

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des sciences
Sciences géographiques

Relations spatio-temporelles dans un espace-temps primitif

**Un essai de simplification
de l'analyse spatio-temporelle**

Mémoire présenté par

Pierre HALLOT

pour l'obtention du titre de

master en sciences géographiques

orientation géomatique et géométrologie

à finalité spécialisée en géomatique appliquée

Année académique

2005 – 2006

Remerciements

*Qu'il me soit ici permis de remercier mon promoteur, le Professeur Roland Billen
pour les nombreuses discussions que nous avons eues ensemble,
pour ses éclaircissements, ses commentaires et ses critiques toujours constructives,
et enfin pour sa perpétuelle motivation.*

*Je tiens également à remercier mes lecteurs, le Professeur Jean-Paul Donnay
pour ses conseils et, sans qui, je ne serais pas là aujourd'hui.
Toute ma gratitude va également au Professeur Thierry Bastin
qui a généreusement accepté de faire partie de mon jury et de lire ce mémoire.*

*Toute mon amitié va à Delphine, Stéphanie, François, Christophe et Benoît
pour leur soutien pendant la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie tout particulièrement mes parents et ma famille
qui m'ont toujours soutenu dans mes études et mon travail.
Enfin, une attention toute particulière à ma future épouse
pour sa patience et sa compréhension.*

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières	4
I. Introduction	6
II. État de l'art.....	7
a. Raisonnement spatial qualitatif	7
b. Modèles de relations spatiales.....	9
i. Modèle de relations topologiques des 9 intersections.....	11
ii. Dimension extended method et Calculus based method	15
iii. Region connection calculus (RCC)	17
c. Modèles de relations temporelles	19
i. The Situation Calculus (SC).....	19
ii. Logique temporelle de McDERMOTT	20
iii. ALLEN'S intervals.....	20
d. Diagramme conceptuel de voisinage – Conceptual Neighborhood Diagram (CND).....	23
e. Modèles de relations spatio-temporelles	24
i. Spatio-temporal constraint calculus (STCC)	24
ii. Topology of space-time	25
iii. Qualitative Trajectory Calculus	25
f. Espaces-temps primitifs	27
III. Objectif du mémoire	29
IV. Relations spatio-temporelles dans un modèle d'espace temporel	30
a. Espace temporel.....	30
b. Description des relations spatio-temporelles	32
i. Objets ponctuels (0D) statiques dans un espace linéaire (1D)	32

V.	Généralisation dans un espace-temps primitif	36
a.	Principe.....	36
b.	Généralisation	36
i.	Élaboration du modèle	36
ii.	Étude d'intérêt - Utilisations possible	39
c.	Objets ponctuels (OD) dynamiques dans un espace linéaire (1D)	42
VI.	Développements futurs.....	47
a.	Modèle dynamique	47
b.	Evolution des dimensions	47
c.	Choix de relations spatiales plus descriptives	47
VII.	Conclusions	48
VIII.	Bibliographie	49
IX.	Bibliographie consultée.....	52
X.	Liste des annexes	55

I. Introduction

Un être humain est une partie du tout que nous appelons "Univers"...

Une partie limitée dans le Temps et dans l'Espace.

(Albert Einstein)

L'acquisition de données a toujours été une des préoccupations majeures des géomaticiens. Pour ce faire, ils ont développé de multiples techniques d'acquisition allant du levé de terrain à la restitution satellitaire. Aujourd'hui, à l'heure des systèmes de positionnements par satellite, il devient de plus en plus facile d'acquérir un grand nombre de données. Cette information géographique, de plus en plus précise, est localisée dans l'espace. Un grand nombre d'applications utilise ces données comme par exemple les systèmes d'informations géographiques (Pantazis and Donnay, 1996).

Cependant, le monde dans lequel nous vivons n'est pas figé, il évolue, change, se transforme continuellement. L'information utilisée pour le décrire, ainsi que les systèmes pour l'analyser ne doivent donc pas être que spatiaux mais également temporels. Le temps a toujours été une notion complexe, déjà étudié durant l'antiquité comme en témoigne une littérature abondante sur le sujet. Les techniques d'acquisition d'informations actuelles ne se contentent donc plus que de données spatiales, elles récoltent des données spatio-temporelles. Citons par exemple les GPS-embarqués qui deviennent de plus en plus communs.

Le temps et l'espace sont intimement liés, en effet, les premières théories de raisonnement spatial dérivent du raisonnement temporel. Actuellement, les recherches portent sur le développement de modèles de relations spatio-temporelles qui permettraient d'exploiter pleinement toutes les capacités de l'énorme quantité de données à dispositions des utilisateurs. Cependant, nous pouvons constater que l'ajout du temps dans les analyses spatiales augmente rapidement et fortement la complexité des modèles. Cette complexité va même parfois jusqu'à limiter ou empêcher l'analyse.

Le travail que nous présentons ici a pour but d'imaginer une méthode qui pourrait simplifier l'analyse spatio-temporelle en revenant aux fondements des notions de temps et d'espace. Pour ce faire, nous commençons par donner un aperçu du raisonnement spatial et des principaux modèles de relations. Nous décrivons ensuite de la même manière les modèles temporels et présentons enfin les espaces temps primitifs indispensables dans la suite de notre analyse. Le chapitre suivant décrit une proposition de généralisation de relations spatio-temporelles pour des objets statiques et donne les principales étapes de l'analyse pour des objets dynamiques, le tout dans un espace linéaire. Il y est également discuté la pertinence d'une telle généralisation. Le dernier chapitre est consacré à proposer plusieurs pistes pour la suite de cette recherche, si elle montre un intérêt. Enfin, nous concluons.

II. État de l'art

a. Raisonnement spatial qualitatif

Lorsque nous souhaitons effectuer un raisonnement, nous avons le choix d'utiliser plusieurs types d'approches. D'une part, nous pouvons raisonner directement sur la réalité (world-based approach) ou sur une abstraction du monde physique (model-based approach) (Freksa, 1991b). Dans certains cas, il est beaucoup plus intéressant de directement pouvoir tester certaines tâches en conditions réelles, comme par exemple trouver la bonne clé pour une serrure. Dans une telle situation, il est plus intéressant de directement travailler dans le monde réel que de passer par une modélisation. Cependant, dans beaucoup d'autres situations, il serait soit trop cher, soit trop compliqué de travailler directement dans le monde réel. Dans ce cas, il est nécessaire de pouvoir modéliser le monde réel. On peut de la sorte ignorer les difficultés engendrées par la taille, la distance, le poids, le coût, etc. L'abstraction permet surtout de s'abstraire de l'ensemble des données qui ne sont pas directement nécessaires à la compréhension et à la réalisation de la tâche demandée (Cohn and Hazarika, 2001).

Lors de la modélisation, deux types de données peuvent être considérés ; Premièrement, des données quantitatives qui sont le résultat de mesures, deuxièmement des données qualitatives qui sont le résultat d'une classification, d'une simplification, d'un groupement, de traitements,... des précédentes. L'utilisation de données quantitatives engendre des difficultés et sont parfois inadaptées (Balbiani and Muller, 2000). HERNÁNDEZ énonce certains problèmes liés à l'utilisation de données quantitatives (Hernández, 1994) :

- * L'utilisation de données numériques peut entraîner un coût de calcul plus important ;
- * Certaines informations comme l'égalité entre deux variables peut être perdue lorsqu'on force une variable à prendre une valeur numérique ;
- * Les données numériques posent problèmes avec l'utilisateur final du système qui effectue une très grande majorité de requêtes de type qualitative.

L'utilisation de données qualitatives quant à elle, pose beaucoup moins de problèmes. FRESKA qualifie le grand avantage des représentations qualitatives pour les systèmes cognitifs comme étant indépendantes de valeurs spécifiques et de granularités de représentations ; en fonction de la situation, du contexte et de la granularité des connaissances disponibles, elles correspondent à des entités plus spécifiques ou plus généralisées (Freksa, 1991b). D'autre part, la majeure partie de nos connaissances spatiales sont qualitatives (Vieu, 1997). Par exemple, nous savons que la France est plus grande que la Belgique. Nous retenons une relation de type « supérieur à ». Personne ne raisonne en se disant : « La superficie de la France est de 675417 km² et la superficie de la Belgique est de 30528 km² ». Encore une fois, la comparaison de ces valeurs quantitatives

sera sans doute traduite dans le langage commun par une relation qualitative entre ces deux valeurs numériques : « La France a donc une superficie supérieure à celle de la Belgique ».

L'atout d'utiliser des données qualitatives vient sans doute de l'idée selon laquelle une distinction entre deux valeurs n'est effectuée si et seulement si elle est significative dans le contexte de la recherche en cours (Clementini et al., 1997, Cohn, 1996, Van de Weghe, 2004). Le raisonnement qualitatif ne va donc travailler que sur l'essence nécessaire de l'information représentée par un petit nombre de symboles comme par exemple les « quantity spaces » (Kontchakov et al., to appear). Ces trois valeurs représentent une classification avec comme référence la valeur 0 et les deux ensembles voisins non bornés + et -. Sur base de ces « quantity spaces », il est possible d'effectuer un raisonnement qualitatif. VAN DE WEGHE prend comme exemple une voiture et un cycliste qui circulent sans que nous ne connaissions précisément la vitesse de ceux-ci. Nous savons cependant que la voiture circule plus rapidement que le cycliste. La relation entre les deux objets peut être qualifiée par +, ce qui signifie que la voiture circule plus vite que le cycliste, elle peut également être qualifiée par - ce qui signifierait que le cycliste circule moins vite. Si les deux véhiculent circulaient à la même vitesse, la relation pourrait être notée comme 0 (Van de Weghe, 2004). Il est par contre sûr que pour passer de la relation - à la relation +, il est impérativement nécessaire de passer par la relation 0. Ceci explique la notion de continuité qui est respectée par la plupart des systèmes de raisonnements qualitatifs. FORBUS décrit cette continuité comme : « Continuity is a formal way of enforcing the intuition that things change smoothly : A simple consequence of continuity, respected by all systems of qualitative physics, is that, in changing, a quantity must pass through all intermediate values. That is, if $A < B$ at time t_1 , then it cannot be the case that some later time t_2 $A > B$ holds, unless there was some time t_3 between t_1 and t_2 such that $A = B$ » (Forbus, 1990).

Sur base de ce savoir qualitatif et avec une méthode de raisonnement appropriée, un ordinateur est capable d'effectuer des prévisions, diagnostics et d'expliquer le comportement d'un système physique (Muller, 1998). Un effort important a donc été effectué ces dernières années pour produire des modèles formels qui manipuleraient plus facilement des données spatiales qualitatives que des données spatiales quantitatives dont elles proviennent. Le raisonnement spatial qualitatif fait donc partie du domaine de la représentation des connaissances.

Pour terminer, nous allons donner l'exemple de raisonnement spatial qualitatif énoncé par LIGOZAT (Ligozat, 2006). Il propose la phrase suivante : « La ville de Paris est au sud-ouest de Bruxelles. Bruxelles est au sud de La Haye, et Cologne est à l'est de Bruxelles ».

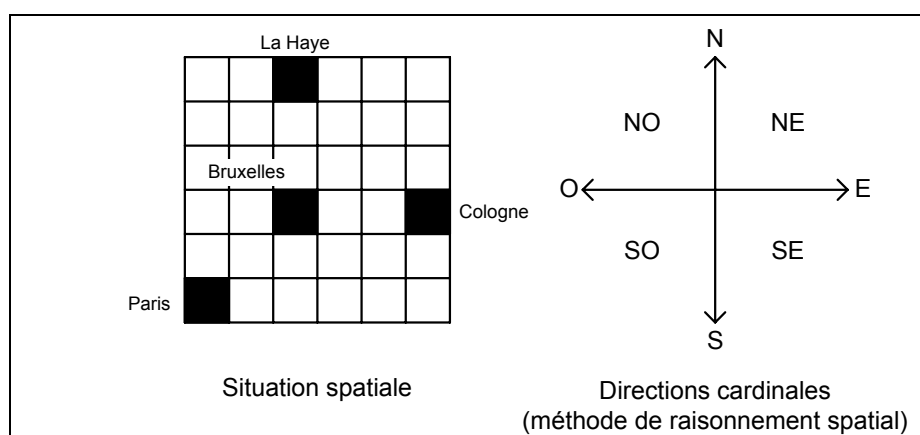


Figure 1: Exemple de raisonnement spatial qualitatif, inspiré de (Ligozat, 2006).

Cette phrase apporte des connaissances qualitatives sur une situation spatiale. Ces connaissances permettent de réaliser ce que l'on appelle des inférences¹, par exemple, le fait que La Haye se situe au nord-est de Paris. Cette inférence est déduite des deux propositions qui sont : « Paris est au sud-ouest de Bruxelles » et « Bruxelles est au sud de La Haye ». Comme on le voit, le raisonnement spatial qualitatif s'intéresse donc à la façon de représenter des connaissances et de formaliser ces inférences. Cet exemple porte sur des connaissances de type directionnel, mais elles peuvent également être de type topologique, de description de forme, de distance qualitative.

La suite de ce chapitre va premièrement décrire les principaux modèles de raisonnement spatial. Ceux-ci, comme on l'a vu précédemment permettent d'effectuer des inférences sur des situations spatiales. Nous passerons ensuite en revue quelques modèles de relations temporelles et enfin nous expliquerons des essais de modèles de relations spatio-temporelles.

b. Modèles de relations spatiales

Les relations spatiales ne servent pas qu'au domaine des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), elles sont maintenant utilisées et définies mathématiquement par les chercheurs en Intelligence Artificielle (I.A.), vision, imagerie algorithmique, cartes cognitives, représentation des connaissances, analyses spatiales, structures de données spatiales (Billen, 2002).

Il existe trois grandes catégories de relations spatiales (Egenhofer, 1989). Toutes n'ont pas la même finalité, ni la même utilité. Il existe des relations métriques, relations d'ordre et enfin des relations topologiques. Les relations métriques se basent sur la notion de distance dans un espace euclidien. La distance entre deux points est donnée par la formule :

$$d_{a-b} = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}$$

¹ L'inférence est une opération mentale qui consiste à tirer une conclusion (d'une série de propositions reconnues pour vraies). Ces conclusions sont tirées à partir de règles de base.

Ces relations sont assez simples à gérer pour deux points, elles se compliquent pour des objets plus complexes. De nombreux outils mathématiques sont à disposition pour les gérer, pour autant que les coordonnées euclidiennes des points constitutifs soient connues.

Les relations ordinales quant à elles possèdent leur propre modélisation. FRANK définit par exemple une représentation basée sur des relations cardinales avec un ensemble de symboles définissant les valeurs que peuvent prendre les relations, un ensemble d'opérations applicables à ces relations et enfin un ensemble d'axiomes définissant les résultats des opérations. Il propose également plusieurs découpages de l'espace pour établir ses relations (voir figure 2)(Billen, 2002, Frank, 1992).

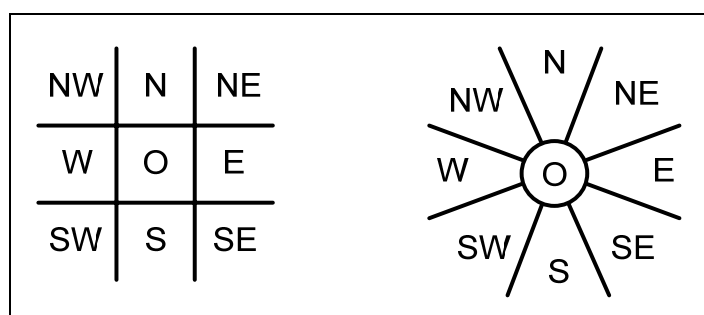


Figure 2 : Division de l'espace suivant une projection et suivant des secteurs angulaires (Billen, 2002)

Les modèles de relations topologiques sont sans nul doute les plus utilisés et les plus reconnus par la communauté SIG. La branche mathématique de la topologie a été étudiée en profondeur par les mathématiciens. Néanmoins, beaucoup de ces analyses sont trop abstraites et trop complexes pour permettre de formaliser le sens commun du raisonnement spatial (Van de Weghe, 2004). Cependant, les fondements mathématiques de base et le formalisme ont influencé de nombreuses théories spatiales qualitatives (Cohn and Hazarika, 2001). L'ensemble des relations topologiques est un sous ensemble des relations géométriques. Elles ont la propriété d'être préservées lors de transformations topologiques comme des translations, des rotations ou des facteurs d'échelle. L'information topologique est par ailleurs purement qualitative et exclut toute mesure quantitative (Egenhofer and Herring, 1990). Pour donner une image des transformations possibles sans modifier les relations topologiques, certains auteurs dont BENNET et VIEU parlent de géométrie de la feuille de caoutchouc (Bennett, 1997, Vieu, 1997). Si une situation spatiale est représentée sur la feuille, on peut lui faire subir toutes les déformations citées ci-dessus sans changer la relation topologique. Pour une définition mathématique plus formelle de la topologie nous renvoyons à BILLEN (Billen, 2002).

i. Modèle de relations topologiques des 9 intersections

Définition préalable

Pour définir leur modèle de relations topologiques, EGENHOFER et HERRING proposent premièrement un modèle de données spatiales basé sur l'algèbre topologique (Egenhofer and Herring, 1990). Le modèle d'algèbre topologique est basé sur des primitives géométriques appelées *cellules* (cell) qui sont définies pour différentes dimensions spatiales :

- * Un 0-complexe cellulaire est un nœud (qui correspond au plus petit objet 0-dimensionnel) ;
- * Un 1-complexe cellulaire est le lien entre deux 0-complexes cellulaires distincts ;
- * Un 2-complexe cellulaire est la surface décrite par la séquence de trois 1-complexes cellulaires qui ne s'intersectent pas.

