherche, nous pensons que de telles représentations aident à la compréhension du monde et fournit un outil aidant à la compréhension des trois questions fondamentales :

Qui, Quoi ? Où ? Quand ?

2. Perspectives de recherche future

Ce travail relatif à l'identité au travers du temps et de l'espace répond à plusieurs questions de recherche quant à la modélisation complète de l'évolution d'un objet dans l'espace et le temps. Toutes les questions relatives à la modélisation de phénomènes spatio-temporels n'ont, bien évidemment, pas été abordées. Néanmoins, nous pouvons identifier plusieurs pistes de recherche complémentaire que nous jugeons prioritaires à la suite de ce travail. Ces pistes de recherche sont composées, d'une part, de finalités théoriques nécessaires

à la modélisation proposée afin d'élaborer des extensions ou des compléments de recherche. Nous avons volontairement laissé de côté certains aspects de modélisation durant ce travail. Il sera nécessaire de les étudier par la suite. D'autre part, les perspectives présentées reprennent des possibilités d'utilisation et d'implémentation du modèle mis en œuvre.

A. Développements théoriques

La première série de perspectives évoquées est relative à l'extension théorique du modèle. Elle vise à traiter les cas particuliers propre à la spatialité des objets et à des composantes historiques volontairement laissées de côté lors de ce travail. Ces perspectives ne remettent pas en cause le modèle établi. Elles sont plus des extensions possibles d'une architecture fondamentale.

i. Tables de compositions

Les différents modèles de représentation de l'information spatio-temporelle tels que proposés nécessitent encore quelques développements. Nous pensons notamment aux tables de compositions. Ce type de tables permet de déduire la relation entre un objet A et un objet C sur base des relations entre les objets A et B et les objets B et C. Ces tables aident à l'inférence et complètent les modèles de raisonnements proposés. Il est à noter que ce type de tables n'est pas toujours performant. En effet, lorsque la déduction qui peut être faite à partir de deux relations conduit à une incertitude ou un grand nombre de relations possibles, l'utilisation de celles-ci reste relative.

ii. Vision étendue de la spatialité d'objets

La modélisation de l'état spatio-temporel d'un objet laisse volontairement la spatialité propre de l'objet de côté. La présence de celle-ci est étudiée mais pas représentée. Ce n'est que lors de l'étude de la relation entre états spatio-temporels que nous faisons intervenir une représentation spatiale des objets modélisés. Tant qu'à présent, nous considérons les objets comme ayant ou non une spatialité. Par ailleurs, dans les représentations de configurations de vie et de mouvement, nous considérons les objets comme ayant les relations d'éléments ponctuels. Nos définitions des relations spatio-temporelles identitaires ainsi que des configurations de vie et de mouvement rendent dès lors compte de deux relations topologiques d'égalité et de disjonction. Il n'en reste que les définitions proposées de l'état spatio-temporel d'un objet et des relations entre ceux-ci sont suffisamment générales pour intégrer d'autres types de spatialités. Comme mis en avant dans l'analyse des phénomènes spatio-temporels, tous ne sont pas aisément représentés par l'évolution de deux points dans le temps et dans l'espace. La prise en compte de formalismes spatiaux, à l'instar des relations topologiques entre régions, pourraient présenter une extension intéressante des différentes transitions possibles des relations spatio-temporelles identitaires. La formalisation des relations entre histoires spatio-temporelles de deux objets peut également être augmentée par ce type de formalisme topologique.

iii. Espace de travail et espace perçu

La modélisation de l'espace de travail s'appuie sur la définition d'un ensemble de fonctions de présence. Comme présenté, l'espace de travail peut être mis en relation avec l'espace perçu par un utilisateur dans son environnement. La modélisation qualitative d'un environnement complexe, vu par un utilisateur, nécessite souvent l'utilisation d'un formalisme de description qualitatif plus évolué que ne le propose la topologie. L'utilisation de relations projectives, de relations ternaires permet de mieux interpréter les concepts propres à la perception d'un environnement par un acteur humain. Une réflexion sur l'intégration de ce type de formalismes dans la définition de l'espace de travail nous semble une perspective de recherche enrichissante pour notre modèle. Cette évolution rapprocherait également notre modélisation de systèmes de navigation automatisés.

iv. La topologie, comme modèle de généralisation, mais pas seulement...

L'application de la généralisation de configurations de vie et de mouvement par un formalisme de relations topologiques réduit sensiblement l'information conservée après généralisation. Le choix posé vise cependant à rechercher un jeu de relations très simples afin de représenter les caractéristiques les plus générales possibles de l'interaction entre objets dans l'espace-temps. Comme exprimé précédemment lors de l'interprétation en langage naturel, l'utilisation d'un modèle de raisonnement projectif pourrait conduire à une extension de l'information généralisée au niveau des contacts entre les éléments des histoires spatio-temporelles. De plus, lors de l'interprétation et de la généralisation, nous ne considérons pas de lignes complexes. L'utilisation d'un modèle de relations entre lignes complexes pourrait aider à l'interprétation globale d'une évolution spatio-temporelle d'un objet. Cette analyse nécessite préalablement de poser un choix quant au modèle à utiliser. Pour ce faire, une confrontation de ces modèles vers un ensemble d'utilisateurs peut s'avérer intéressante afin de diagnostiquer le mode de représentation le plus significatif pour eux.

v. Historique de présence

Le déplacement d'un objet dans l'espace-temps n'est pas visible la plupart du temps. Mis à part quelques exceptions, telles les trainées de condensations d'avions, ou le déplacement d'une personne dans la neige, la représentation de la trace spatiale ne persiste pas dans le temps. Pourtant, dans plusieurs applications, la conservation des relations entre cet espace persistant et le déplacement d'un objet peut être utile. Citons notamment les applications épidémiologiques pour lesquelles l'information de l'infection d'un local ou d'un objet par un individu doit être conservée dans le temps. L'étude des relations spatio-temporelles ne concernerait alors plus des relations entre deux lignes spatio-temporelles mais entre une ligne et une région. La Figure IX-1 symbolise par exemple l'étude de la relation entre un objet en mouvement avec la trace spatio-temporelle persistante du second. Cette figure peut par exemple représenter un prédateur à la poursuite d'une proie. Dans ce cas, le prédateur (objet noir) poursuit une proie et recherche sa trace (objet gris). Une analyse de la relation entre les histoires spatio-temporelles de ces deux objets conduirait à une

« ignorance » spatio-temporelle. Cependant, le prédateur peut percevoir la persistance de la trace de la proie dans le temps. Il observe les pas, l'odeur, les indices laissés par celle-ci. Dans ce cas, il y aura alors une relation spatio-temporelle entre les deux objets.

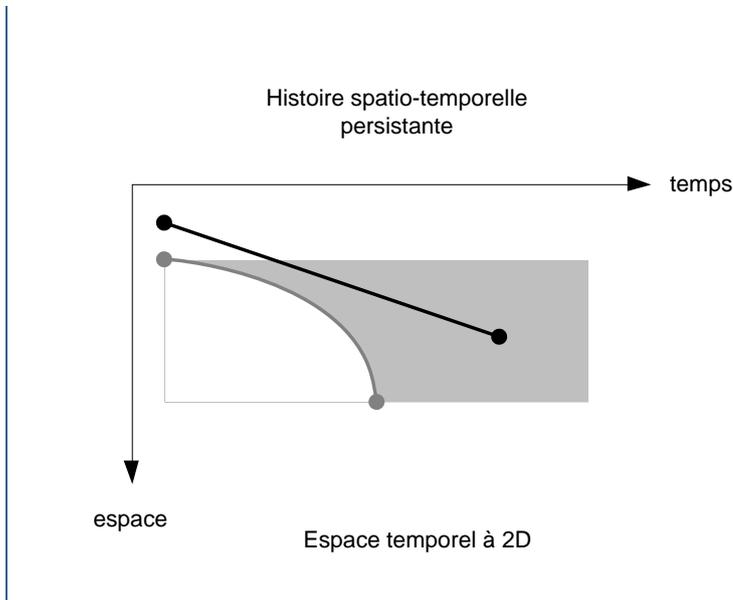


Figure IX-1 Représentation de la relation spatio-temporelle entre un objet et l'histoire du déplacement du second. Une analyse des relations entre histoires spatio-temporelles conduirait à une ignorance spatio-temporelle alors que, s'il s'agit d'un chasseur à la poursuite d'une proie, il est en relation avec la persistance de sa trace dans le temps.

B. Développements sémantiques

Le modèle des configurations de vie et de mouvement fournit un apport significatif quant à l'interprétation des histoires spatio-temporelles et à l'étude de la succession de relations spatio-temporelles. La valeur cognitive de ce langage doit cependant encore être étudiée. En effet, l'approche des sciences spatiales cognitives peut représenter un solide apport aux configurations de vie et de mouvement. Les deux approches d'interprétations en langage naturel que nous avons proposées dans ce travail gagneraient par l'ajout d'une étude formelle des prédicats cognitifs de la perception que nous avons du domaine spatio-temporel. Une telle étude permettrait également de rapprocher les deux domaines scientifiques que sont le raisonnement spatio-temporel et la cognition spatio-temporelle.

Deux approches peuvent être envisagées afin de vérifier la sémantique du modèle des configurations de vie et de mouvement. Premièrement, sur base d'une analyse auprès d'un panel d'utilisateurs, il est possible de vérifier que l'interprétation donnée aux relations spatio-temporelles correspond à la définition que nous en donnons. Cela permet également de vérifier si le lien entre la définition et l'interprétation est univoque. Deuxièmement, la démarche contraire peut être proposée. Cette approche innovante se base sur une recherche

en cognition spatiale. L'étude de la perception de l'espace-temps et des relations dans celui-ci, imaginés par un panel d'utilisateurs, permettrait de définir un ensemble de prédicats spatio-temporels cognitifs innés. La suite du travail consisterait alors à rechercher une formalisation univoque en configurations de vie et de mouvement de ce jeu de prédicats spatio-temporels.

Cette étape de recherche nécessitera sans doute d'intégrer certaines perspectives précédemment évoquées dans ce chapitre. La gestion des relations sur un historique de présence ou de géométries d'objets plus complexes seront sans doute utiles à la formalisation des prédicats spatio-temporels proposées par le panel d'utilisateurs. Nous pensons que cette perspective ouvre de réelles voies de recherche futures. Elle fait notamment l'objet de l'établissement d'un projet de recherche auprès du Fond National de la Recherche Scientifique.

C. Développements pratiques

Le développement de ce modèle de représentation d'information spatio-temporelle n'intègre pas encore d'implémentation pratique. Nous avons volontairement choisi de ne pas aborder d'implémentation durant le développement de ce modèle.

En effet, la mise en pratique d'un système d'information intégrant une gestion étendue de l'identité requiert préalablement la validation de ce modèle. La mise en œuvre d'un prototype de calcul et de stockage de configuration de vie et de mouvement nous semble cependant être une étape primordiale de la suite de cette recherche. La recherche fondamentale en modélisation de l'information représente une étape majeure à la réflexion vers de nouveaux systèmes de gestion de données. En effet, c'est sur base de ce type de travaux qu'il est possible d'intégrer de nouvelles perceptions de la spatialité ou la temporalité des données.

D'autre part, la gestion de l'identité fait également l'objet d'une attention particulière pour la suite de nos travaux. Nous pensons qu'une réflexion sur la gestion de celle-ci dans les systèmes orientés-objet représente un point de départ intéressant à la suite de ce travail. Le développement d'un méta-modèle conceptuel, reprenant les concepts définis, pourrait déboucher sur une nouvelle approche de la modélisation spatio-temporelle.

Chapitre X.

Sommaire

Remerciements	I-4
Résumé	I-7
Summary	I-9
Chapitre I. Introduction.....	I-11
1. L'identité, l'espace et le temps.....	I-11
2. Contexte de recherche	I-13
3. Structure de la thèse	I-15
Chapitre II. État de la recherche.....	18
1. De l'identité à l'identité géographique	19
A. Le paradoxe du « bateau de Thésée ».....	19
B. L'identité à travers le temps.....	21
C. L'identité de l'objet informatique	22
D. L'identité de l'objet géographique	24
2. De l'objet à l'objet géographique.....	24
A. Représentation objet.....	25
B. Représentation d'un objet géographique	26