D'une manière générale, une face d'un n-complexe cellulaire A est tout (0,...,n)-complexe cellulaire qui est contenu dans A. Les primitives topologiques considérées dans la suite du modèle sont la fermeture, l'intérieur, la frontière et l'extérieur d'un complexe cellulaire. Ils sont définis de la manière suivante :

- * La fermeture d'un n-complexe cellulaire A, noté \bar{A} , est l'ensemble de toutes les faces $r - f$ de A, où $0 \leq r \leq n$, c'est-à-dire :

$$\bar{A} = \bigcup_{r=0}^n r - f \in A$$

- * L'ensemble théorique frontière d'un n-complexe cellulaire A, noté ∂A , est l'union de toutes les r-faces $r - f$, où $0 \leq r \leq (n - 1)$, qui sont contenues dans A :

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

- * L'intérieur d'un complexe cellulaire A, noté A^o , est l'ensemble équivalent à la différence entre la fermeture de A et sa frontière :

$$A^o = \bar{A} - \partial A$$

- * L'extérieur d'un complexe cellulaire A, noté A^- , est l'ensemble de tous les complexes cellulaires dans l'univers U qui ne sont pas des éléments de la fermeture :

$$A^- = U - \bar{A}$$

Une définition équivalente existe également pour les objets complexes dans EGENHOFER et HERRING (Egenhofer and Herring, 1990). Sur base de ces définitions, il est possible de définir formellement

des objets géographiques simples et complexes couramment utilisés en information géographique. Ils sont définis comme :

- * Une région est un 2-complexe dans \mathbb{R}^2 avec un intérieur continu non vide ;
 - Une région sans trou est une région avec un intérieur continu et avec une frontière continue ;
 - Une région avec trou est une région avec un intérieur discontinu et une frontière discontinue ;
- * Une ligne est une séquence de 1-complexes liés dans \mathbb{R}^2 de telle manière qu'ils ne se croisent jamais pour former une boucle fermée ;
 - Une ligne simple est une ligne avec deux frontières déconnectées ;
 - Une ligne complexe est une ligne avec plus de deux frontières déconnectées ;
- * Un point est un simple 0-complexe cellulaire dans \mathbb{R}^2 .

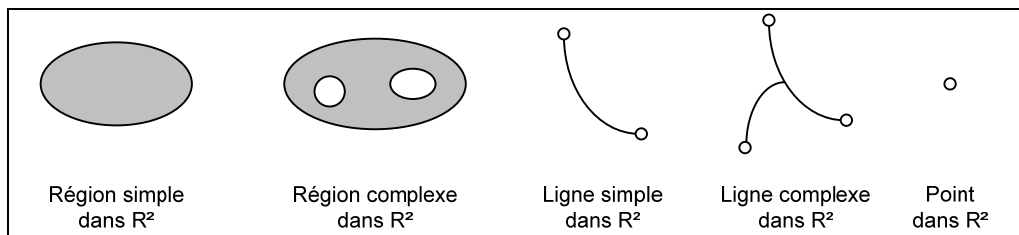


Figure 3 : Exemple de régions, ligne, point dans \mathbb{R}^2

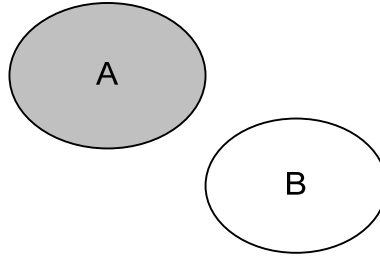
Modèle d'intersection

Le modèle des 9 intersections topologiques binaires entre deux cellules A et B est basé sur la combinaison des six primitives topologiques qui sont les intérieurs, frontières et extérieurs de A ($A^o, \partial A, A^-$) et B ($B^o, \partial B, B^-$). Ces 6 primitives topologiques peuvent donc être combinées de telle sorte à former **neuf** combinaisons possibles uniques représentant la relation topologique entre ces deux cellules. Ces 9 intersections sont représentées sous la forme d'une matrice 3x3 :

$$R(A, B) = \begin{pmatrix} A^o \cap B^o & A^o \cap \partial B & A^o \cap B^- \\ \partial A \cap B^o & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^- \\ A^- \cap B^o & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

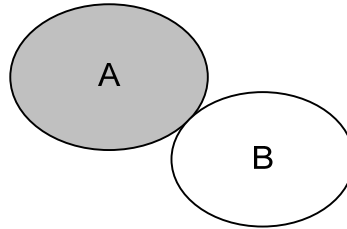
La valeur représentée dans la matrice sera uniquement un symbole précisant si l'intersection est nulle (\emptyset) ou pas ($\neg\emptyset$). Lorsque la valeur de l'intersection n'a pas d'importance, elle est représentée comme (-). Sur base de ces 9 intersections possibles, on peut avoir 512 relations théoriques. Cependant, elles ne sont pas toutes possibles. La détection des relations possibles se fait à l'aide de conditions négatives qui empêchent l'association d'intersections entre couples de primitives. Au final, on obtient alors 8 relations topologiques possibles pour deux régions dans \mathbb{R}^2 . Ces 8 relations sont nommées explicitement. Nous en donnons également un exemple graphique :

* Disjoint



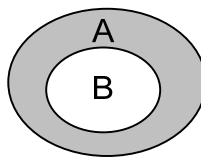
$$R_{disjoint}(A, B) = \begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

* Meet



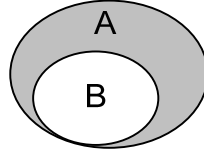
$$R_{meet}(A, B) = \begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

* Contains



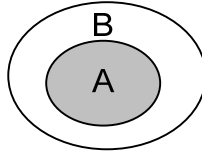
$$R_{contains}(A, B) = \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

* Covers



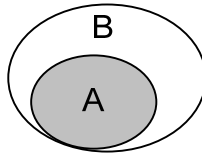
$$R_{covers}(A, B) = \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

* Inside



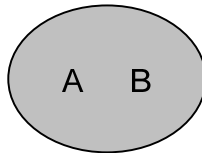
$$R_{inside}(A, B) = \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

* CoveredBy



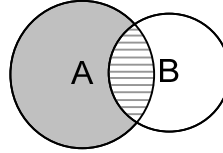
$$R_{coveredBy}(A, B) = \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

* Equal



$$R_{equal}(A, B) = \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \neg\emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

* Overlap



$$R_{overlap}(A, B) = \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

Le même raisonnement peut également être effectué pour deux lignes simples ou complexes dans un environnement à 1 ou 2 dimensions. Pour plus de détails, nous renvoyons à (Egenhofer, 1991, Egenhofer and Herring, 1990, Egenhofer and Mark, 1994).

ii. Dimension extended method et Calculus based method

Le modèle des 9 intersections a été étendu par CLEMENTINI, DI FELICE et VAN OOSTEROM dans ce qu'ils appellent « dimension extended method » (DEM) (Clementini et al., 1993). Ce modèle consiste à prendre en compte dans le modèle des 9 intersections la dimension de l'intersection créée par les primitives topologiques (Billen, 2002). Ils ont également mis au point une méthode permettant de décrire toutes les relations topologiques possibles : « calculus based method » (CBM). L'idée principale de la méthode est de trouver un ensemble de relations facilement nommables et compréhensibles par les utilisateurs. Les auteurs regroupent toutes les relations topologiques en cinq groupes mutuellement exclusifs, la combinaison des groupes est basée sur la méthode « object calculus » et permet de décrire l'ensemble des relations du modèle proposé (Clementini and Di Felice, 1993).

Les intersections ne sont donc plus simplement (\emptyset) ou ($\neg\emptyset$), mais soit un vide (\emptyset), 0D (point), 1D (ligne), 2D (région). Théoriquement, l'intersection entre, par exemple, une ligne et une région pour ces combinaisons pourrait donner 256 cas. Cependant, beaucoup ne sont pas réalisables car la dimension de l'intersection doit être égale ou inférieure à la dimension la plus petite des objets considérés. Cela réduit les possibilités à 24 cas, et seuls 17 en sont réellement possibles.

Sur base de ces intersections, les auteurs définissent 5 relations topologiques. Ils se basent sur les mêmes propriétés topologiques que le modèle des 9 intersections, c'est-à-dire qu'un objet λ (point, ligne, polygone) possède :

- * une frontière notée $\partial\lambda$ (qui est toujours vide pour un point et qui, pour une ligne, est vide si elle est circulaire ou correspond aux deux points d'extrémités si celle-ci n'est pas fermée) ;
- * un intérieur noté λ^0 défini comme étant $\lambda^0 = \lambda - \partial\lambda$.

De là, on peut définir :

- * Touch : relation qui s'applique pour toutes les combinaisons sauf la situation point/point ;

$$\langle \lambda_1, \text{touch}, \lambda_2 \rangle \Leftrightarrow (\lambda_1^0 \cap \lambda_2^0 = \emptyset) \wedge (\lambda_1 \cap \lambda_2 \neq \emptyset)$$

- * In : relation qui s'applique à toutes les situations ;

$$\langle \lambda_1, \text{in}, \lambda_2 \rangle \Leftrightarrow (\lambda_1^0 \cap \lambda_2^0 \neq \emptyset) \wedge (\lambda_1 \cap \lambda_2 = \lambda_1)$$

- * Cross : s'applique uniquement au cas ligne/ligne et ligne/région ;

$$\langle \lambda_1, \text{cross}, \lambda_2 \rangle \Leftrightarrow$$

$$\dim(\lambda_1^0 \cap \lambda_2^0) = \left(\max(\dim(\lambda_1^0), \dim(\lambda_2^0)) - 1 \right) \wedge (\lambda_1 \cap \lambda_2 \neq \lambda_1) \wedge (\lambda_1 \cap \lambda_2 \neq \lambda_2)$$

- * Overlap : s'applique seulement à région/région et ligne/ligne ;

$$\langle \lambda_1, \text{overlap}, \lambda_2 \rangle \Leftrightarrow$$

$$\left(\dim(\lambda_1^0) = \dim(\lambda_2^0) = \dim(\lambda_1^0 \cap \lambda_2^0) \right) \wedge (\lambda_1 \cap \lambda_2 \neq \lambda_1) \wedge (\lambda_1 \cap \lambda_2 \neq \lambda_2)$$

- * Disjoint : relation qui s'applique à toutes les combinaisons possibles :

$$\langle \lambda_1, \text{disjoint}, \lambda_2 \rangle \Leftrightarrow (\lambda_1 \cap \lambda_2 = \emptyset)$$

La figure suivante représente l'arbre décisionnel des relations topologiques. Celui-ci permet, à partir des intersections entre primitives topologiques de retrouver les relations possibles :

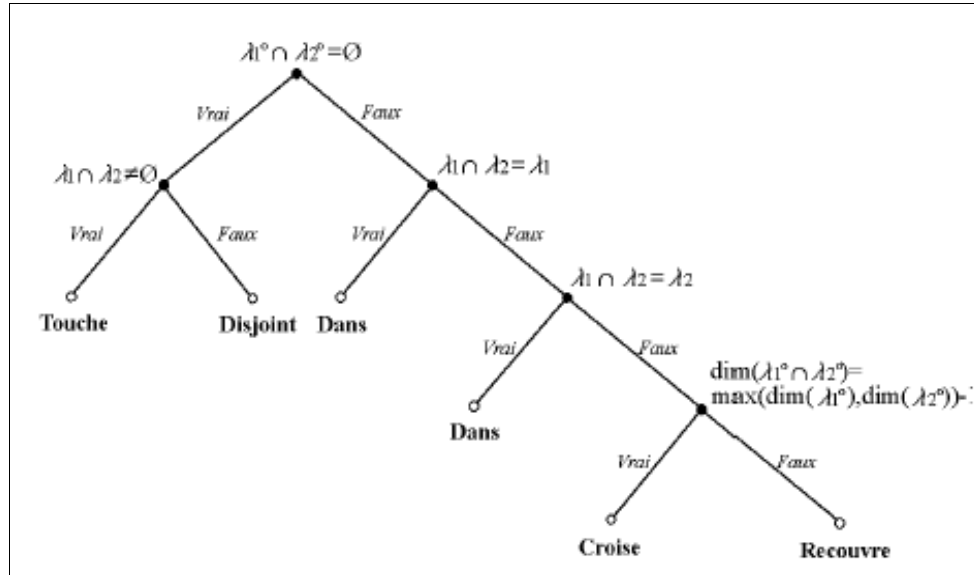


Figure 4 : Arbre décisionnel des relations topologiques (Billen, 2002) p51.

iii. Region connection calculus (RCC)

Le modèle « Region connection calculus » mis au point par RANDELL, CUI et COHN se base sur une transformation de l'« Interval Logic » de CLARKE vers un raisonnement spatial (Randell et al., 1992). Il s'agit d'une extension spatiale du modèle d'intervalle. Le principe du modèle est basé sur le fait que la primitive de base considérée n'est plus le point mais une région, laquelle ne peut être nulle et occupe un certain espace à un certain temps donné (Randell et al., 1992). La base de leur formalisme est la relation de connexion $C(x,y)$ qui se lit comme x est connecté à y . Cette relation est valable tant que les régions x et y partagent au moins un point. Notons que dans le modèle, x et y sont les fermetures topologiques des régions et non pas les régions elles-mêmes (Billen, 2002). Sur base de cette relation, les auteurs définissent l'ensemble de relations suivant :

$DC(x, y) \equiv_{def} \neg C(x, y)$	x est déconnecté de y
$P(x, y) \equiv_{def} \forall z [C(z, x) \Rightarrow C(z, y)]$	x est une partie de y
$PP(x, y) \equiv_{def} P(x, y) \wedge \neg P(y, x)$	x est une partie propre de y
$x = y \equiv_{def} P(x, y) \wedge P(y, x)$	x est égal à y
$O(x, y) \equiv_{def} \exists z [P(z, x) \wedge P(z, y)]$	x recouvre y
$PO(x, y) \equiv_{def} O(x, y) \wedge \neg P(x, y) \wedge \neg P(y, x)$	x recouvre partiellement y
$DR(x, y) \equiv_{def} \neg O(x, y)$	x ne recouvre pas y
$TPP(x, y) \equiv_{def} PP(x, y) \wedge \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$	x est une partie propre et tangente de y
$EC(x, y) \equiv_{def} C(x, y) \wedge \neg O(x, y)$	x est connecté extérieurement à y
$NTPP(x, y) \equiv_{def} PP(x, y) \wedge \neg \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)]$	x est une partie propre non tangente de y

Le modèle RCC permet donc la définition de huit relations (JEPD) distinctes entre deux régions. Ces huit relations sont identiques à celles développées par EGENHOFER dans le modèle des 9 intersections. La notation *i* signifie relation inverse.

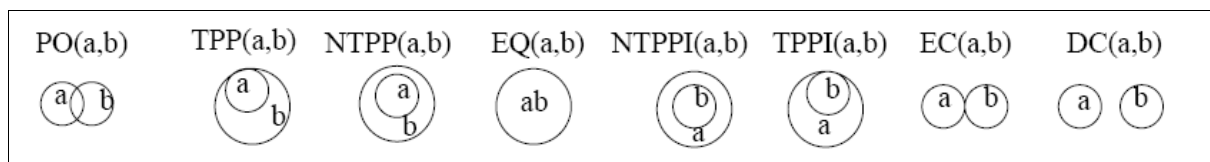


Figure 5 : Représentation des 8 relations JEPD du modèle RCC-8 (Cohn et al., 1997c) p5.

Ce set de 8 relations a été énormément utilisé dans le monde de l'intelligence artificielle, de nombreuses publications ont utilisé ce modèle et l'ont affiné (Asher and Vieu, 1995, Bennett, 1997, Bennett, 1994, Cohn, 1995, Cohn et al., 1997b, Cohn et al., 1997a, Cohn et al., 1997c, Gotts, 1994, Gotts et al., 1996, Randell et al., 1992, Vieu, 1997).

Par exemple, certaines fusions peuvent être effectuées au niveau des relations. En considérant la disjonction de EC et DC en DR (x est distinct de y) ; TPP et NTPP en PP (x est une partie propre de y) ; TPPI et NTPPI en PPI (y est une partie propre de x), on obtient un set de 5 relations appelé RCC-5 (Bennett, 1997, Cohn et al., 1997b). D'autres raffinements ont été développés, notamment en prenant en compte les enveloppes convexes des régions considérées, on arrive alors à 23 relations (RCC-23), pour plus de détails, nous renvoyons à COHN (Cohn et al., 1997a)

c. Modèles de relations temporelles

La représentation du temps a toujours été un enjeu crucial tant en intelligence artificielle que dans la gestion de bases de données ou dans les systèmes d'informations géographiques. L'ajout du temps dans un système permet de gérer des notions qui sont plus proches de l'utilisateur : cela permet d'analyser les évolutions, les mouvements, les changements d'états des phénomènes observés, ou des événements. Nous n'aborderons pas ici tous les domaines de recherche en raisonnement temporel. Les champs de recherche principaux sont la représentation des connaissances, la compréhension du langage naturel, le raisonnement de sens commun, le raisonnement qualitatif, le raisonnement de diagnostic, la génération de plans ou de projets, la reconnaissance de plan et la programmation. Pour plus de détails sur l'ensemble des applications du raisonnement temporel, nous renvoyons à GEREVINI (Gerevini, 1997). Nous allons uniquement présenter quelques aspects du raisonnement sur des relations temporelles qui nous seront utiles pour la suite de notre analyse.

Pour parler du temps, il est nécessaire de distinguer plusieurs notions. Premièrement, les « temps » absolus sont des instants ponctuels ou des intervalles de temps ayant une durée. Ceux-ci permettent de dater ce que l'on appelle des « états » qui sont des situations stables du monde par rapport à une propriété. Les « temps » permettent également de dater des « événements » qui provoquent un changement de la situation du monde.