C.	Représentation spatiale	28
3.	Raisonnement spatial	32
A.	Region Connexion Calculus – RCC	33
B.	Binary topological intersection model (9i) – Modèle des 9 intersections	34
C.	Calculus Based Model (CBM) et Dimension Extended Method (DEM)	39
D.	Head-Tail-Body Intersection - D-line Relationships.....	40
4.	Raisonnement temporel.....	41
A.	Le temps comme une succession d'instants	42
B.	Le temps comme une succession d'intervalles	44
C.	Le temps comme un modèle pour l'action et le changement	47
5.	Raisonnement spatio-temporel qualitatif identitaire	50
A.	Identity Based Change.....	50
B.	L'évolution de l'identité dans un environnement virtuel.....	53
6.	Raisonnement spatio-temporel qualitatif.....	55
A.	Combinaisons de logiques spatiales et temporelles	56
B.	Nouvelles méréologies spatio-temporelles.....	62
C.	Approches complémentaires	72
7.	Outils d'aide à la formalisation et au traitement de l'information qualitative.....	73
A.	Représentation de l'espace-temps.....	73
B.	Diagrammes conceptuels de voisinages.....	77
C.	Théorie de la dominance.....	78
Chapitre III.	Objectif de la recherche	83
Chapitre IV.	État spatio-temporel d'un objet.....	92
1.	Hypothèses de travail et postulats.....	93
A.	Retour dans le passé	93
B.	Déplacements instantanés	93
C.	Résurrection	94
2.	Pourquoi étendre l'état identitaire d'un objet ?.....	94
A.	Relations identitaires étendues.....	95
B.	Espace de travail (Workspace)	106

C.	Spatialité des états spatio-temporels.....	108
3.	Définition formelle de l'état d'un objet	108
A.	Logique temporelle	109
B.	Logique objet.....	112
C.	Définition de l' « <i>espace de travail</i> » (Workspace).....	113
D.	Formalisation des états spatio-temporels d'un objet	114
E.	Visualisation conceptuelle.....	116
F.	Pattern représentation.....	123
G.	Organisation des états spatio-temporels identitaires en arbre de décisions	124
H.	Résurrection, réincarnation et non-existence.....	127
4.	Théorie de la dominance appliquée aux relations STS-i	128
A.	Définition des relations de dominance	128
B.	Espace de dominance combiné.....	131
C.	Graphe de dominance	131
D.	Diagramme conceptuel de voisinage	132
5.	Conclusion	135
Chapitre V.	Relations STS-i	137
1.	Introduction.....	137
A.	Les relations entre STS-i et leurs transitions	138
B.	Réflexion sur le temps dans la modélisation du changement.....	140
2.	Relations entre STS-i (STS-i-R)	141
A.	Formalisation des relations entre STS-i.....	141
B.	Représentation des 16 relations STS-i.....	145
3.	Théorie de la dominance appliquée au cas du STS-i	150
A.	Espace de dominance des relations STS-i.....	150
B.	Graphe de dominance.....	151
4.	Diagramme conceptuel de voisinage	153
A.	Deux méthodes de conception	153
B.	Applications particulières dues à la nature SPT des relations.....	155
5.	Conclusion	160

Chapitre VI. Configurations de vie et de mouvement.....	161
1. Introduction.....	161
2. Histoires spatio-temporelles	162
A. Espaces temporels.....	163
B. Parallèle avec les relations SPT	165
C. Relations entre histoires spatio-temporelles et modèles de raisonnements spatio-temporels	166
D. Espaces temporels identitaires	170
3. Configurations de vie et de mouvement (LMC)	173
A. Définition.....	173
B. Etude systématique.....	174
C. Représentation des configurations de vie et de mouvement.....	177
D. Formalisation des histoires spatio-temporelles	181
4. Génération exhaustive de LMC	182
5. Applications et conclusions	185
Chapitre VII. Généralisation de LMC	188
1. Introduction.....	188
A. Limitations de l'utilisation directe des LMC	189
B. Grands jeux de données.....	190
C. Représentation simplifiée	190
D. Perception limitée	190
2. Généralisation de configurations de vie et de mouvement.....	191
A. Raisonnement spatial utilisé lors de la généralisation.....	192
B. Perte d'information dans la généralisation.....	193
3. Généralisation des LMC sur base de relations lignes-lignes	193
A. Principe de généralisation.....	193
B. Règles de conversion de LMC en relation topologique.....	195
C. Relations impossibles	205
4. Généralisation de LMC sur base de relation D-line/D-line.....	209
A. Principe de généralisation.....	209
5. Conclusion	211

Chapitre VIII. Interprétation en langage naturel	212
1. Interprétation et langage naturel.....	212
A. Exemples avec le modèles des 9-i ou RCC.....	213
B. Interprétation en milieu spatio-temporel	216
2. Relations spatio-temporelles généralisées	217
A. Interprétation des 25 relations spatio-temporelles généralisées.....	217
B. Remarques quant à l'interprétation.....	233
3. Interprétation de configurations matricielles	234
A. Choix de propriétés	234
B. Interprétation de prépositions spatio-temporelles	235
4. Conclusion	247
Chapitre IX. Conclusions et perspectives	249
1. Conclusions.....	249
2. Perspectives de recherche future	252
A. Développements théoriques.....	253
B. Développements sémantiques.....	255
C. Développements pratiques	256
Chapitre X. Sommaire	257
Chapitre XI. Bibliographie.....	262
Chapitre XII. Annexes	273
1. Modèle de relation topologique des 9 intersections (9-i).....	273

Chapitre XI.

Bibliographie

- Allen, J. F. (1983). "Maintaining Knowledge about Temporal Intervals." Communications of the ACM - The University of Rochester **26**(11): 832-843.
- Allen, J. F. (1984). "Towards a general theory of action and time." Artificial Intelligence **23**(2): 123-154.
- Allen, J. F. (1991). "Time and time again: the many ways to represent time." International Journal of Intelligent Systems **6**: 341-355.
- Andrew U, F. (1992). "Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space." Journal of Visual Languages & Computing **3**(4): 343-371.
- Asher, N. and L. Vieu (1995). Toward a Geometry for Common Sense: A Semantics and a Complete Axiomatization for Mereotopology. Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, San Francisco, USA, Morgan Kaufmann.
- Audi, R. and C. Reference (1999). The Cambridge dictionary of philosophy, Cambridge university press Cambridge.
- Augusto, J. (2001). "The Logical Approach to Temporal Reasoning." Artificial Intelligence Review **16**(4): 301-333.
- Balbiani, P. and J.-F. Condotta (2001). Une logique pour le raisonnement spatio-temporel basée sur PLTL et l'algèbre des rectangles. Journées nationales sur les modèles de raisonnement (JNMR 2001), France, PRC-GDR I3.
- Balbiani, P. and J.-F. Condotta (2002). Computational Complexity of Propositional Linear Temporal Logics Based on Qualitative Spatial or Temporal Reasoning. 4th International Workshop, FroCoS 2002, Santa Margherita Ligure, Italy, Springer Berlin.

- Balbiani, P. and L. Fariñas Del Cerro (1996). "A relational model of movement." Logique et Analyse **155-156**: 369-378.
- Bennett, B., A. G. Cohn, et al. (2002). "Multi-Dimensional Modal Logic as a Framework for Spatio-Temporal Reasoning." Applied Intelligence **17**(3): 239-251.
- Bennett, S., S. McRobb, et al. (2006). Object-oriented systems analysis and design using UML, McGraw-Hill Berkshire,, UK.
- Billen, R. (2002). Nouvelle perception de la spatialité des objets et de leurs relations. Développement d'une modélisation tridimensionnelle de l'information spatiale. PhD, Université de Liège.
- Billen, R. and E. Clementini (2004). "A model for ternary projective relations between regions." Advances in Database Technology-EDBT 2004: 537-538.
- Billen, R. and E. Clementini (2005). "Introducing a reasoning system based on ternary projective relations." Developments in Spatial Data Handling: 381-394.
- Billen, R. and E. Clementini (2006). Projective Relations in a 3D Environment. Geographic, Information Science: 18-32.
- Billen, R. and Y. Kurata (2008). Refining Topological Relations between Regions Considering Their Shapes. Geographic Information Science: 20-37.
- Bogaert, P. (2008). "A Qualitative Calculus for Moving Point Objects Constrained by Networks."
- Bogaert, P., N. Van de Weghe, et al. (2006). The Qualitative Trajectory Calculus on Networks. Spatal Cognition V, Bremen, Germany, Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI).
- Burrough, P. A. and A. U. Frank (1995). "Concepts and paradigms in spatial information: are current geographical information systems truly generic?" International Journal of Geographical Information Systems **9**(2): 101-116.
- Cai, G. (2007). "Contextualization of Geospatial Database Semantics for Human-GIS Interaction." Geoinformatica **11**(2): 217-237.
- Campos, J., M. J. Egenhofer, et al. (2003). Animation model to Support Exploratory Analysis of Dynamic Environments, Society for Computer Simulation International; 1998.
- Campos, J., K. Hornsby, et al. (2003). "A temporal model of virtual reality objects and their semantics." Journal of Visual Languages & Computing **14**(5): 469-492.
- Carosella, E. D., B. Saint-Sernin, et al. (2008). L'identité changeante de l'individu: la constante construction du soi, Editions L'Harmattan.
- Claramunt, C. and B. Jiang (1998). Hierarchical Reasoning in Time and Space. PROCEEDINGS OF 9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING, Citeseer.
- Claramunt, C. and B. Jiang (2000). Hierarchical reasoning in space and time 9th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH), Beijing, P.R.China.

- Claramunt, C. and B. Jiang (2000). A representation of relationships in temporal spaces. Innovations in GIS VII: GeoComputation. P. Atkinson and D. Martin. London, Taylor & Francis. **7**: 41-53.
- Claramunt, C. and B. Jiang (2001). "An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions." Journal of Geographical Systems **3**(4): 411-428.
- Claramunt, C., B. Jiang, et al. (2000). "A new framework for the integration, analysis and visualisation of urban traffic data within geographic information systems." Transportation Research Part C: Emerging Technologies **8**(1-6): 167-184.
- Claramunt, C. and M. Theriault (1996). "Toward semantics for modelling spatio-temporal processes within GIS." Advances in GIs Research I: 27-43.
- Claramunt, C. and M. Thériault (1995). Managing Time in GIS: An Event-Oriented Approach. Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases, London, UK, Springer-Verlag.
- Claramunt, C., M. Thériault, et al. (1997). "A qualitative representation of evolving spatial entities in two-dimensional topological spaces." Innovations in GIS V, S., Carver (Eds.), Taylor & Francis, London: 119-129.
- Claramunt, C., M. Thériault, et al. (1998). A qualitative representation of evolving spatial entities in Two-dimensional Topological Spaces. Innovation in GIS V. S. Carver. London, Taylor & Francis. **5**: 119-129.
- Clarke, B. L. (1981). A Calculus of Individuals Based on "Connection".
- Clarke, B. L. (1985). "Individuals and points." Notre Dame Journal of Formal Logic **26**(1): 61-75.
- Clementini, E. and R. Billen (2006). "Modeling and computing ternary projective relations between regions." IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering: 799-814.
- Clementini, E. and P. Di Felice (1993). An object calculus for geographic databases. Proceedings of the 1993 ACM/SIGAPP Symposium on applied computing: state of the art and practice, Indianapolis, USA.
- Clementini, E. and P. Di Felice (1995). "A comparison of methods for representing topological relationships." Information Sciences-Applications **3**(3): 149-178.
- Clementini, E. and P. Di Felice (1997). "Approximate topological relations." International Journal of Approximate Reasoning **16**(2): 173-204.
- Clementini, E. and P. Di Felice (1998). "Topological invariants for lines." IEEE Transactions and Knowledge and Data Engineering **10**: 38-54.
- Clementini, E., P. Di Felice, et al. (1993). A Small Set of Formal Topological Relationships Suitable for End-User Interaction. Proceedings of the Third international Symposium on Advances in Spatial Databases, London, Springer-Verlag.
- Clementini, E., P. D. Felice, et al. (1997). "Qualitative representation of positional information." Artificial Intelligence **95**(2): 317-356.