Il est intéressant de faire la distinction entre deux types d'événements dans le traitement du temps. D'une part les événements instantanés qui peuvent être facilement gérés par une ligne temporelle et d'autre part les événements ayant une certaine durée. Cette distinction est à l'origine des deux tendances principales de modélisation, soit une approche tournée sur des instants, soit une approche tournée vers des intervalles de temps.

i. The Situation Calculus (SC)

Le plus ancien formalisme de représentation du temps est le « Situation Calculus ». Il a été développé par MCCARTHY et HAYES (McCarthy and Hayes, 1969) avec le but de définir une théorie formelle pour raisonner sur des actions. Dans ce modèle, le monde est représenté comme un ensemble de situations ou d'états. Une situation peut être rapprochée de la notion de « snapshot », elle décrit le monde à un instant donné. Le monde reste inchangé dans cet état tant qu'une action n'est pas effectuée sur celui-ci. Les actions sont modélisées comme des transitions entre les états et chaque action est définie comme une paire (pré condition, effets) (Pani and Bhattacharjee, 2001).

Dans ce modèle, le temps est implicitement représenté par la notion de situation. La primitive temporelle considérée ici est l'instant et la structure du temps est discrète et linéaire. Les inconvénients de ce modèle sont d'une part l'impossibilité de représenter des notions de durée

pour des actions et pour leurs effets et d'autre part l'impossibilité de modéliser des effets indirects, qui ne se produisent pas directement après l'action.

ii. Logique temporelle de McDERMOTT

McDERMOTT propose un modèle également basé sur la notion de situation ou d'état comme dans le modèle SC. La logique temporelle définie est construite sur le concept de point et le concept d'intervalle (introduit comme une paire de points) (Gerevini, 1997). Les différents états sont ordonnés par la relations \leq . Cette relation de précédence temporelle est transitive et infinie dans les deux directions (passé et futur). De cette manière, le futur est vu comme un arbre avec plusieurs directions possibles. Un des chemins possibles dans cet arbre est appelé « chronicle », il s'agit d'une histoire possible pour le monde. L'idée est qu'il existe plusieurs possibilités de futur mais qu'une seule est préférée ou attendue. Sur cette base, McDERMOTT différencie les « facts » (faits) et les « events » (événements). Un fait est défini comme un ensemble d'états qui sont vrais. Un événement est vu comme un ensemble de périodes durant lesquelles un fait apparaît.

Le modèle de McDERMOTT a un intérêt particulier en planification, en effet, il fournit une notion de « causalité » d'actions. La causalité y est définie comme : « un événement e_1 peut être la cause d'un événement e_2 si et seulement si e_2 suit toujours temporellement e_1 » (Pani and Bhattacharjee, 2001). Bien que ce modèle de McDERMOTT a été largement accepté à l'époque, certains auteurs ont émis diverses critiques à l'encontre de son modèle. Celui-ci utilise en effet comme primitive temporelle des instants. De plus, il y a un manque de clarté dans la logique et un manque de définitions formelles et de sémantique (Pani and Bhattacharjee, 2001).

iii. ALLEN's intervals

La théorie de l'action et du temps de ALLEN (Allen, 1991, Allen, 1984, Golumbic, 1998, Peuquet, 1994, Allen, 1983) est sans nul doute la plus célèbre et la plus utilisée dans le monde de l'intelligence artificielle. ALLEN propose un formalisme basé sur une logique temporelle utilisée pour raisonner sur des événements, des actions, des convictions, des intentions, des causalités et également utilisée pour servir de cadre à la résolution de problèmes. La primitive temporelle du modèle de ALLEN est l'intervalle, cela lui permet de raisonner sur des processus ayant une certaine durée. Sur base de deux intervalles, il définit alors 13 relations binaires mutuellement exclusives. Dans ce cas, le temps est considéré comme continu et non borné.

Posons T comme un ensemble d'instants mesurés, cet ensemble est isomorphe à un ensemble de réels. En d'autre termes, considérons un ensemble d'instants T qui partagent les mêmes propriétés que l'ensemble des nombres réels. La mesure du temps est donc assimilée à la mesure de nombres réels. Posons également I comme étant l'ensemble des intervalles de temps. Soit i un intervalle de temps de I , on a alors :

$$i = [t_1, t_2]$$

Où t_1 et t_2 appartiennent à T. De plus, on a également que :

$$t_1 < t_2$$

Deux opérateurs sont également définis, il s'agit de $\text{Begin}(i)$ et de $\text{End}(i)$ qui représentent respectivement l'instant de départ et l'instant de fin de l'intervalle i . En considérant également les opérateurs de comparaison logique, nous pouvons représenter formellement les 13 relations possibles dans la figure suivante :

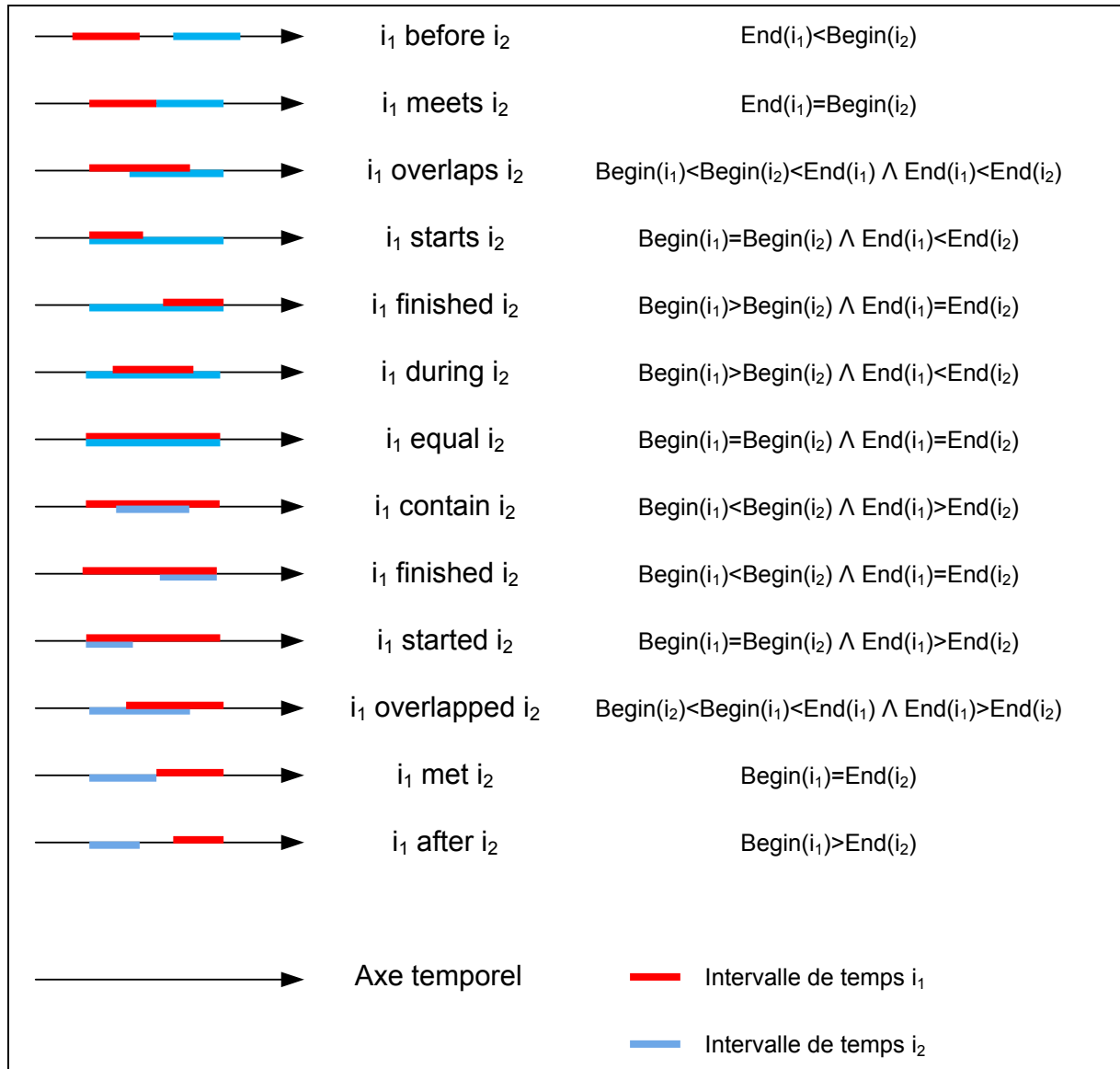


Figure 6 : Relations sur les intervalles temporels de Allen. Inspiré de (Claramunt and Jiang, 2000)

Un atout majeur de la théorie de Allen est également la représentation de tables de contingences. Une table de contingence est un tableau à deux entrées qui reprend en colonne la relation entre un objet a et un objet b et en ligne la relation entre un objet b et un objet c. Le tableau représente la déduction des relations possibles entre a et c que l'on peut en tirer. Cela donne donc 169 (13*13) possibilités.

Par exemple, si nous connaissons les relations suivantes : A précède immédiatement B (*A meets B*) et l'événement C se déroule pendant l'événement B (*C during B*). Nous pouvons donc en déduire que l'événement A se déroule avant l'événement C (*A before C*).

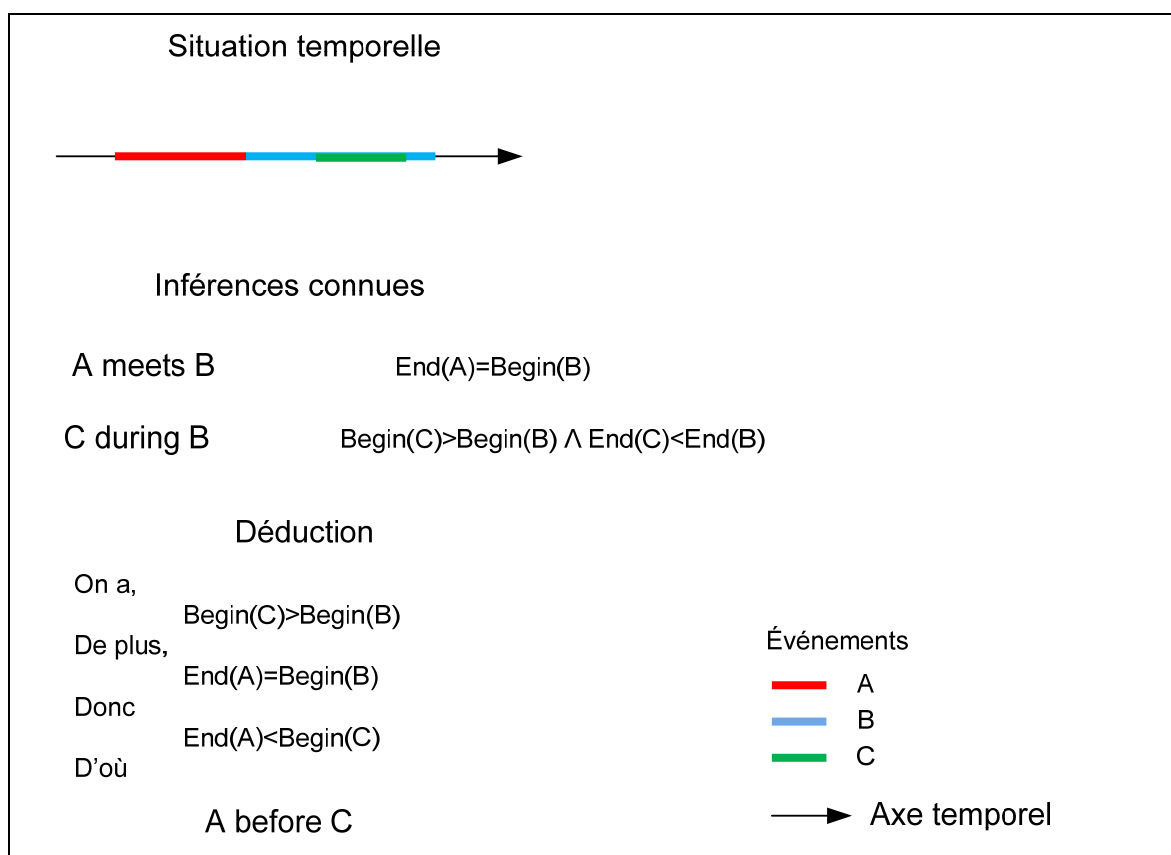


Figure 7 : Déduction de relation temporelle à partir de deux inférences.

Ces tables de contingences sont très utilisées en intelligence artificielle pour tester la cohérence de situations et augmenter la vitesse de traitement (Allen, 1983).

d. Diagramme conceptuel de voisinage – Conceptual Neighborhood Diagram (CND)

Deux relations sont dites voisines conceptuellement lorsque l'une peut être transformée en l'autre directement par une déformation continue. L'exemple donné par FRESKA (Freksa, 1991a) pour des relations temporelles entre événements précise que les relations *before* et *meets* sont conceptuellement voisines car l'extension (temporelle) d'un des événements d'une relation peut créer directement l'autre. Les relations temporelles *before* et *overlap* quant à elles, ne sont pas voisines conceptuellement car l'extension d'un événement d'une de ces relations ne peut pas aboutir directement à l'autre sans passer par l'intermédiaire d'une troisième relation. Dans ce cas, on ne peut pas passer de la relation *overlap* à la relation *before* sans passer par la relation *meets*.

Le diagramme conceptuel de voisinage est donc la représentation de tous les voisinages conceptuels pour des relations, soit temporelles (Freksa, 1991a), soit spatiales (Freksa, 1991b, Egenhofer and Mark, 1995, Randell and Witkowski, 2004). Les figures suivantes représentent les diagrammes conceptuels pour les treize relations temporelles de ALLEN (Allen, 1983) et pour les 8 relations topologiques du modèle des 9 intersections de EGENHOFER (Egenhofer, 1991).

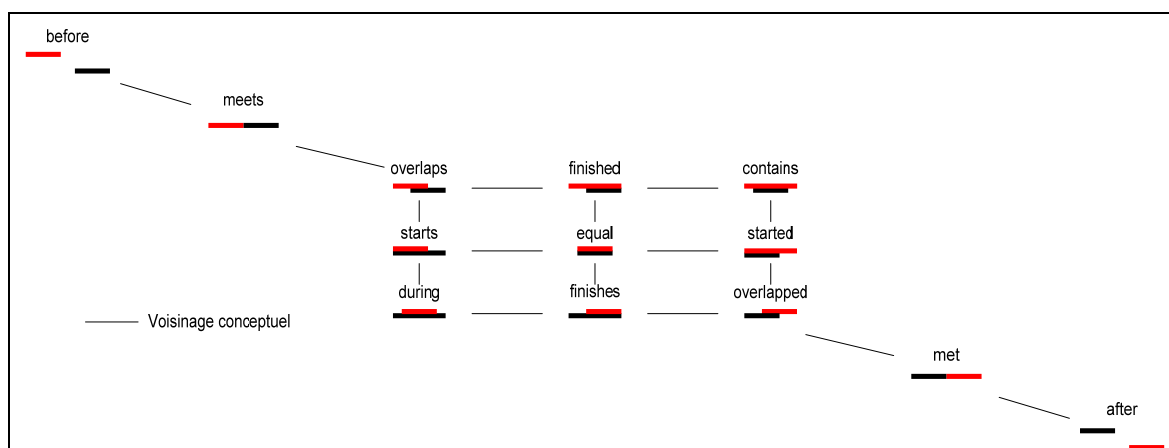


Figure 8: Diagramme conceptuel de voisinage des relations temporelles de Allen.