- Codd, E. F. (1982). "Relational database: a practical foundation for productivity." Commun. ACM **25**(2): 109-117.
- Cohn, A., N. Gotts, et al. (1994). "Exploiting Temporal Continuity in Qualitative Spatial Calculi."
- Cohn, A. G. (1996). Calculi for Qualitative Spatial Reasoning. Artificial Intelligence and Symbolic Mathematical Computation. J. Clamet, J. Campell and J. Pfalzgraf. Berlin, Springer-Verlag: 124-143.
- Cohn, A. G., B. Bennett, et al. (1997). "Qualitative Spatial Representation and Reasoning with the Region Connection Calculus." Geoinformatica **1**: 275-316.
- Cohn, A. G., B. Bennett, et al. (1997). Representing and Reasoning with Qualitative Spatial Relations about Regions. Temporal and spatial reasoning. O. Stock. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Cohn, A. G., N. M. Gotts, et al. (1997). Exploiting Temporal Continuity in Qualitative Spatial Calculi. Spatial and Temporal Reasoning in Geographical Information Systems. R. G. Golledge and M. Egenhofer. California, USA, Elsevier.
- Cohn, A. G. and S. M. Hazarika (2001). "Qualitative Spatial Representation and Reasoning: An Overview." Fundamenta Informaticae **46**(1-2): 1-29.
- Delafontaine, M., P. Bogaert, et al. (2011). "Inferring additional knowledge from QTCN relations." Information Sciences **181**(9): 1573-1590.
- Delafontaine, M., N. Van de Weghe, et al. (2008). "Qualitative relations between moving objects in a network changing its topological relations." Information Sciences **178**(8): 1997-2006.
- DeWitt, M. A. F. B. D. and K. D. D. M. S. Zdonik (1990). The Object-Oriented Database System Manifesto, Assn for Computing Machinery.
- Duckham, M., J. Lingham, et al. (2006). "Qualitative reasoning about consistency in geographic information." Information Sciences **176**(6): 601-627.
- Dupenois, M. and A. Galton (2009). Assigning Footprints to Dot Sets: An Analytical Survey. Spatial Information Theory. K. Hornsby, C. Claramunt, M. Denis and G. Ligozat, Springer Berlin / Heidelberg. **5756**: 227-244.
- Egenhofer, M. (1989). A formal definition of Binary Topological Relationships. Third International Conference on Foundations of Data Organization and Algorithms (FODO), Paris, France, Springer-Verlag.
- Egenhofer, M. (1989). A formal definition of binary topological relationships. Foundations of Data Organization and Algorithms. W. Litwin and H.-J. Schek, Springer Berlin / Heidelberg. **367**: 457-472.
- Egenhofer, M. (1991). Reasoning about Binary Topological Relations. Proceedings of the Second international Symposium on Advances in Spatial Databases, London, Springer-Verlag.

- Egenhofer, M. (1993). "A Model for Detailed Binary Topological Relationships." Geomatica **47**(3-4): 261-273.
- Egenhofer, M. and J. Herring (1990). Categorizing Binary Topological Relations Between Regions, Lines and Points in Geographic Databases. Technical Report, Department of Surveying Engineering, University of Maine: 28.
- Egenhofer, M. and D. Mark (1995). Naive Geography
- Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS. A. Frank and W. Kuhn, Springer Berlin / Heidelberg. **988**: 1-15.
- Egenhofer, M. and D. M. Mark (1995). "Modeling Conceptual Neighborhood of Topological Line-Region Relations." International Journal of Geographic Information Systems **9**(5): 555-565.
- Egenhofer, M. J. (1994). "Deriving the composition of binary topological relations." Journal of Visual Languages and Computing **5**(2): 133-149.
- Egenhofer, M. J., E. Clementini, et al. (1994). "Topological Relations between Regions with Holes." International Journal of Geographical Information Systems **8**(2): 129-142.
- Egenhofer, M. J. and A. R. B. M. Shariff (1998). "Metric details for natural-language spatial relations." Transactions on Information Systems **16**(4): 295-321.
- Einstein, A., L. Infeld, et al. (1951). L'évolution des idées en physique: des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta, Flammarion.
- Ferret, S. (1996). Le bateau de Thésée: le problème de l'identité à travers le temps, Éditions de Minuit.
- Freksa, C. (1991). Conceptual Neighborhood and its role in temporal and spatial reasoning. Proceedings of the IMACS Workshop on Decision Support System and Qualitative Reasoning, Amsterdam, Holland.
- Freksa, C. (1991). Qualitative Spatial Reasoning. Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space. D. M. Mark, A. U. Frank. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers: 361-372.
- Freksa, C. (1992). "Temporal reasoning based on semi-intervals." Artificial Intelligence **54**(1-2): 199-227.
- Freksa, C. (1992). Using orientation information for qualitative spatial reasoning. Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space. A. Frank, C. I. and F. U. Berlin, Springer-Verlag. **639**: 162-178.
- Gale, R. M. (1968). The language of time, Routledge & Kegan Paul Books.
- Galton, A. (1990). "A critical examination of Allen's theory of action and time." Artificial Intelligence **42**(2-3): 159-188.

- Galton, A. (1995). A qualitative approach to continuity. Proceedings of the 5th International Workshop on Time, Space and Movement: Meaning and Knowledge in the Sensible World (TSM'95), Toulouse, France.
- Galton, A. (1995). Towards a qualitative theory of movement. Spatial Information Theory: a theoretical basis for GIS. W. Kuhn and A. Frank, Berlin, Springer Verlag. **988**: 377-396.
- Galton, A. (1997). Continuous change in spatial regions. Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS. S. Hirtle and A. Frank, Springer Berlin / Heidelberg. **1329**: 1-13.
- Galton, A. (2000). Qualitative spatial change, Oxford University Press.
- Galton, A. (2001). "Dominance Diagrams: A Tool for Qualitative Reasoning About Continuous Systems." Fundamenta Informaticae **46**(1/2): 55.
- Galton, A. (2001). "Dominance Diagrams: A Tool for Qualitative Reasoning About Continuous Systems." Fundam. Inf. **46**(1-2): 55-70.
- Galton, A. (2004). "Fields and objects in space, time, and space-time." Spatial Cognition & Computation **4**(1): 39-68.
- Galton, A. (2007). "Experience and history: Processes and their relation to events." Journal of Logic and Computation.
- Galton, A. (2011). "Time flies but space does not: Limits to the spatialisation of time." Journal of Pragmatics **In Press, Corrected Proof**.
- Galton, A. and J. Augusto (2002). Two Approaches to Event Definition Database and Expert Systems Applications. A. Hameurlain, R. Cicchetti and R. Traunmüller, Springer Berlin / Heidelberg. **2453**: 705-714.
- Galton, A. and M. Duckham (2006). What Is the Region Occupied by a Set of Points? Geographic Information Science. M. Raubal, H. Miller, A. Frank and M. Goodchild, Springer Berlin / Heidelberg. **4197**: 81-98.
- Gehani, N. H., H. Jagadish, et al. (1992). Composite Event Specification in Active Databases: Model & Implementation, Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Gerevini, A. (1997). Reasoning about time and actions in AI. Spatial and Temporal Reasoning. O. Stock. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher: 43-70.
- Gerevini, A. and B. Nebel (2002). Qualitative Spatio-Temporal Reasoning with RCC-8 and Allen's Interval Calculus: Computational Complexity. ECAI 2002, IOS Press.
- Gottfried, B. (2008). "Representing short-term observations of moving objects by a simple visual language." Journal of Visual Languages & Computing **19**(3): 321-342.
- Gotts, N. M., J. M. Gooday, et al. (1996). "A connection based approach to common-sense topological description and reasoning." The Monist **79**(1): 51-75.

- Gröger, G., T. Kolbe, et al. (2006). "Candidate OpenGIS® CityGML Implementation Specification (City Geography Markup Language)." Open Geospatial Consortium Inc, OGC.
- Hägerstrand, T. (1967). Innovation Diffusion as Spatial Process. Chicago, USA, The University of Chicago Press.
- Hallot, P. and R. Billen (2009). A pyramidal classification of ST relationship models. Proceedings of the 3th Workshop on Behaviour Monitoring and Interpretation, Ghent, Belgium.
- Hayes, P. (1990). Naive physics I: ontology for liquids. Readings in qualitative reasoning about physical systems, Morgan Kaufmann Publishers Inc.: 484-502.
- Hazarika, S. and A. Cohn (2001). Qualitative Spatio-Temporal Continuity. Spatial Information Theory: 92-107.
- Hazarika, S. and A. Cohn (2001). Qualitative Spatio-Temporal Continuity. Spatial Information Theory. D. Montello, Springer Berlin / Heidelberg. **2205**: 92-107.
- Hazarika, S. M. (2005). Qualitative Spatial Change: Space-time Histories and Continuity. PhD PhD, University of Leeds.
- Heller, M. (1990). The ontology of physical objects: Four-dimensional hunks of matter, Cambridge Univ Pr.
- Hernández, D. (1994). Qualitative representation of spatial knowledge. Berlin ; New York, Springer-Verlag.
- Hornsby, K. and M. Egenhofer (1997). Qualitative Representation of Change. Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS. S. Hirtle and A. Frank, Springer-Verlag. **1329**: 15-33.
- Hornsby, K. and M. Egenhofer (1998). Identity-based change operations for composite objects. 8th International Symposium on Spatial Data Handling, Vancouver, Canada : International Geographical Union.
- Hornsby, K., M. Egenhofer, et al. (1999). Modeling Cyclic Change. Advances in Conceptual Modeling. P. Chen, D. Embley, J. Kouloumdjian, S. Liddle and J. Roddick, Springer Berlin / Heidelberg. **1727**: 98-109.
- Hornsby, K. and M. J. Egenhofer (2000). "Identity-based change: a foundation for spatio-temporal knowledge representation." International Journal of Geographical Information Science **14**(3): 207 - 224.
- Hornsby, K. and K. King (2008). "Modeling Motion Relations for Moving Objects on Road Networks." Geoinformatica **12**(4): 477-495.
- Kay, A. C. (1996). The early history of Smalltalk. History of programming languages---II. Thomas J. Bergin, Jr. and Richard G. Gibson, Jr., ACM: 511-598.
- Khoshafian, S. and A. B. Baker (1994). Multimedia and imaging databases, Morgan Kaufmann Publishers Inc.

- Khoshafian, S. and G. Copeland (1986). "Object identity." ACM SIGPLAN Notices **21**(11): 406-416.
- Kim, W. (1990). "Introduction to object-oriented databases."
- Kim, W. (2002). "Object-oriented databases: Definition and research directions." Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on **2**(3): 327-341.
- Klippel, A. and D. R. Montello (2007). Linguistic and nonlinguistic turn direction concepts. Proceedings of the 8th international conference on Spatial information theory. Melbourne, Australia, Springer-Verlag: 354-372.
- Klippel, A., M. Worboys, et al. (2006). Conceptual Neighborhood Blindness—On the Cognitive Adequacy of Gradual Topological Changes. Spatial Cognition - Workshop on Talking about and perceiving moving objects: exploring the bridge between natural language, perception and formal ontologies of space, Bremen, Germany.
- Kontchakov, A., A. Kurucz, et al. (2007). Spatial logic + temporal logic = ? The Logic of Space. M. Aiello, I. Pratt-Hartmann and J. van Benthem, Kluwer: 72.
- Kurata, Y. (2007). Arow symbols: Theory for interpretation. PhD, The University of Maine.
- Kurata, Y. and M. Egenhofer (2006). The Head-Body-Tail Intersections for Spatial Relations between Directed Line Segments. Fourth International Conference on Geographic Information Science (GIScience'06), Muenster, Germany, Lecture Notes in Computer Science.
- Kurata, Y. and M. Egenhofer (2007). The 9+-intersection for Topological Relations between a Directed Line Segment and a Region. Workshop on Behaviour Monitoring and Interpretation (BMI'07), Osnabrück, Germany, University of Bremen, TZI Technical Report.
- Laube, P., M. Kreveld, et al. (2005). Finding REMO — Detecting Relative Motion Patterns in Geospatial Lifelines. Developments in Spatial Data Handling: 201-215.
- Lawson, S., E. Van Der Zee, et al. (2009). "Spatial language in computer mediated communication." Exploration of space, technology, and spatiality: 165-178.
- Le Ber, F., G. Ligozat, et al., Eds. (2007). Raisonnements sur l'espace et le temps : des modèles aux applications, Lavoisier.
- Ligozat, G. (2006). "Raisonnement spatial qualitatif." Retrieved 16/08, 2006, from <http://www.limsi.fr/RS98FF/CHM98FF/LC98FF/lc9.html>
- Manna, Z. and A. Pnueli (1992). The temporal logic of reactive and concurrent systems. Berlin, Springer-Verlag.
- Mark, D. M. and M. J. Egenhofer (1994). Calibrating the meanings of spatial predicates from natural language: Line-region relations. Spatial Data Handling.
- Mc Dermott, D. (1982). "A temporal logic for reasoning about processes and plans." Cognitive Science **6**(2): 101-155.