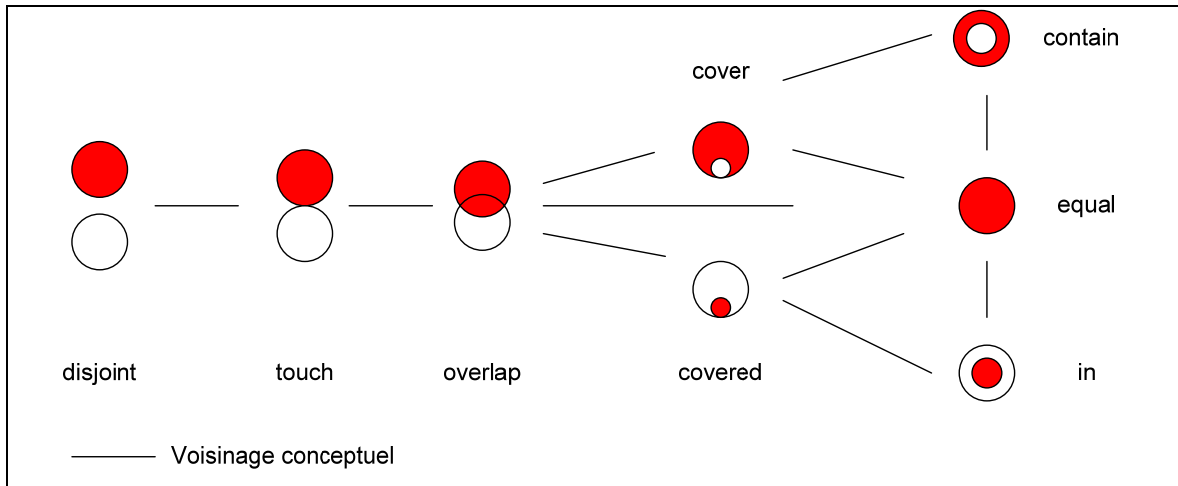


Figure 9: Diagramme conceptuel de voisinage des relations topologiques du modèle des 9i.

e. Modèles de relations spatio-temporelles

Le raisonnement spatio-temporel peut être considéré comme l'étape logique suivante au raisonnement spatial et au raisonnement temporel (Wolter and Zakharyashev, 2000). La plupart des formalismes de modélisations spatio-temporelles proposés sont basés sur une combinaison de modèles de raisonnement spatial et temporel (Muller, 2002, Muller, 1998, Wolter and Zakharyashev, 2000). Tant qu'à présent peu de modèles ont été développés directement sur une base spatio-temporelle (Balbiani and Fariñas Del Cerro, 1996). Notons que la notion de combinaison d'espace et de temps est déjà ancienne en géographie avec HAGERSTAND (Hägerstand, 1967).

i. Spatio-temporal constraint calculus (STCC)

Ce modèle développé par GEREVINI et NEBEL tente de « temporaliser » le modèle de RCC-8 sur base du calcul d'intervalles de ALLEN (Gerevini and Nebel, 2002). L'idée principale réside dans le fait qu'une contrainte spatiale est vraie durant l'intervalle de temps représenté. Les descriptions peuvent alors s'écrire comme :

$$I: (X \{DC, EC\} Y), \quad I: (Y \{TPP\} Z)$$

$$J: (X \{PO\} Y), \quad J: (Y \{DC\} Z)$$

Cela signifie que pendant l'intervalle I les régions X et Y sont disjointes ou connectées extérieurement, de plus, Y est une partie propre et tangente de Z. Lors de l'intervalle J, la configuration spatiale est différente. De là, il devient possible de déduire des connaissances entre les intervalles, par exemple dans ce cas, I *meets* J. Si nous portons un regard plus attentif à l'exemple ci-dessus, on peut voir qu'il n'est pas possible d'avoir $(Y \{TPP\} Z)$ et directement après

($Y \{DC\} Z$), en effet, lors d'un changement continu, cela est impossible. Pour avoir une déformation continue de Y et Z pour passer entre ces deux états, il est nécessaire qu'il existe deux intervalles de temps durant lesquels la relation spatiale entre les deux objets sera premièrement ($Y \{PO\} Z$) et ensuite ($Y \{EC\} Z$). Pour que ce modèle de calcul soit opérationnel, les auteurs doivent cependant poser plusieurs hypothèses, comme la taille constante des régions. La complexité informatique des modèles spatio-temporels devient vite très élevée et rend difficile une exploitation de ceux-ci (Wolter and Zakharyashev, 2001).

ii. Topology of space-time

MULLER propose une théorie de modélisation du mouvement pour la formalisation d'un raisonnement spatio-temporel de sens commun (Muller, 2002, Muller, 1998). Pour ce faire, il étudie, sur base des travaux de ASHER et VIEU (Asher and Vieu, 1995) concernant la géométrie de sens commun, la possibilité de créer un modèle spatio-temporel dont les primitives seraient des entités spatio-temporelles. Cette idée, permet de s'extraire du schéma de pensée traditionnel où le temps et l'espace sont envisagés séparément puis regroupés. Sa théorie du mouvement permet la définition de classes de mouvements complexes comme celles définies dans le langage (quitter, traverser, atteindre, croiser,...) (Van de Weghe, 2004). Ce modèle se limite cependant aux relations topologiques entre les entités évoluant dans le temps. Par exemple, la figure suivante représente un exemple de deux entités décrites dans le modèle qui entretiennent la relation « Overlapp ».

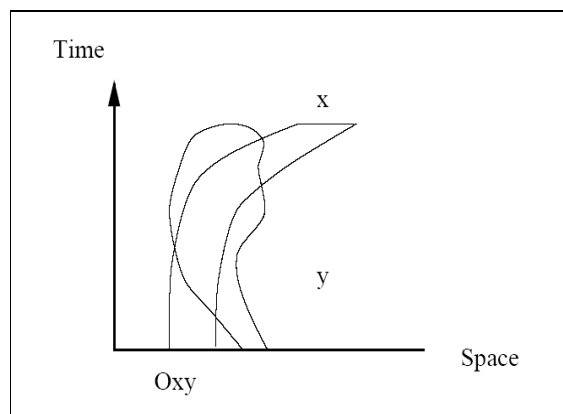


Figure 10: Une interprétation spatio-temporelle de la relation Overlapp (Muller, 2002) p8.

iii. Qualitative Trajectory Calculus

Lors de l'étude des relations entre objets en mouvement, ceux-ci sont le plus souvent disjoints. Sur base de cette constatation, VAN DE WEGHE propose un formalisme permettant de décrire le mouvement de deux points d'une manière qualitative (Van de Weghe et al., 2006, Van de Weghe et al., 2004, Van de Weghe, 2004). Ce modèle appelé « Qualitative Trajectory Calculus » permet de représenter et de raisonner sur la position d'objets à différents instants dans un espace Euclidien.

Le modèle est premièrement développé pour un déplacement dans un espace à une dimension. Dans ce cas, le mouvement des points est contraint et le vecteur de vitesse d'un objet a seulement deux possibilités de direction, en plus du cas intermédiaire où l'objet est statique. Dès lors, le mouvement de chaque objet peut être qualifié par une seule variable qualitative $(-,0,+)$. De plus, trois autres notations sont utilisées pour représenter : « se rapproche de », « s'écarte de » ou « est stable par rapport à », celles-ci sont respectivement $(-)$ si la distance entre les deux objets diminue, $(+)$ si elle augmente, et (0) si elle est stable. Sur la figure 11, on peut voir deux points représentant la position des deux objets. Le segment de ligne, quant à lui, fournit le mouvement potentiel des objets, enfin, il précise également si les objets s'approchent ou s'écartent. Si un point est noir, l'objet doit être statique, s'il est blanc, il peut bouger.

Il est, dès lors, possible de représenter une trajectoire de manière qualitative par une étiquette constituée de 3 caractères qui correspondent respectivement :

- * au mouvement du premier objet k par rapport à la position du second l au temps t ;
- * au mouvement du second objet l par rapport à la position du premier objet k au temps t ;
- * à la vitesse relative du premier objet k au temps t par rapport au second objet l au temps t .

Ces trois valeurs sont représentées au dessus de chaque situation à la figure 11, les cas barrés représentent les situations impossibles.

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

Figure 11: B1D-relation icons. (Van de Weghe et al., 2006)

Ce modèle a également été étendu pour représenter le mouvement de points dans un espace à deux dimensions. De plus, VAN DE WEGHE propose également de compléter le formalisme en ajoutant d'autres notions de mouvement comme l'accélération entre les objets (Van de Weghe et al., 2006).

f. Espaces-temps primitifs

L'espace temps primitif est une notion peu étudiée en raisonnement spatial et temporel. Comme nous le verrons plus loin, nous allons utiliser cette notion dans notre analyse. En réalité, un espace temps primitif est un espace pour lequel aucune distinction n'est faite entre la ou les dimensions temporelles et la ou les dimensions spatiales. Dans ce cas, le temps et l'espace ne sont plus des dimensions bien séparées comme elles le sont dans la quasi-totalité des analyses spatio-temporelles actuelles (Muller, 1999). Dans sa thèse, MULLER indique pourtant clairement que : « Pour ce qui est du choix d'un espace-temps primitif, ..., peu d'auteurs se sont consacrés à l'élaboration d'une théorie dans ce sens, malgré une longue tradition philosophique de débat autour des avantages et des inconvénients d'une telle approche ... nous pensons qu'une telle

approche possède des atouts pour la représentation du changement en particulier spatial. » (Muller, 1998) p27.

D'une manière pratique, lorsque l'on se trouve dans un espace-temps primitif, nous considérons les dimensions comme étant de même nature (indéfinie) et nous appliquons dès lors les propriétés des relations topologiques à cet espace.

III. Objectif du mémoire

Comme nous venons de le montrer dans l'état de l'art, un grand nombre de modèles de relations spatiales ont été développés. A partir des modèles de relations temporelles, certains auteurs ont tenté de « temporaliser » ces modèles de relations spatiales. D'autres ont, par ailleurs, développé directement des modèles de relations spatio-temporelles. D'une manière générale, nous constatons que la gestion du temps dans un modèle de relations a pour conséquence d'augmenter sa complexité de compréhension, d'alourdir fortement son utilisation et sa mise en œuvre. De plus, à l'heure actuelle, nous pouvons dire qu'il n'existe aucun modèle tout à fait abouti de relations spatio-temporelles, tel que, par exemple, le modèle de relations topologiques pour une analyse uniquement spatiale.

Sur base de ce constat, nous allons présenter dans ce mémoire une tentative de simplification de l'analyse des relations spatio-temporelles. Pour ce faire, nous allons effectuer une généralisation des relations existantes. Cette généralisation aura pour objectif de se placer dans une vision plus globale des relations spatio-temporelles et d'avoir un niveau d'abstraction plus élevé de la vision du temps et de l'espace.

Pour ce faire, il va premièrement être nécessaire de décrire toutes les relations spatio-temporelles possibles entre deux objets géographiques dans un espace donné. De cette manière, nous aurons une vision détaillée et exhaustive de l'ensemble des relations existantes. Tant qu'à présent, nous pouvons logiquement supposer que le nombre de relations spatio-temporelles augmente très vite avec la complexité de l'espace et des objets mis en jeux.

Le second objectif de ce mémoire va consister à généraliser ces relations spatio-temporelles dans un espace temps primitif. De la sorte, nous pourrons étudier les relations spatio-temporelles avec un niveau d'abstraction supérieur où le temps et l'espace sont gérés de manière commune. Il sera ensuite possible de décrire l'ensemble des relations dans cet espace temps primitif. Nous pouvons supposer que l'analyse dans cet espace-temps sera plus aisée car non dépendante du temps.

Le dernier objectif de ce mémoire est consécutif à la généralisation effectuée sur les relations spatio-temporelles. Toute généralisation est synonyme de perte d'information. Il va donc être nécessaire d'évaluer si l'information restante, suite à la généralisation, est suffisante pour effectuer des analyses spatio-temporelles.

IV. Relations spatio-temporelles dans un modèle d'espace temporel

Dans le chapitre suivant, nous allons premièrement définir ce que sont les espaces temporels. Ensuite, nous décrirons les relations possibles entre deux objets ponctuels dans un espace à une dimension pour des objets statiques. Nous présenterons, enfin, les relations établies en diagramme conceptuel de voisinage. De cette manière nous aurons représenté de manière, exhaustive l'ensemble des relations spatio-temporelles possibles dans un espace temporel pour deux objets ponctuels. L'analyse de points dynamiques sera effectuée au chapitre suivant.

a. Espace temporel

La représentation de relations spatio-temporelles n'est pas aisée. Pour avoir une vision globale de ces relations, il serait intéressant d'avoir une représentation commune des relations spatiales et temporelles. Pour ce faire, il est nécessaire de les combiner dans un même référentiel intégré (Claramunt and Jiang, 2001). Actuellement, la majeure partie des modèles travaillent toujours sur une représentation indépendante des trajectoires dans l'espace et dans le temps (Claramunt and Jiang, 2000). Le développement d'opérateurs formels qui combinent les propriétés spatiales et temporelles sont donc tout à fait intéressantes pour les SIG. La représentation combinée de relations topologiques et temporelles est, par ailleurs, un sujet ouvert de la recherche actuelle.

Un espace temporel est une représentation du temps et de l'espace qui va combiner dans un même référentiel des relations spatiales d'une part et des relations temporelles d'autre part. A chaque axe du repère va être attribué une dimension. La figure 1 représente les différents cas possibles d'espaces temporels jusqu'à deux dimensions spatiales.

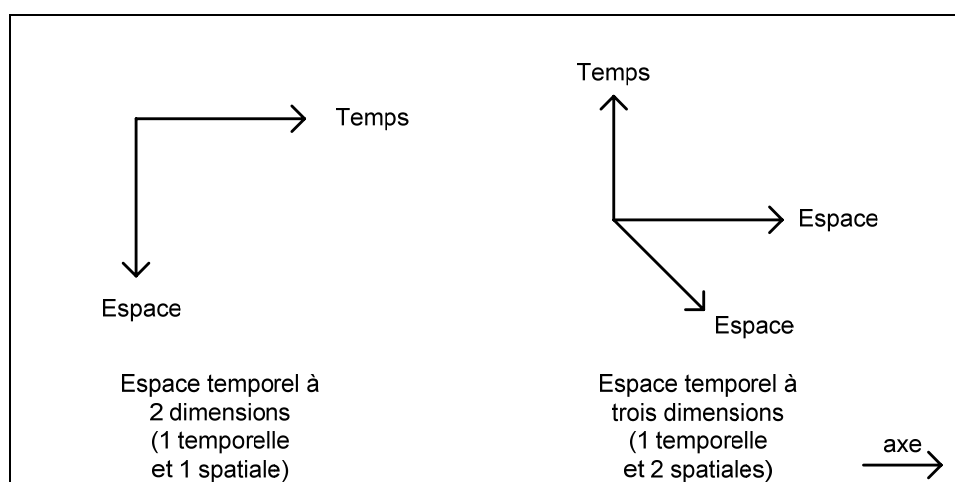


Figure 12: Espaces temporels

Le temps n'est attribué qu'à un seul axe, de plus, il est orienté, c'est-à-dire que la progression sur cet axe ne peut aller que dans une seule direction. CLARAMUNT et JIANG ont été les premiers à présenter ce modèle (Claramunt and Jiang, 2000, Claramunt and Jiang, 2001).

Les relations spatiales choisies par les auteurs sont des relations topologiques définies à partir du modèle des 9 intersections de EGENHOFER (voir figure 9). Le modèle de relations temporelles choisi est, quant à lui, le modèle des relations temporelles de ALLEN (voir figure 8). L'utilisation de ces relations nous impose de prendre en compte plusieurs hypothèses préalables. Premièrement, l'utilisation des relations topologiques impose de considérer l'espace comme continu. La transition entre deux relations non voisines dans un diagramme de voisinage devra donc passer par toutes les étapes intermédiaires. Pour ce qui est du temps, il est également considéré comme continu et également non borné (il existera toujours un intervalle de temps t tel que, quel que soit l'intervalle de temps i , on a $t > i$). La représentation de l'espace temporel implique également de donner une direction à l'axe temporel, de telle manière qu'une région temporelle évoluant dans un tel espace ne puisse pas effectuer un retour dans le temps. Enfin une région temporelle est définie comme une région spatiale valide pour un intervalle de temps donné.

Notre analyse se base sur des objets ponctuels, cependant, rien n'empêche de considérer des objets de dimensions supérieures. Le choix de commencer la représentation par des objets ponctuels statiques s'explique par la simplicité « apparente » d'une telle représentation. Nous essayerons ensuite de considérer des objets de plus grande dimension dans des espaces plus construits d'une part et des objets dynamiques d'autre part.

b. Description des relations spatio-temporelles

i. Objets ponctuels (0D) statiques dans un espace linéaire (1D)

Deux objets ponctuels ne peuvent entretenir que deux relations topologiques. En effet, les points n'ayant pas de frontières, ils sont donc soit « disjoint » soit « equal ». La figure suivante représente ces deux relations topologiques.

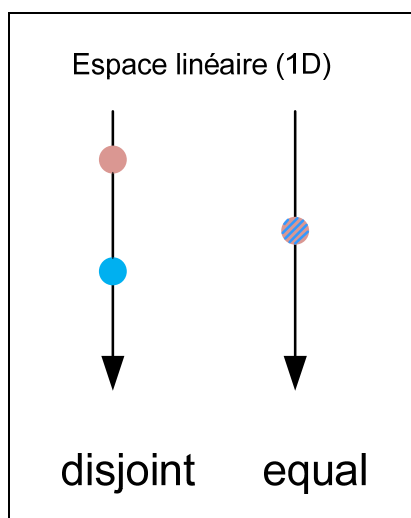


Figure 13: Relations topologiques possibles entre deux points dans un espace linéaire.

Les relations temporelles quant à elles sont toutes valables. En effet, à chaque région temporelle (dans notre cas, à chaque point) est attribué un intervalle de temps. Il n'y a donc rien qui pourrait empêcher d'avoir l'ensemble des 13 relations temporelles de ALLEN. Si nous ajoutons sur la figure précédente un axe temporel et que nous y représentons les relations temporelles entretenues par les intervalles de temps pendant lesquels sont valables les points, nous obtenons la figure 14.

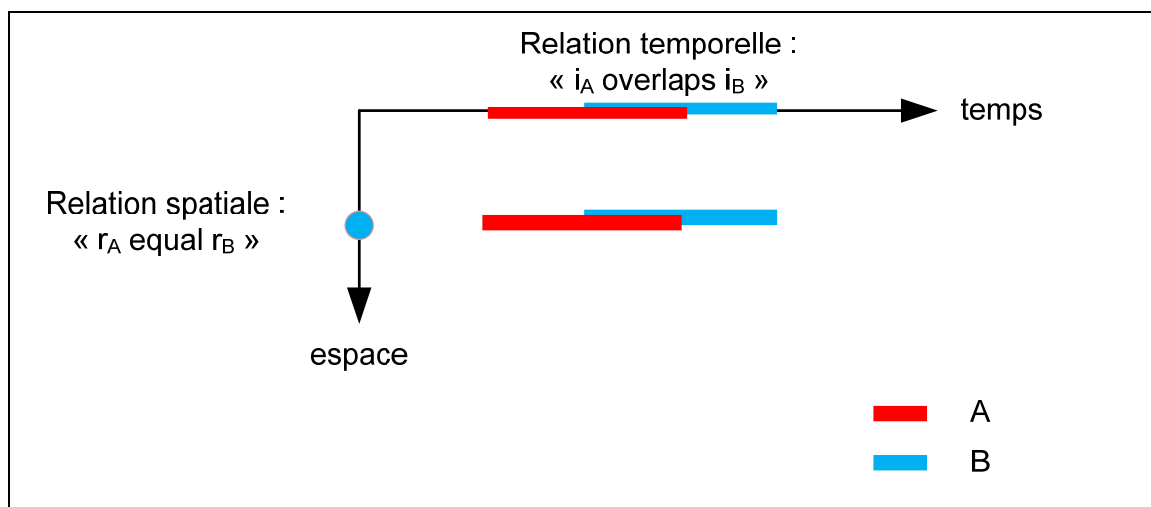


Figure 14: Relation spatio-temporelle entre deux régions temporelles A et B. r_A représente la région dans l'espace de A, i_A représente l'intervalle temporel durant lequel A est valide.

Les 26 relations spatio-temporelles possibles sont représentées ci-après. Chaque carré gris représente une relation, la première notation est la relation spatiale, la seconde est la représentation temporelle.

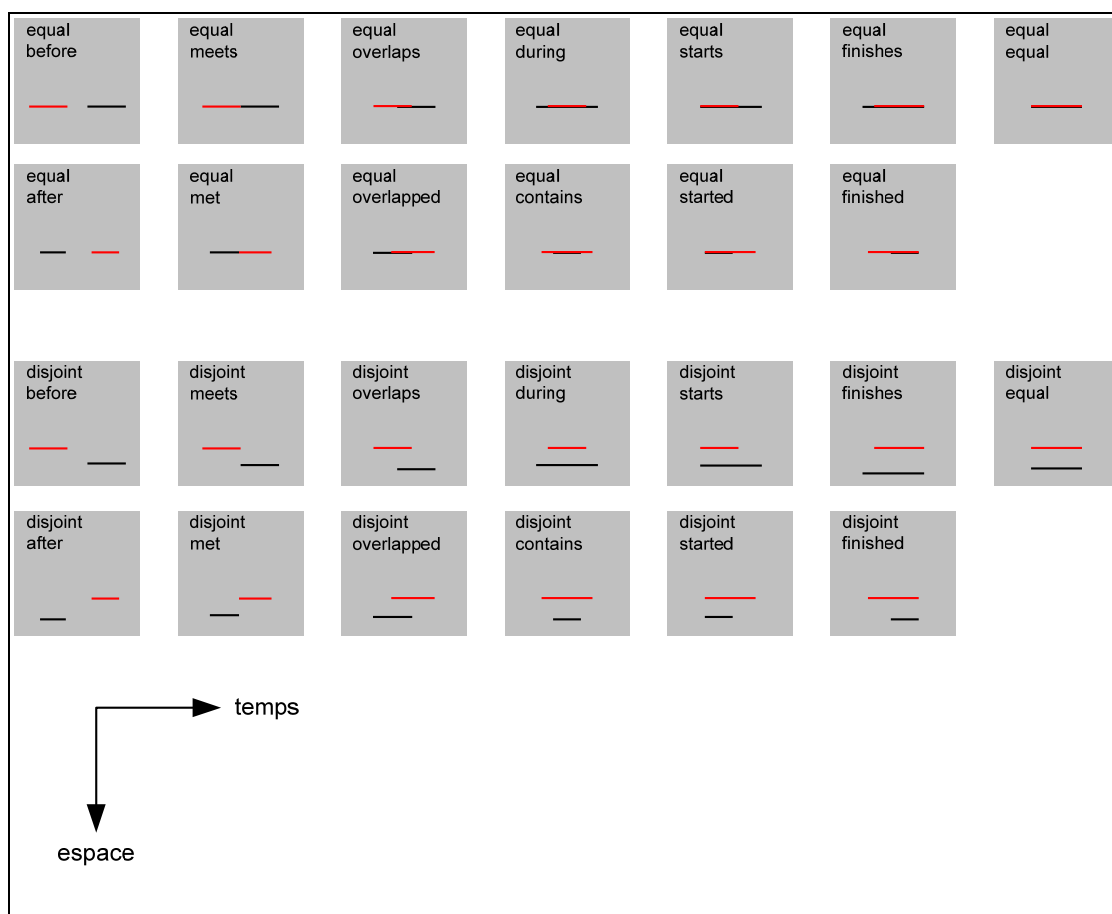


Figure 15: 26 relations spatio-temporelles possibles entre deux points statiques dans un espace linéaire. La ligne rouge représente le point A, la ligne noire représente le point B.

Modèle des relations en CND

Comme nous l'avons montré précédemment, il est souvent plus intéressant d'organiser les relations spatiales, temporelles ou spatio-temporelles en diagramme conceptuel de voisinage. Cela permet d'une part de visualiser les situations qui sont proches conceptuellement (pour lesquelles la transition est directe dans un espace continu), et d'autre part d'avoir une vision plus globale sur les « chemins » qui pourraient être parcourus dans ces relations. La figure 16 représente les relations spatio-temporelles en diagramme conceptuel de voisinage.

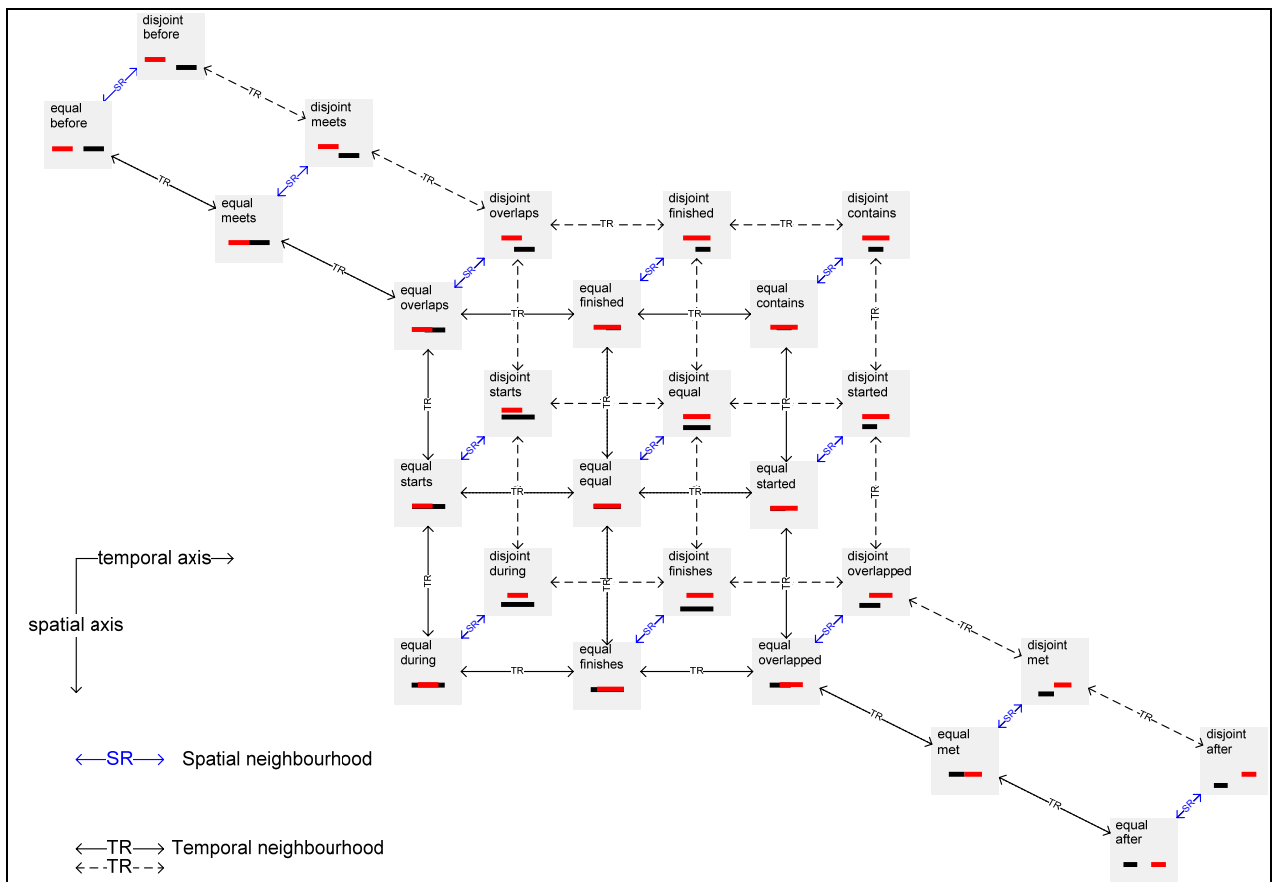


Figure 16: Représentation en CND des relations spatio-temporelles de deux points statiques dans un espace linéaire.
(Hallot, to appear)

Comme nous pouvons le constater, les relations spatio-temporelles sont nombreuses pour une situation spatiale des plus simple. Le nombre de relations spatio-temporelles pour le cas de deux segments dans un espace linéaire est déjà de 104 (13*8). Plusieurs auteurs dont CLEMENTINI ont cherché, lors de leur développement de modèles de relations spatiales, à avoir un nombre limité de relations pour rester proche des utilisateurs (Clementini et al., 1993). En effet, un modèle qui comprendrait 104 relations différentes serait quasi impossible à gérer. Cette constatation nous a conduit à tenter de simplifier l'analyse spatio-temporelle (Hallot, to appear). Pour ce faire, nous allons considérer un autre niveau d'analyse, pour avoir une abstraction supplémentaire sur les

notions de temps et d'espace. En effet, comme on peut le constater sur les graphiques précédents, une région se déplaçant dans le temps crée une trace qui est également appelée « histoire spatio-temporelle ». Pour étudier ces histoires spatio-temporelles sans avoir à utiliser des relations spatio-temporelles complexes (Muller, 2002), nous pouvons nous placer dans un contexte d'espace temps primitif. De la sorte, il n'y aura plus de différences entre les dimensions spatiales et temporelles, et nous pourrons appliquer un modèle de relations spatiales pour décrire les relations entre histoires de régions différentes. L'analyse sera alors effectuée comme si nous étions dans un espace à deux dimensions.

V. Généralisation dans un espace-temps primitif

a. Principe

Le principe des espaces-temps primitifs a été introduit dans le chapitre 2. Pour rappel, un espace-temps primitif est un espace dans lequel les dimensions spatiales et temporelles ne sont pas différenciées. Cette vision, bien qu'elle semble difficile à concevoir de prime abord, n'est cependant pas dénuée de sens. En effet, comme nous avons pu le constater, toute action dans l'espace induit forcément des réactions dans le temps. Si l'on souhaite déplacer un objet, cela prendra nécessairement une certaine durée (d'où les critiques sur les modèles temporels ayant comme primitive des instants). De ce fait, une trace dans la dimension temporelle sera toujours créée. Il devient alors concevable de penser dans un espace où un objet pourrait se déplacer à la fois dans l'espace et dans le temps sans pour autant en faire la distinction.

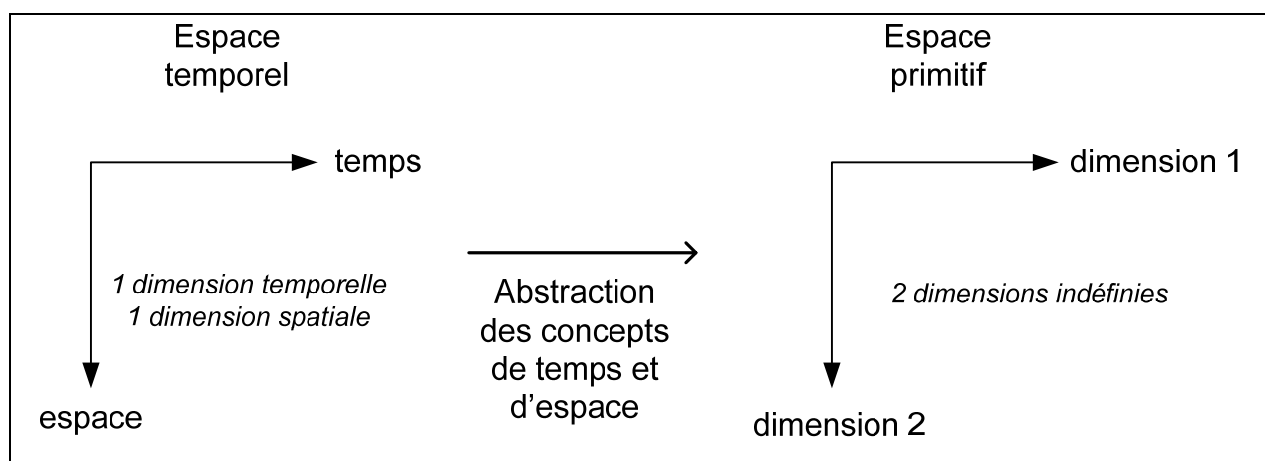


Figure 17: Espace temporel et espace primitif.

b. Généralisation

i. Élaboration du modèle

Si maintenant, nous représentons les relations spatio-temporelles de la figure 16 dans un espace-temps primitif et que nous étudions les relations topologiques entre les histoires spatio-temporelles créées par les objets dans l'espace-temps primitif à deux dimensions, nous remarquons qu'il est alors possible d'effectuer une généralisation des relations spatio-temporelles vers un petit nombre de relations topologiques bien connues (voir figure 17). En effectuant une telle généralisation, nous réduisons le nombre de relations spatio-temporelles.

Dans ce cas, nous passons de 26 relations à 8. Il est évident que cette généralisation entraîne une perte d'informations. Cependant, nous pensons qu'il reste assez d'information que pour effectuer des analyses spatio-temporelles. Nous reviendrons plus loin sur cette constatation.

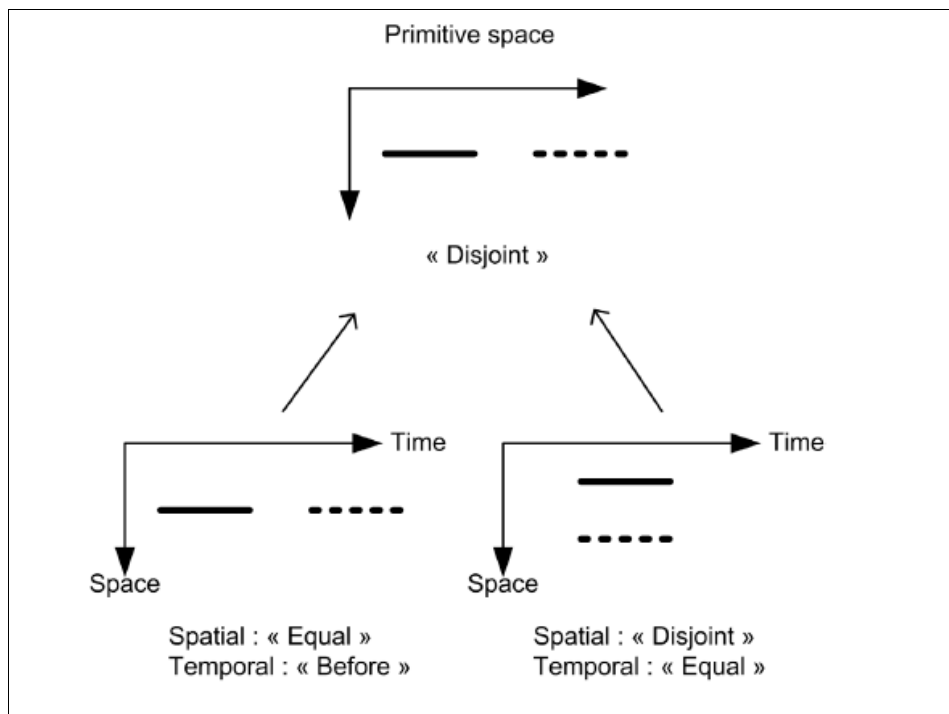


Figure 18: Généralisation de relations spatio-temporelles dans un espace-temps primitif (Hallot, to appear).

La figure suivante représente la généralisation complète du modèle de deux points statiques. Les couleurs représentent les groupements effectués. Un modèle plus lisible est fourni en annexe.