- McCarthy, J. M. and P. Hayes (1969). "Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence." Machine Intelligence **4**: 463-502.
- McDermott, D. (1997). Probabilistic Projection in Planning
Spatial and Temporal Reasoning. O. Stock, Springer Netherlands: 247-287.
- Miller, H. J. (2005). "A Measurement Theory for Time Geography." Geographical Analysis **37**: 17-45.
- Motakis, I. and C. Zaniolo (1995). Composite temporal events in active database rules: A logic-oriented approach. Deductive and Object-Oriented Databases. T. Ling, A. Mendelzon and L. Vieille, Springer Berlin / Heidelberg. **1013**: 19-37.
- Muller, P. (1998). Éléments d'une théorie du mouvement pour la formalisation du raisonnement spatio-temporel de sens commun PhD, Université Paul Sabatier.
- Muller, P. (1999). "Raisonnement spatial qualitatif : le cas du mouvement." Revue d'intelligence artificielle **13**(2): 325-353.
- Nabil, M., J. Shepherd, et al. (1995). 2D projection interval relationships: A symbolic representation of spatial relationships
Advances in Spatial Databases. M. Egenhofer and J. Herring, Springer Berlin / Heidelberg. **951**: 292-309.
- Noyon, V. (2007). Modèle de vue relative et spatio-temporelle de trajectoires géographiques d'objets mobiles: Application au contexte maritime. PhD, ENSAM.
- Noyon, V., C. Claramunt, et al. (2007). "A Relative Representation of Trajectories in Geographical Spaces." Geoinformatica **11**(4): 479-496.
- Pani, A. K. and G. P. Bhattacharjee (2001). "Temporal representation and reasoning in artificial intelligence: A review." Mathematical and Computer Modelling **34**(1-2): 50-80.
- Pantazis, D. and J.-P. Donnay (1996). La conception de SIG méthode et formalisme. Paris, Hermes.
- Parent, C., S. Spaccapietra, et al. (1999). Spatio-temporal conceptual models: data structures+ space+ time, ACM New York, NY, USA.
- Peuquet, D. J. (1994). "It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems." Annals of the Association of American Geographers **84**(3): 411-461.
- Praing, R. and M. Schneider (2007). Modeling Historical and Future Spatio-temporal Relationships of Moving Objects in Databases. Advances in Conceptual Modeling – Foundations and Applications. J.-L. Hainaut, E. Rundensteiner, M. Kirchberger et al, Springer Berlin / Heidelberg. **4802**: 318-327.
- Randell, D. A., Z. Cui, et al. (1992). A Spatial Logic Based on Regions and Connection. Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Third International Conference, San Mateo, California, Morgan Kaufmann.

- Randell, D. A. and M. Witkowski (2004). Tracking Regions using Conceptual Neighbourhoods. Proceedings of the Workshop on Spatial and Temporal Reasoning ECAI - 2004.
- Roddick, J. F., E. Hoel, et al. (2004). "Spatial, temporal and spatio-temporal databases - hot issues and directions for phd research." SIGMOD Rec. ACM Special Interest Group on Management of Data **33**(2): 126-131.
- Shih, T. K. (1998). "On computing temporal/spatial relations." Information Sciences **107**(1-4): 37-61.
- Smith, B. and D. M. Mark (1998). Ontology and Geographic Kinds. Spatial Data Handling, Vancouver, Canada.
- Smith, B. and A. Varzi (1997). "Fiat and bona fide boundaries: Towards an ontology of spatially extended objects." Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS: 103-119.
- Smith, B. C. (1998). On the origin of objects. USA, MIT Press.
- Smith, J. and D. Smith (1982). Principles of database conceptual design
Data Base Design Techniques I. S. Yao, S. Navathe, J. Weldon and T. Kunii, Springer Berlin / Heidelberg. **132**: 114-146.
- Song, Y. and D. K. H. Chua (2005). "Detection of spatio-temporal conflicts on a temporal 3D space system." Advances in Engineering Software **36**(11): 814-826.
- Stell, J. and J. Webster (2007). "Oriented matroids as a foundation for space in GIS." Computers, Environment and Urban Systems **31**(4): 379-392.
- Thériault, M., C. Claramunt, et al. (1999). A Spatio-temporal taxonomy for the Representation of Spatial Set Behaviours. Spatio-temporal database management : International Workshop STDBM'99, Edinburgh, Scotland, Springer.
- Traugott, E. C. (1978). "On the expression of spatio-temporal relations in language." Universals of human language **3**: 369-400.
- Trudel, A. (1996). "Representing Allen's properties, events, and processes." Applied Intelligence **6**(1): 59-65.
- van Benthem, J. (1983). The logic of time, Kluwer Academic Publishers.
- van Benthem, J. (1989). Time, logic and computation
Linear Time, Branching Time and Partial Order in Logics and Models for Concurrency. J. de Bakker, W. de Roever and G. Rozenberg, Springer Berlin / Heidelberg. **354**: 1-49.
- Van de Weghe, N. (2004). Representing and Reasoning about Moving Objects: A Qualitative Approach (Volume I) PhD, Ghent University.
- Van de Weghe, N., A. G. Cohn, et al. (2004). "Representation of moving objects along a road network." Proc. of Geoinformatics: 187-197.

- Van de Weghe, N., A. G. Cohn, et al. (2004). Representation of moving objects along road network. 12th International Conference on Geoinformatics - Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic, University of Gäve, Sweden.
- Van de Weghe, N., A. G. Cohn, et al. (2006). "A Qualitative Trajectory Calculus as a Basis for Representing Moving Objects in Geographical Information Systems." Control and Cybernetics **35**(1).
- Van de Weghe, N., B. Kuijpers, et al. (2005). "A qualitative trajectory calculus and the composition of its relations." LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE **3799**: 60.
- Vasardani, M. and M. Egenhofer (2009). Comparing Relations with a Multi-holed Region
Spatial Information Theory. K. Hornsby, C. Claramunt, M. Denis and G. Ligozat, Springer Berlin / Heidelberg. **5756**: 159-176.
- Wolter, F. and M. Zakharyashev (2000). Spatio-temporal representation and reasoning based on RCC-8. Seventh Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR2000, Breckenridge, USA, Morgan Kaufmann.
- Wolter, F. and M. Zakharyashev (2001). Qualitative spatio-temporal representation and reasoning: a computational perspective. Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium. G. Lakemeyer and B. Nebel, Morgan Kaufmann: 41.
- Worboys, M. (2001). "Modelling changes and events in dynamic spatial systems with reference to socio-economic units." Life and Motion of Socio-Economic Units: 129–138.
- Worboys, M. (2005). "Event-oriented approaches to geographic phenomena." International Journal of Geographical Information Science **19**(1): 1 - 28.
- Worboys, M., M. Duckham, et al. (2004). "Commonsense Notions of Proximity and Direction in Environmental Space." Spatial Cognition & Computation **4**(4): 285-312.
- Worboys, M. and K. Hornsby (2004). From Objects to Events: GEM, the Geospatial Event Model. Geographic Information Science. M. J. Egenhofer, C. Freksa and H. J. Miller, Springer Berlin / Heidelberg. **3234**: 327-343.
- Worboys, M. F., H. M. Hearnshaw, et al. (2006). "Object-oriented data modelling for spatial databases." Classics from IJGIS: twenty years of the International journal of geographical information science and systems **4**(4): 119.
- Yoav, S. (1987). "Temporal logics in AI: Semantical and ontological considerations." Artificial Intelligence **33**(1): 89-104.
- Zalta, E. (2006). "The stanford encyclopedia of philosophy." College & research libraries news **67**(8): 502.
- Zimmermann, K. and C. Freksa (1996). "Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge." Applied Intelligence **6**(1): 49-58.