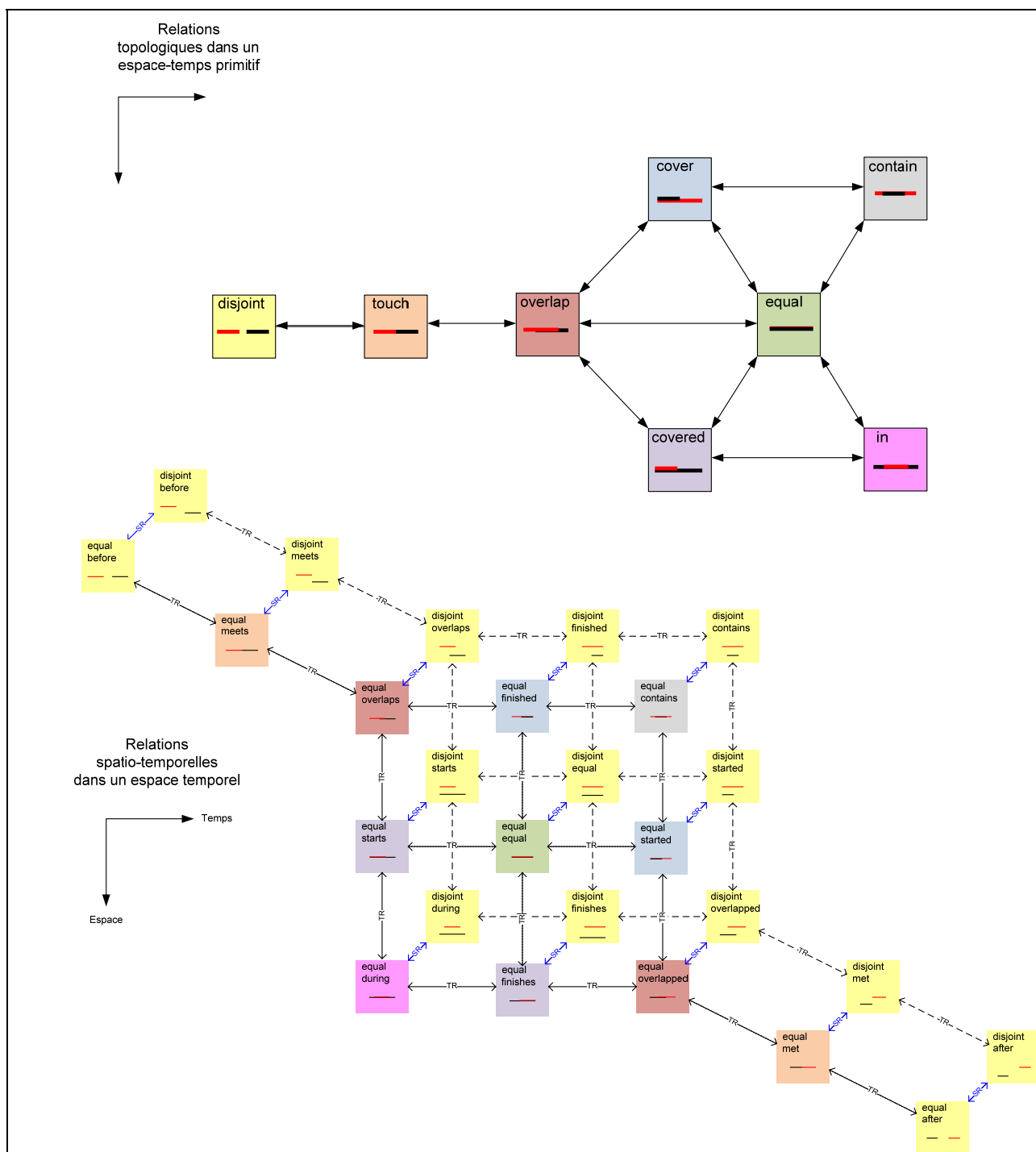


Figure 19: Généralisation de relations spatio-temporelles dans un espace-temps primitif, les couleurs représentent les groupements effectués.

ii. Étude d'intérêt - Utilisations possible

La généralisation des relations spatio-temporelles entraîne une perte d'information. Cependant, l'analyse de la figure précédente montre que les relations obtenues peuvent être utiles à la réalisation d'analyses spatio-temporelles. Il n'est pas aisé de trouver un exemple proche de la réalité avec le niveau de simplification (objets ponctuels dans un espace linéaire) dans lequel nous travaillons. Néanmoins, considérons que chacun des deux points représentent deux conditions pour qu'un phénomène apparaisse. Par exemple, si nous prenons le cas d'une route, nous sommes alors dans un espace à une dimension. Considérons également deux phénomènes climatiques qui pourraient apparaître sur cette route. Ces phénomènes sont identifiés par des points. Le premier représente une zone de froid. Nous ne prenons pas en compte de déplacements, mais seulement l'apparition et la disparition. Le critère de « naissance » et de « mort » de la zone est que la température soit inférieure à 0°C. Le second point quant à lui est synonyme de précipitations pluvieuses. Son critère d'apparition ou de disparition est le début ou la fin de la précipitation pluvieuse. Chacun de ces phénomènes a une durée de vie propre qui correspond à l'intervalle de temps sur lequel il est représenté dans l'espace temporel.

Une situation dangereuse est définie lorsque la pluie et le gel sont situés au même endroit spatial et pendant un même moment temporel. Dans ces conditions, il y a risque d'apparition de verglas. La figure 20 représente une situation où il y a apparition du gel et des précipitations au même moment mais pas au même endroit. Il n'y a donc pas de danger dans ce cas. L'analyse de cette situation dans un espace temporel puis primitif nous renseigne la même information. L'unique relation à gérer dans un espace-temps primitif pour cet exemple est le cas « disjoint ». Seules 6 relations autres que « disjoint » donneront l'alerte dans un espace-temps primitif tandis qu'il faut en analyser 9 dans un espace temporel (figure 21).

On voit donc que l'analyse de cette situation dans un espace-temps primitif est tout à fait équivalente à une analyse dans un espace temporel. De plus, la première permet d'augmenter la vitesse de traitement (n'ayant que 8 relations à gérer) et la simplicité (vu l'utilisation de relations topologique de « base »).

Cet exemple nous conforte dans l'idée que gérer des relations spatio-temporelles dans un espace-temps primitif permet de simplifier l'analyse spatio-temporelle tout en gardant assez d'informations et de sens pour effectuer des analyses. Il est maintenant nécessaire d'étendre ce modèle à des dimensions supérieures et pour des objets qui ne sont plus considérés comme statiques. La suite de ce travail va donner une première base de réflexion pour l'analyse de points dynamiques dans un espace linéaire.

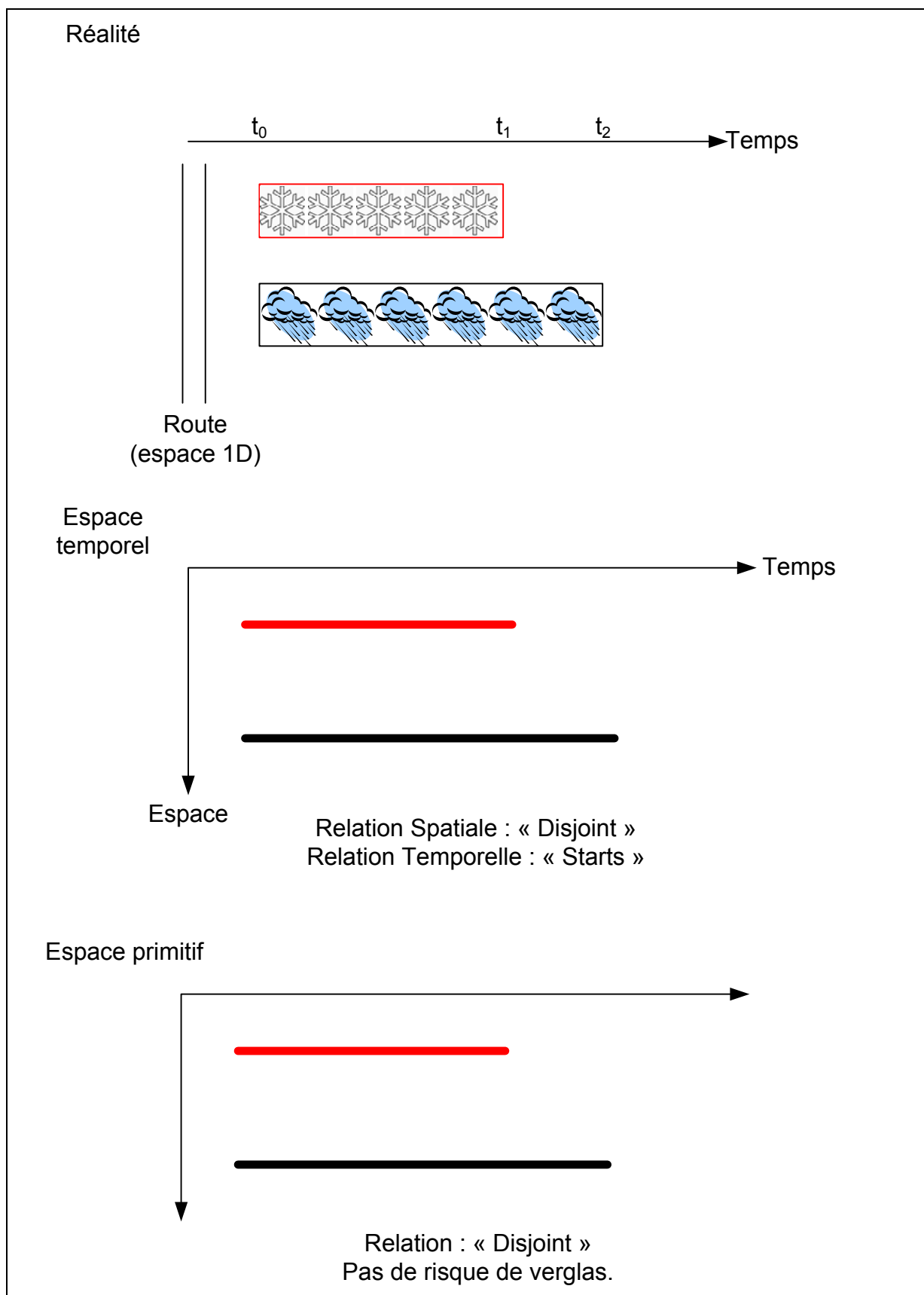


Figure 20: Situation spatio-temporelle où les relations dans un espace-temps primitif sont équivalentes.

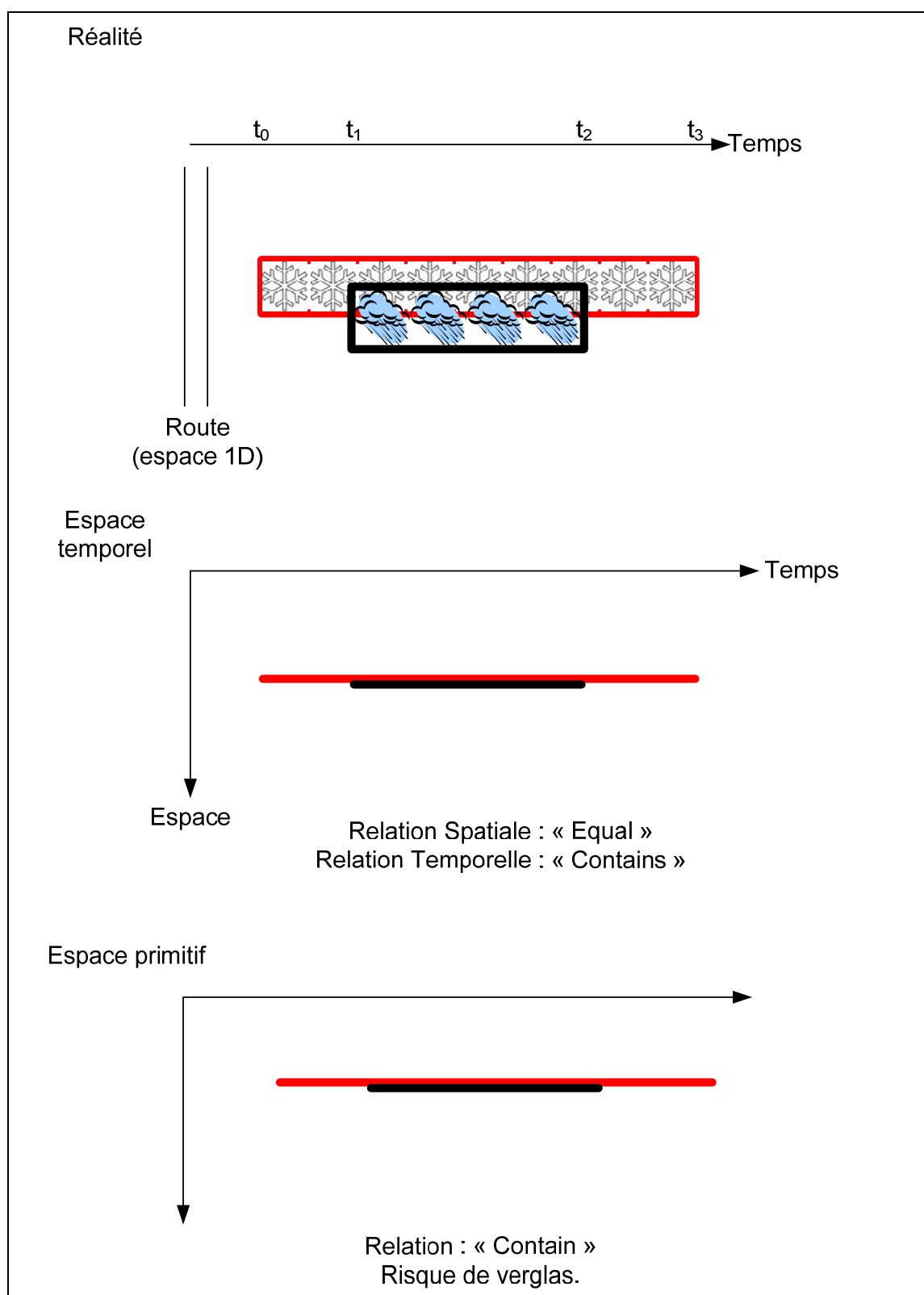


Figure 21: Situation spatio-temporelle où les relations dans un espace-temps primitif sont équivalentes.

c. Objets ponctuels (0D) dynamiques dans un espace linéaire (1D)

Tant qu'à présent, nous n'avons considéré que des objets statiques. Bien qu'ils ne bougent pas, ils créent quand même une histoire spatio-temporelle linéaire. Cependant, la projection de ces histoires sur l'axe spatial correspond à un point. Lorsqu'un point va avoir un déplacement spatial, la projection de son histoire sur l'axe spatial ne sera plus un point.

Histoires spatio-temporelles impossibles

Dans notre analyse, nous ne considérons que des déplacements continus et non instantanés. Cette restriction permet de n'avoir que des situations telles qu'elles pourraient exister dans le monde réel. Notons que l'analyse que nous développons a pour but d'analyser des données qui seraient par exemple des déplacements de véhicules ou de personnes. Il n'est donc pas possible de se déplacer instantanément ou de manière non continue. De plus, il n'est pas non plus envisageable de faire des retours dans le temps.

Ces trois restrictions vont apparaître dans le tracé des histoires spatio-temporelles dans un espace temporel comme le montre la figure suivante :

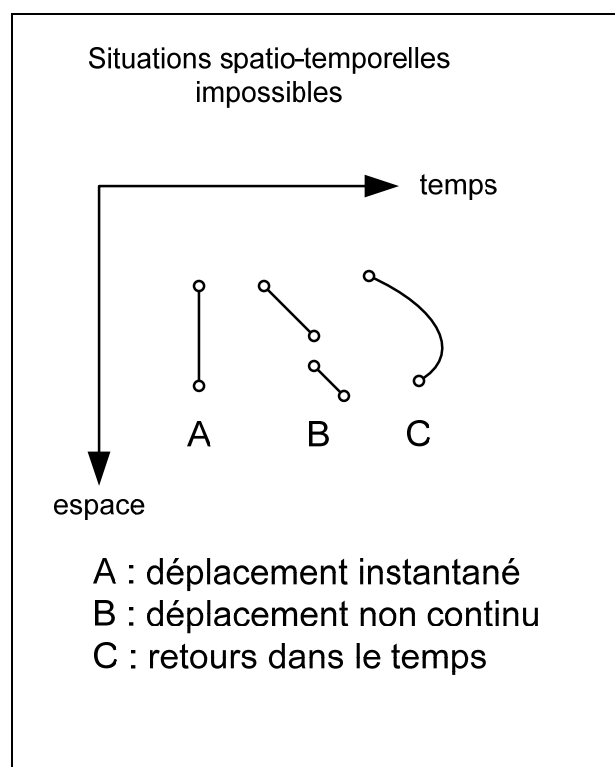


Figure 22: Situations spatio-temporelles impossibles.

Découpage des déplacements

Dès lors que l'on considère un déplacement plus complexe, il va être nécessaire de le décomposer pour permettre son analyse. Cependant, il n'est pas aisé de savoir où le sectionner. Dans l'exemple suivant, plusieurs possibilités peuvent être envisagées.

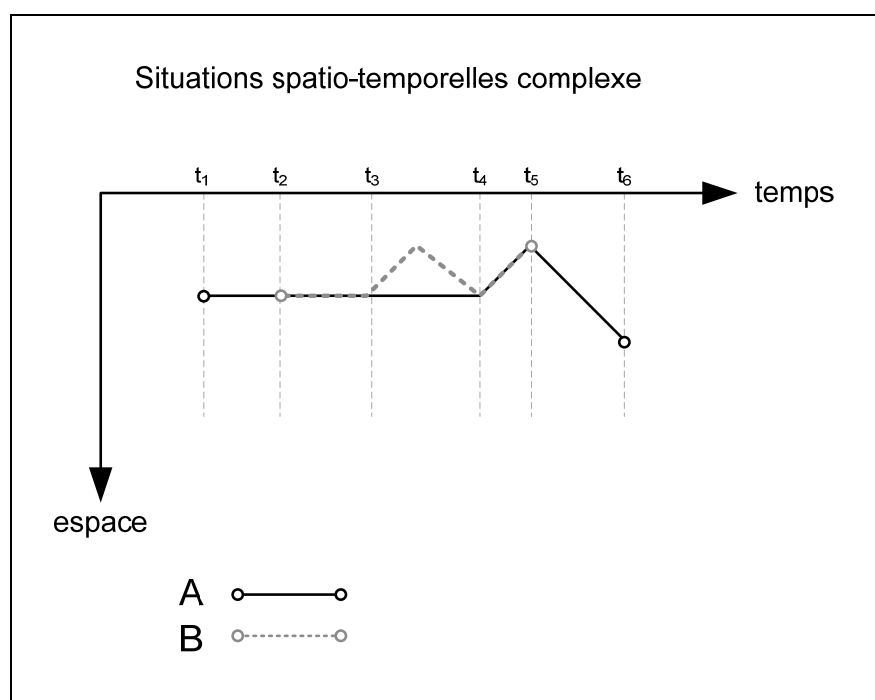


Figure 23: Situation spatio-temporelle complexe entre deux points dynamiques.

Dans cette situation, on voit que les objets A et B se déplacent de manières différentes. On peut se demander de quelle manière traiter ce problème. Plusieurs solutions sont possibles. Premièrement, ne pas découper et avoir une relation spatio-temporelle pour chacune des situations dans ce cas. Il est également possible de découper les segments à chacun des nœuds (naissance ou mort) d'un des points. Enfin, il est envisageable de traiter différemment chaque partie entre les croisement des segments et les nœuds. Ce dernier découpage nécessiterait la gestion de 5 relations spatio-temporelles pour cette configuration (t_1-t_2 , t_2-t_3 , t_3-t_4 , t_4-t_5 , t_5-t_6). On voit directement que cela entraînerait une augmentation du nombre d'opérations à effectuer malgré que les relations soient alors des plus simples. Le découpage se basant sur les nœuds (t_1-t_2 , t_2-t_4 , t_4-t_6) créerait au maximum 3 relations à partir d'une. Nous n'aurions cependant dans ce cas plus que des relations temporelles de type « equal » car il n'y aurait plus de relation entre les objets quand un seul des deux existe sur l'intervalle de temps étudié (cas de l'étude des relations spatio-temporelles entre A et B sur l'intervalle de temps t_1-t_2). Enfin, ne pas le découper serait une solution qui ne limiterait pas la complexité mais qui serait en accord avec un des principes définis par ALLEN dans sa théorie des intervalles temporels (Allen, 1983). En effet, d'après lui, il n'est pas possible de découper un intervalle qui représente le mouvement d'un objet. Il donne comme exemple le lancé d'une balle. L'intervalle décrivant le lancé commence au moment où la balle

quitte la main du lanceur et termine lorsque celle-ci touche le sol. Si l'on découpe cet intervalle, il n'y aura plus de sens physique aux extrémités des intervalles ainsi créés. On comprend donc pourquoi cette situation semble la plus intéressante à envisager.

Relations possibles

Décrire l'ensemble des possibilités de relations spatio-temporelles entre deux points en mouvement semble assez ardu. Pour ce faire, nous avons abordé le problème différemment. Dans leur modèle de relations topologiques, EGENHOFER et HERRING définissent 33 relations topologiques possibles entre deux lignes dans un espace à deux dimensions (Egenhofer and Herring, 1990).

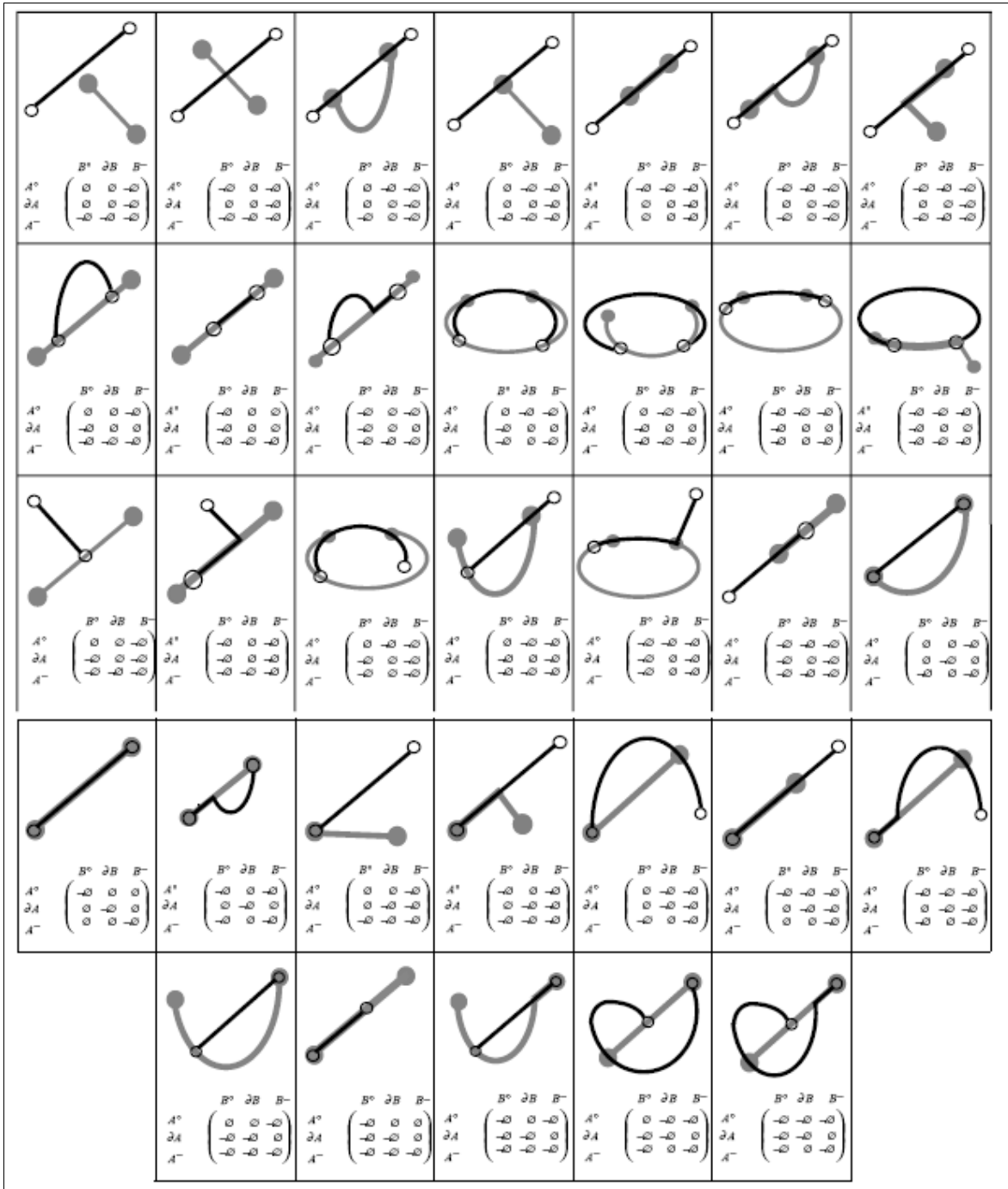


Figure 24: Relations topologiques entre 2 lignes dans un espace à 2 dimensions (Egenhofer and Herring, 1990) p15.

Ces 33 relations sont donc théoriquement celles vers lesquelles seront généralisées toutes les relations spatio-temporelles dans un espace primitif. Les relations spatio-temporelles dans un espace temporel seront quant à elles la déclinaison de toutes les possibilités temporelles de ces relations. Ce qui théoriquement fait 429 (33*13) possibilités. Heureusement, beaucoup de ces relations sont impossibles. Le tableau suivant représente un extrait la méthode utilisée pour deux relations.

	before	meets	overlaps	finished	contains	started	equal	starts	during	finishes	overlap- ped	met	after

Figure 25: Exemple de relations spatio-temporelles entre deux points dynamiques dans un espace temporel.

Relations impossibles

Nous pouvons représenter toutes les relations topologiques entre deux lignes qui ne seront jamais rencontrées lors de la généralisation vers un espace-temps primitif de l'histoire spatio-temporelle du déplacement d'un mobile. Notons que les conditions posées au début du chapitre qui définissent qu'il n'est pas possible d'avoir de déplacement instantané, de déplacement non continu et de déplacement vers le passé sont toujours valables.

Les relations topologiques représentées à la figure suivante incluent obligatoirement un retour dans le passé pour pouvoir être rencontrées. Il est dès lors possible de les exclure de l'analyse.

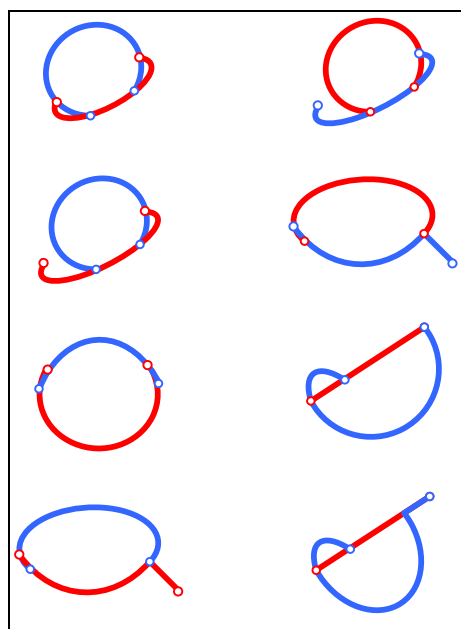


Figure 26: Relations topologiques entre deux lignes impossibles à réaliser par le mouvement de deux points dans un espace temporel.

VI. Développements futurs

L'analyse que nous avons effectuée a porté essentiellement sur des objets ponctuels statiques dans un espace linéaire. Nous avons également abordé les principales difficultés qui surviennent lors de l'analyse d'objets dynamiques. Il est évident que cette analyse doit être continuée. Nous allons ici donner les pistes que nous comptons explorer dans notre recherche future.

a. Modèle dynamique

Premièrement, il serait intéressant de continuer le développement du modèle dynamique, qui bien qu'étant toujours à l'état embryonnaire a déjà fait l'objet de beaucoup de recherches. La suite du travail va consister à effectuer une représentation exhaustive de tous les mouvements spatio-temporels à considérer. Il sera ensuite nécessaire de généraliser ces relations spatio-temporelles dans un espace-temps primitif. La démarche à effectuer est sensiblement la même que celle proposée pour des objets statiques dans ce mémoire.

Une étape à ne pas négliger sera l'étude de la pertinence de cette généralisation. Avec ce type de données, il va être possible de réaliser des études de collision, de déplacement,... L'ébauche d'un prototype pourrait être intéressante dans cette étape de recherche.

b. Evolution des dimensions

Tant qu'à présent, nous nous sommes basés sur des objets de petite dimensions pour faciliter l'analyse. Nous sommes conscients qu'il serait intéressant d'augmenter progressivement le nombre de dimensions dans lequel les objets évoluent ainsi que les dimensions des objets eux-mêmes. Le but ultime serait de pouvoir proposer un modèle généralisé qui simplifierait l'analyse spatio-temporelle pour des objets tridimensionnels dans un espace temporel à 4 dimensions (3D + temps).

c. Choix de relations spatiales plus descriptives

L'analyse des histoires spatio-temporelles dans l'espace-temps primitif que nous effectuons se base sur les relations topologiques de EGENHOFER. Il serait également intéressant d'envisager un modèle de relations spatiales plus évolué qui permettrait de décrire ces histoires en perdant moins d'informations tout en restant dans un formalisme connu. Nous pensons directement au modèle DEM proposé par CLEMENTINI (Clementini et al., 1993), mais d'autres sont envisageables.

VII. Conclusions

De nos jours, avec l'augmentation du nombre de techniques d'acquisition de données spatiales et temporelles, nous disposons d'une énorme quantité d'informations spatio-temporelles. La plupart du temps, ces données concernent des mobiles (GPS-embarqués, Radio-téléométrie,...). Pour exploiter efficacement toutes les potentialités de ces données, il est nécessaire de développer des méthodes d'analyses et de raisonnement spatio-temporel. La recherche concernant les relations spatio-temporelles en fait partie. Grâce à celles-ci, il sera possible d'effectuer des requêtes plus performantes sur toutes ces données ainsi que des modélisations et, plus tard, l'élaboration de réalités virtuelles.

Ce mémoire est basé sur le constat suivant : l'analyse des relations spatiales augmente très vite en complexité dès que l'on y inclut le temps. Pour remédier à ce problème, nous avons proposé une ébauche de modèle qui pourrait être la base à une simplification de l'analyse spatio-temporelle. Le principe de ce modèle est de considérer les relations non pas dans un espace temporel où les dimensions spatiales et temporelles sont bien différenciées, mais dans un espace-temps primitif où l'on ne fait pas de distinction entre les dimensions. De l'analyse de points dans un espace à une dimension, nous arrivons ainsi à l'analyse de ligne (histoires spatio-temporelles) dans un espace à deux dimensions. Cette analyse peut se faire à l'aide de relations topologiques connues de tous et communément acceptées.

Cette généralisation dans un espace-temps primitif entraîne une perte d'information. Néanmoins comme nous l'avons montré par un exemple pratique, la généralisation n'empêche pas de réaliser des analyses spatio-temporelles. De plus, nous pensons que ce modèle pourrait être utilisé en amont des modèles de relations spatio-temporelles classiques pour avoir rapidement une information où sélectionner rapidement une catégorie d'objets entretenant certaines relations.

L'analyse s'est ensuite portée sur des objets ponctuels en mouvement. Pour ceux-ci, nous avons donné les règles générales à prendre en compte lors de l'analyse. Nous avons également mis en évidence les problèmes qui pourraient survenir dans la suite de l'analyse (relations impossibles et découpages temporels) et les relations spatio-temporelles d'ores et déjà impossibles.

Au final, nous pensons avoir répondu aux attentes de ce mémoire. D'une part, nous avons décrit toutes les relations spatio-temporelles pour deux points statiques dans un espace à une dimension. D'autre part, nous avons généralisé ces relations dans un espace temps primitif. Enfin, nous avons montré que ce genre d'analyse reste pertinent pour certaines analyses spatio-temporelles. De plus, dans le cadre d'une recherche scientifique de plus longue haleine, nous avons proposé des étapes de recherches qui nous semblent intéressantes à suivre pour proposer un modèle cohérent et proche de la perception des utilisateurs. Nous pensons que cette voie de recherche est prometteuse et qu'elle pourrait aboutir rapidement à des résultats concrets.

VIII. Bibliographie

- ALLEN, J. F. (1983) Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. *Communications of the ACM - The University of Rochester*, 26, 832-843.
- ALLEN, J. F. (1984) Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*, 23, 123-154.
- ALLEN, J. F. (1991) Time and time again: the many ways to represent time. *International Journal of Intelligent Systems*, 6, 341-355.
- ASHER, N. & VIEU, L. (1995) Toward a Geometry for Common Sense: A Semantics and a Complete Axiomatization for Mereotopology. IN MELLISH, C. (Ed.) *Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*. San Francisco, USA, Morgan Kaufmann.
- BALBIANI, P. & FARIÑAS DEL CERRO, L. (1996) A relational model of movement. *Logique et Analyse*, 155-156, 369-378.
- BALBIANI, P. & MULLER, P. (2000) Le raisonnement spatial. IN H. PRADE, R. J., C. GARBAY (Ed.) *Le temps, l'espace et l'évolutif en sciences du traitement de l'information*. Cepadues Editions ed. Marseille.
- BENNETT, B. (1994) Spatial Reasoning with Propositional Logics. IN DOYLE, J., SANDEWALL, E. & TORASSO, P. (Eds.) *Proceedings of the Conference Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR 1994)*. San Francisco, USA, Morgan Kaufmann.
- BENNETT, B. (1997) Logical Representations for Automated Reasoning about Spatial Relationships. *School of Computer Studies*. Leeds, University of Leeds, School of Computer Studies.
- BILLEN, R. (2002) Nouvelle perception de la spatialité des objets et de leurs relations. Développement d'une modélisation tridimensionnelle de l'information spatiale. *Département de Géographie - Unité de Géomatique*. Liège, Université de Liège.
- CLARAMUNT, C. & JIANG, B. (2000) A representation of relationships in temporal spaces. IN ATKINSON, P. & MARTIN, D. (Eds.) *Innovations in GIS VII: GeoComputation*. London, Taylor & Francis.
- CLARAMUNT, C. & JIANG, B. (2001) An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions. *Journal of Geographical Systems*, 3, 411-428.
- CLEMENTINI, E. & DI FELICE, P. (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., DI FELICE, P. & HERNANDEZ, D. (1997) Qualitative representation of positional information. *Artificial Intelligence*, 95, 317-356.
- CLEMENTINI, E., DI FELICE, P. & VAN OOSTEROM, P. (1993) A Small Set of Formal Topological Relationships Suitable for End-User Interaction. IN ABEL, D. J. & OOI, B. C. (Eds.) *Proceedings of the Third international Symposium on Advances in Spatial Databases*. London, Springer-Verlag.
- COHN, A. G. (1995) A Hierarchical Representation of Qualitative Shape based on Connection and Convexity. IN FRANK, A. (Ed.) *Proceedings of the COSIT 1995, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag.
- COHN, A. G. (1996) Calculi for Qualitative Spatial Reasoning. IN CLAMET, J., CAMPBELL, J. & PFALZGRAF, J. (Eds.) *Artificial Intelligence and Symbolic Mathematical Computation*. Berlin, Springer-Verlag.