Chapitre XII.

Annexes

1. Modèle de relation topologique des 9 intersections (9-i)

Le modèle de relations topologique entre deux objets décrit également un ensemble de conditions négatives qui permettent de définir les conditions d'existence de relations entre deux objets. La recherche d'une réalité physique de chaque relation n'est effectuée qu'en déduisant au départ les relations dont on sait directement vérifier qu'elles ne sont pas possibles. L'ensemble théorique des relations du modèle des 9 intersections est de $2^9(512)$ relations. Or il n'existe que 8 relations topologiques possibles entre deux régions. Les conditions négatives suivantes permettent de réduire l'ensemble des relations possibles uniquement vers celles qui possèdent une réalité physique.

Dans le cas des relations entre deux régions, les conditions suivantes sont proposées :

- Condition 1 : Les extérieurs de deux objets sont toujours en intersection :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & \emptyset \end{pmatrix} \quad (12.1)$$

- Condition 2 : Si les intérieurs de deux objets ne sont pas en intersection, alors l'intérieur de A est en intersection avec l'extérieur de B, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} \emptyset & - & \emptyset \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ - & - & - \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \quad (12.2)$$

- Condition 3 : Si l'intérieur de A est en sous-ensemble de la fermeture de B, alors la frontière de A doit être également un sous ensemble de la fermeture de B, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & - & \emptyset \\ - & - & \neg\emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ \emptyset & \neg\emptyset & - \end{pmatrix} \quad (12.3)$$

- Condition 4 : Si l'intérieur de A est en intersection avec la frontière de B alors il doit également être en intersection avec l'extérieur de B, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & \neg\emptyset & \emptyset \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ \neg\emptyset & - & - \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \quad (12.4)$$

- Condition 5 : La frontière de A est en intersection avec au moins une composante de B, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & - & - \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & \emptyset & - \\ - & \emptyset & - \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix} \quad (12.5)$$

- Condition 6 : Si les deux intérieurs ne sont pas en intersection, alors la frontière de A ne peut pas être en intersection avec l'intérieur de B, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} \emptyset & \neg\emptyset & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ \neg\emptyset & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \quad (12.6)$$

- Condition 7 : Si l'intérieur de A est en intersection avec l'intérieur et l'extérieur de B, alors il est également en intersection avec la frontière de B, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} \neg\emptyset & - & - \\ \emptyset & - & - \\ \neg\emptyset & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ - & - & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \quad (12.7)$$

- Condition 8 : Si les deux frontières ne sont pas en intersection, alors au moins une des deux frontières est en intersection avec l'extérieur de l'autre objet :

$$R_{(\emptyset, -\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & \emptyset & \emptyset \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix} \quad (12.8)$$

- Condition 9 : Si les deux intérieurs ne sont pas en intersection, alors au moins une des frontières des deux objets est en intersection avec l'extérieur de l'autre objet :

$$R_{(\emptyset, -\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ - & - & \emptyset \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix} \quad (12.9)$$

Si les régions ne contiennent pas de trou, alors il existe d'autres conditions d'existences. En effet, la condition d'existence d'une région non trouée, i.e. avec une frontière composée d'un seul élément continu, est plus restrictive qu'une région générale (Egenhofer, Clementini et al. 1994; Vasardani and Egenhofer 2009).

- Condition 10 : Si les deux frontières sont en intersection avec l'autre intérieur, alors les frontières doivent également être en intersection :

$$R_{(\emptyset, -\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & -\emptyset & - \\ -\emptyset & \emptyset & - \\ - & - & - \end{pmatrix} \quad (12.10)$$

- Condition 11 : Si l'intérieur de A est en intersection avec l'extérieur de B, alors la frontière de A doit également être en intersection avec l'extérieur de B :

$$R_{(\emptyset, -\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & - & -\emptyset \\ - & - & \emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ -\emptyset & \emptyset & - \end{pmatrix} \quad (12.11)$$

- Condition 12 : Si les intérieurs ne sont pas en intersection, alors la frontière de A doit être en intersection avec l'extérieur de B, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, -\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ - & - & - \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} \emptyset & - & - \\ - & - & \emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \quad (12.12)$$

Le cas des relations entre deux lignes peut être traité de la même manière. Considérant que les lignes sont des cells non vides possédant des frontières non nulles, alors les conditions (12.1), (12.2), (12.3), (12.4), (12.5) restent d'application. On peut cependant énoncer trois conditions supplémentaires dans le cas de deux lignes simples. Nous verrons par la suite que

ces conditions négatives peuvent être étendues dans un contexte spatio-temporel. C'est en partie la raison de leur explication détaillée dans cette section.

- Condition 13 : Si la fermeture de A est un sous-ensemble de l'intérieur de B, alors l'extérieur de A n'est ni en intersection avec la frontière et l'intérieur de B, ni les deux, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & - & \emptyset \\ - & - & - \\ \emptyset & - & \neg\emptyset \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & \emptyset \\ - & - & \neg\emptyset \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & \emptyset \\ - & - & - \\ \neg\emptyset & \emptyset & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & \neg\emptyset \\ - & - & \emptyset \\ \emptyset & - & - \end{pmatrix} \quad (12.13)$$

- Condition 14 : Chaque frontière peut être en intersection avec au plus deux constituants d'un objet :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & \neg\emptyset & - \\ - & \neg\emptyset & - \\ - & \neg\emptyset & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \quad (12.14)$$

- Condition 15 : Si la frontière de A est un sous-ensemble de la frontière de B, alors les deux frontières coïncident, et vice-versa :

$$R_{(\emptyset, \neg\emptyset)}(A, B) \neq \begin{pmatrix} - & \neg\emptyset & - \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ - & - & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & - & - \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ - & \neg\emptyset & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & \emptyset & - \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & - \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} - & \emptyset & - \\ - & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ - & \emptyset & - \end{pmatrix} \quad (12.15)$$