- COHN, A. G., BENNETT, B., GOODAY, J. M. & GOTTS, N. M. (1997a) Qualitative Spatial Representation and Reasoning with the Region Connection Calculus. *Geoinformatica*, 1, 275-316.
- COHN, A. G., BENNETT, B., GOODAY, J. M. & GOTTS, N. M. (1997b) Representing and Reasoning with Qualitative Spatial Relations about Regions. IN STOCK, O. (Ed.) *Temporal and spatial reasoning*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- COHN, A. G., GOTTS, N. M., RANDELL, D. A., CUI, Z., BENNETT, B. & GOODAY, J. M. (1997c) Exploiting Temporal Continuity in Qualitative Spatial Calculi. IN GOLLEDGE, R. G. & EGENHOFER, M. (Eds.) *Spatial and Temporal Reasoning in Geographical Information Systems*. California, USA, Elsevier.
- COHN, A. G. & HAZARIKA, S. M. (2001) Qualitative Spatial Representation and Reasoning: An Overview. *Fundamenta Informaticae*, 46, 1-29.
- EGENHOFER, M. (1989) A formal definition of Binary Topological Relationships. IN LITWIN, W. & SCHEK, H. (Eds.) *Third International Conference on Foundations of Data Organization and Algorithms (FODO)*. Paris, France, Springer-Verlag.
- EGENHOFER, M. (1991) Reasoning about Binary Topological Relations. IN GÜNTHER, O. & SCHEK, H. (Eds.) *Proceedings of the Second international Symposium on Advances in Spatial Databases*. London, Springer-Verlag.
- EGENHOFER, M. & HERRING, J. (1990) Categorizing Binary Topological Relations Between Regions, Lines and Points in Geographic Databases. *Technical Report*. Department of Surveying Engineering, University of Maine.
- EGENHOFER, M. & MARK, D. M. (1995) Modeling Conceptual Neighborhood of Topological Line-Region Relations. *International Journal of Geographic Information Systems*, 9, 555-565.
- EGENHOFER, M. J. & MARK, D. (1994) Modeling Spatial Relations Between Lines and Regions: Combining Formal Mathematical Models and Human Subjects Testing. *Cartography and Geographic Information System*, 21, 195-212.
- FORBUS, D. (1990) Qualitative Physics : Past Present and Future. IN WELD, D. S. & DE KLEER, J. (Eds.) *Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems*. San Mateo, California, USA, Morgan Kaufmann.
- FRANK, A. U. (1992) Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space. *Journal of Visual Languages & Computing*, 3, 343-371.
- FREKSA, C. (1991a) Conceptual Neighborhood and its role in temporal and spatial reasoning. IN SINGH, M. & TRAVÉ-MASSUYÈS, L. (Eds.) *Proceedings of the IMACS Workshop on Decision Support System and Qualitative Reasoning*. Amsterdam, Holland.
- FREKSA, C. (1991b) Qualitative Spatial Reasoning. IN MARK, D. M., A. U. FRANK (Ed.) *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- GEREVINI, A. (1997) Reasoning about time and actions in AI. IN STOCK, O. (Ed.) *Spatial and Temporal Reasoning*. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher.
- GEREVINI, A. & NEBEL, B. (2002) Qualitative Spatio-Temporal Reasoning with RCC-8 and Allen's Interval Calculus: Computational Complexity. *ECAI 2002*. IOS Press.
- GOLUMBIC, M. C. (1998) Reasoning about time. *Proceedings of symposia in applied mathematics on Mathematical aspects of artificial intelligence (MAAI 1996)*. Orlando, USA, American Mathematical Society.
- GOTTS, N. M. (1994) How Far Can We '{C}'? Defining a Doughnut Using Connection Alone. IN DOYLE, J., SANDEWALL, E. & TORASSO, P. (Eds.) *Proceedings of the Conference Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR 1994)*. San Francisco, USA, Morgan Kaufmann.
- GOTTS, N. M., GOODAY, J. M. & COHN, A. G. (1996) A connection based approach to common-sense topological description and reasoning. *The Monist*, 79, 51-75.

- HÄGERSTAND, T. (1967) *Innovation Diffusion as Spatial Process*. Chicago, USA, The University of Chicago Press.
- HALLOT, P. (to appear) Spatio-temporal relationships in a primitive space: an attempt to simplify spatio-temporal analysis. IN RAUBAL, M., MILLER, H. J., FRANK, A. & GOODCHILD, M. (Eds.) *Proceedings of the - Fourth International Conference Geographic Information Science, GIScience 2006*. Münster, Lecture Notes in Computer Science, Springer.
- HERNÁNDEZ, D. (1994) *Qualitative representation of spatial knowledge*, Berlin ; New York, Springer-Verlag.
- KONTCHAKOV, A., KURUCZ, A., WOLTER, F. & ZAKHARYASCHEV, M. (to appear) Spatial logic + temporal logic = ? IN AIELLO, M., PRATT-HARTMANN, I. & VAN BENTHEM, J. (Eds.) *The Logic of Space*. Kluwer.
- LIGOZAT, G. (2006) Raisonnement spatial qualitatif.
- MCCARTHY, J. M. & HAYES, P. (1969) Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence. *Machine Intelligence*, 4, 463-502.
- MULLER, P. (1998) Éléments d'une théorie du mouvement pour la formalisation du raisonnement spatio-temporel de sens commun. *Institut de recherche en informatique de Toulouse*. Toulouse, Université Paul Sabatier.
- MULLER, P. (1999) Raisonnement spatial qualitatif : le cas du mouvement. *Revue d'intelligence artificielle*, 13, 325-353.
- MULLER, P. (2002) Topological Spatio-Temporal Reasoning and Representation. *Computational Intelligence*, 18, 420-450.
- PANI, A. K. & BHATTACHARJEE, G. P. (2001) Temporal representation and reasoning in artificial intelligence: A review. *Mathematical and Computer Modelling*, 34, 50-80.
- PANTAZIS, D. & DONNAY, J.-P. (1996) *La conception de SIG méthode et formalisme*, Paris, Hermes.
- 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, 411-461.
- RANDELL, D. A., CUI, Z. & COHN, A. G. (1992) A Spatial Logic Based on Regions and Connection. IN NEBEL, B., RICH, C. & SWARTOUT, W. (Eds.) *Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Third International Conference*. San Mateo, California, Morgan Kaufmann.
- RANDELL, D. A. & WITKOWSKI, M. (2004) Tracking Regions using Conceptual Neighbourhoods. *Proceedings of the Workshop on Spatial and Temporal Reasoning ECAI - 2004*.
- VAN DE WEGHE, N. (2004) Representing and Reasoning about Moving Objects: A Qualitative Approach (Volume I). *Department of Geography - Faculty of Sciences*. Ghent, Ghent University.
- VAN DE WEGHE, N., COHN, A. G., BOGAERT, P. & DE MAEYER, P. (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., COHN, A. G., DE TRE, G. & DE MAEYER, P. (2006) A Qualitative Trajectory Calculus as a Basis for Representing Moving Objects in Geographical Information Systems. *Control and Cybernetics*, 35.
- VIEU, L. (1997) Spatial representation and reasoning in AI. IN STOCK, O. (Ed.) *Spatial and Temporal Reasoning*. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher.
- WOLTER, F. & ZAKHARYASCHEV, M. (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. & ZAKHARYASCHEV, M. (2001) Qualitative spatio-temporal representation and reasoning: a computational perspective. IN LAKEMEYER, G. & NEBEL, B. (Eds.) *Exploring Artificial Intelligence in the New Millenium*. Morgan Kaufmann.

IX. Bibliographie consultée

- AL-TAHA, K., SNODGRASS, R. T. & SOO, M. D. (1994) Bibliography on spatiotemporal databases. *International Journal of Geographic Information Systems*, 8, 95-103.
- BALBIANI, P. & CONDOTTA, J.-F. (2001) Une logique pour le raisonnement spatio-temporel basée sur PLTL et l'algèbre des rectangles. IN HERZIG, A. (Ed.) *Journées nationales sur les modèles de raisonnement (JNMR 2001)*. France, PRC-GDR I3.
- BALBIANI, P. & CONDOTTA, J.-F. (2002) Computational Complexity of Propositional Linear Temporal Logics Based on Qualitative Spatial or Temporal Reasoning. IN ARMANDO, A. (Ed.) *4th International Workshop, FroCoS 2002*. Santa Margherita Ligure, Italy, Springer Berlin.
- BENELLI, G., CAPORALI, M., RIZZO, A. & ELISEA, R. (2001) Design concepts for learning spatial relationships. *Proceedings of the 19th annual international conference on Computer documentation*. Santa Fe, USA, ACM Press.
- BËOHLEN, M. H., JENSEN, C. S. & SCHOLL, M. O. (1999) *Spatio-temporal database management : International Workshop STDBM'99, Edinburgh, Scotland, September 10-11, 1999 : proceedings*, New York, Springer.
- BLOCH, I., COLLIOT, O. & CESAR, R. (2004) Modélisation de la relation spatiale "entre" à partir de notions de convexité et de visibilité floue. *Actes des Rencontres francophones sur la Logique Floue et ses Applications LFA 2004*. Nantes, France.
- CHEN, M. & TUCKER, J. V. (2000) Constructive Volume Geometry. *Computer Graphics Forum*, 19, 281-293.
- CLARAMUNT, C. & JIANG, B. (2000) Hierarchical reasoning in space and time IN FORER, P., YE, H., A. G. O. & HE, J. (Eds.) *9th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH)*. Beijing, P.R.China.
- CLARAMUNT, C., JIANG, B. & BARGIELA, A. (2000) A new framework for the visualisation of urban traffic data. *Transportation Research Part C*, 8, 167-184.
- CLARAMUNT, C. & THÉRIAULT, M. (1995) Managing Time in GIS: An Event-Oriented Approach. *Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases*. London, UK, Springer-Verlag.
- CLARAMUNT, C., THÉRIAULT, M. & PARENT, C. (1998) A qualitative representation of evolving spatial entities in Two-dimensional Topological Spaces. IN CARVER, S. (Ed.) *Innovation in GIS V*. London, Taylor & Francis.
- CLEMENTINI, E. & DI FELICE, P. (1998) Topological invariants for lines. *IEEE Transactions and Knowledge and Data Engineering*, 10, 38-54.
- CLEMENTINI, E., SHARMA, J. & EGENHOFER, M. (1994) Modeling Topological Spatial Relations: Strategies for Query Processing. *Computers and Graphics*, 18, 815-822.
- CLIFFORD, J., GADIA, S. & TANSEL, A. U. (1993) *Temporal databases: theory, design, and implementation* Benjamin/Cummings series on database systems and applications Tansel, Abdullah Uz; Clifford, James; Gadia, Shashi; e.a, Benjamin/Cummings Redwood City (Calif.).
- COHN, A. G., GOODAY, J. M. & BENNETT, B. (1994) A Comparaison Of Structures In Spatial And Temporal Logics. IN CASATI, R., SMITH, B. & WHITE, G. (Eds.) *Philosophy and the Cognitive Science*. Hilder-Pichler-Tempsky.

- DUGAT, V. & LARVOR, Y. (2000) Vers une analyse qualitative du mouvement. *Reconnaissance des formes et intelligence artificielle*. Paris, France, AFRIF-AFIA.
- EGENHOFER, M. (1993) A Model for Detailed Binary Topological Relationships. *Geomatica*, 47, 261-273.
- EGENHOFER, M. & AL-TAHA, K. (1992) Reasoning about Gradual Changes of Topological Relationships. IN FRANK, A., I. CAMPRAI, U. FORMENTINI (Ed.) *Theory and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*. Pisa, Italy, Springer-Verlag.
- EGENHOFER, M. & FRANZOSA, R. D. (1991) Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographic Information Systems*, 5, 161-174.
- ERWIG, M. & SCHNEIDER, M. (2003) A visual language for the evolution of spatial relationships and its translation into a spatio-temporal calculus. *Journal of Visual Languages and Computing*, 14, 181-211.
- FARIA, G., MEDEIROS, C. B. & NASCIMENTO, M. A. (1998) An extensible framework for spatio-temporal database applications. *Statistical and Scientific Database Management*.
- GALTON, A. (1995) Towards a qualitative theory of movement. IN KUHN, W. & FRANK, A. (Eds.) *Spatial Information Theory: a theoretical basis for GIS*. Berlin, Springer Verlag.
- GIERTSEN, C. & LUCAS, A. (1994) 3D Visualization for 2D GIS: an Analysis of the Users' Needs and a Review of Techniques. *Computer Graphics Forum*.
- HADZILACOS, T. (2003) *Advances in spatial and temporal databases : 8th international symposium, SSTD 2003, Santorini Island, Greece, July 24-27, 2003 : proceedings*, Berlin ; New York, Springer.
- HAKLAY, M. M. (2006) Comparing Map Calculus and Map Algebra in Dynamic GIS. IN DRUMMOND, J., BILLEN, R., FORREST, D. & JO?O, E. (Eds.) *Dynamic & Mobile GIS: Investigating Change in Space and Time*. London, Taylor & Francis.
- HAZARIKA, S. M. (2005) Qualitative Spatial Change: Space-time Histories and Continuity. *School of Computing*. Leeds, University of Leeds.
- HAZARIKA, S. M. & COHN, A. G. (2002) Abducing Qualitative Spatio-Temporal histories from Partial Observations. IN FENSEL, D., GUINCHIGLIA, F., MCGUINNESS, D. & WILLIAMS, M.-A. (Eds.) *Proceedings of the Eight Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR 2002)*. Morgan Kaufmann.
- HONRSBY, K. & EGENHOFER, M. (1997) Qualitative Representation of Change. IN HIRTLE, S. & FRANK, A. (Eds.) *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS*. Springer-Verlag.
- IVANOV, D. & KUZMIN, Y. (2001) Spatial Patches - A Primitive for 3D Model Representation. *Computer Graphics Forum*.
- JANKOWSKI, P., NYERGES, T., ROBISCHON, S., RAMSEY, K. & TUTHILL, D. (2006) Design Considerations and Evaluation of a Collaborative, Spatio-Temporal Decision Support System. *Transactions in GIS*, 10, 335-354.
- JEONG, S.-H., PATON, N. W., FERNANDES, A. A. A. & GRIFFITHS, T. (2005) An Experimental Performance Evaluation of Spatio-Temporal Join Strategies. *Transactions in GIS*, 9, 129-156.
- KLIMESOVA, D. (2004) Several comments on temporal modeling in GIS. *OBJEKTY 2004 Sborník příspěvků devátého ročníku konference*. Ostrava, VU TU.
- KUHN, W., WORBOYS, M. & TIMPF, S. (2003) *Spatial information theory : foundations of geographic information science : international conference, COSIT 2003, Ittingen, Switzerland, September 24-28, 2003 : proceedings*, Berlin ; New York, Springer.
- LEE, J.-Y. (2002) Integrating Spatial and Temporal Relationships Operators into SQL3 for Historical Data Management. *ETRI Journal*, 24, 226-238.
- MAKI, A. (2005) 3D Surface Reconstruction of a Moving Object in the Presence of Specular Reflection. IN ROLI, F. & VITULANO, S. (Eds.) *13th International Conference on Image Analysis and Processing - ICIAP 2005*.

- MILLER, H. J. (2005) A Measurement Theory for Time Geography. *Geographical Analysis*, 37, 17-45.
- NOH, S.-Y. (2004) Literature Review on Temporal, Spatial, and Spatiotemporal Data Models. *Technical Report - Computer Science*. Iowa, USA, Iowa State University.
- NOYON, V., DEVOGELE, T. & CLARAMUNT, C. (2005) A formal model for representing point trajectories in two-dimensional spaces. *International Conference on Conceptual Modelling ER'05*. Klagenfurt, Austria, Springer-Verlag.
- PELEKIS, N., THEODOULIDIS, B., KOPANAKIS, I. & THEODORIDIS, Y. (2004) Literature review of spatio-temporal database models. *The Knowledge Engineering Review*, 19, 235-274.
- RENZ, J. & GUESGEN, H. W. (2004) Spatial and temporal reasoning. *AI Communication*, 17, 183-184.
- RENZ, J. & LIGOZAT, G. (2005) Weak Composition for Qualitative Spatial and Temporal Reasoning. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*. Sitges, Spain.
- REZAYAN, H., FRANK, A., KARIMIPOUR, F. & DELAVAR, M. R. (2005) Temporal Topological Relationships of Convex Spaces in Space Syntax Theory. IN TANG, X. E. A. (Ed.) *International Symposium on Spatio-temporal Modeling, Spatial Reasoning, Analysis, Data Mining and Data Fusion*. Beijing, China, Chinese Academy of Surveying and Mapping Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- SENGUPTA, R. & YAN, C. (2004) A Hybrid Spatio-Temporal Data Model and Structure (HST-DMS) for Efficient Storage and Retrieval of Land Use Information. *Transactions in GIS*, 8, 351-366.
- SMITH, J., MACKANESS, W., ALLISON, K. & WILLIAMSON, I. (2004) Spatial Data Infrastructure Requirements for Mobile Location Based Journey Planning. *Transactions in GIS*, 8, 23-44.
- SONG, Y. & CHUA, D. K. H. (2005) Detection of spatio-temporal conflicts on a temporal 3D space system. *Advances in Engineering Software*, 36, 814-826.
- STELL, J. G. & WEBSTER, J. (to appear - 2007) Oriented Matroids as a Foundation for Space in GIS. *Computers, Environment, and Urban Systems*, ?, ?
- STOCK, O. (Ed.) (1997) *Spatial and temporal reasoning*, Dordrecht ; Boston, Kluwer Academic Publishers.
- THÉRIAULT, M., CLARAMUNT, C. & VILLENEUVE, P. Y. (1999) A Spatio-temporal taxonomy for the Representation of Spatial Set Behaviours. IN BÉOHLEN, M. H., JENSEN, C. S. & SCHOLL, M. O. (Eds.) *Spatio-temporal database management : International Workshop STDBM'99*. Edinburgh, Scotland, Springer.
- TRUDEL, A. (1997) A temporal knowledge representation approach based on elementary calculus. *Computational Intelligence*, 13, 466-485.
- WANG, Y.-H. (2003) Image indexing and similarity retrieval based on spatial relationships model. *Information Sciences*, 154, 39-58.
- WELD, D. S. & DE KLEER, J. (Eds.) (1990) *Readings in Qualitative Reasoning About Physical Systems*, San Mateo, Canada, Morgan Kaufman.
- WILMSEN, D. (2004) Spatio-temporal Reasoning, Spatial Database Systems, Spatio-Temporal Modeling. *Department of Spatial Information Science and Engineering*. Orono, USA, University of Maine.
- YAO, X. (2003) Research issues in spatio-temporal data mining. *University Consortium for Geographic Information Science (UCGIS) workshop on Geospatial Visualization and Knowledge Discovery*. Lansdowne, Virginia, USA.
- YUAN, M. (1996) Temporal GIS and spatio-temporal modeling. *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling CD-ROM*.

X. Liste des annexes

Modèle de relations spatio-temporelles dans un espace temporel et généralisation dans un espace-temps primitif.....	56
--	----