
MADS, modèle conceptuel spatio-temporel

Christine Parent^{*} – **Stefano Spaccapietra**^{**} – **Esteban Zimányi**^{**}
Pier Donini^{**} – **Corinne Plazanet**^{**} – **Christelle Vangenot**^{**}
Nadia Rognon^{***} – **Pierre-André Crausaz**^{***}

^{*} HEC-INFORGE, Uni Lausanne, CH 1015 Lausanne, christine.parent@hec.unil.ch

^{**} LBD DI, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH 1015 Lausanne

^{***} SIRS et HYDRAM, DGR, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH 1015 Lausanne
{Prénom.Nom}@epfl.ch <http://lbdwww.epfl.ch>

RESUME. Malgré les bienfaits reconnus de l'approche conceptuelle pour la modélisation d'applications, les modèles conceptuels spatio-temporels existants ne satisfont pas les besoins des concepteurs. Dans cet article nous identifions d'abord les objectifs d'un modèle conceptuel spatio-temporel et ensuite nous présentons le modèle MADS selon trois axes: concepts structurels, concepts spatiaux, concepts temporels. L'orthogonalité des concepts permet d'obtenir un modèle à la fois simple (puisque ces concepts sont indépendants) et puissant (puisque les concepts peuvent être combinés librement). Le modèle a été implanté et des traductions existent vers d'autres modèles opérationnels. L'article décrit brièvement les réalisations en cours ou prévues pour offrir aux utilisateurs une interface conceptuelle de définition et d'accès aux bases de données spatio-temporelles. Nous donnons également les résultats d'une expérience de modélisation qui a permis de vérifier les qualités du modèle.

ABSTRACT. Despite the well-established benefits of conceptual modeling for application design, current spatio-temporal conceptual models do not cope satisfactorily with designers' requirements. In this paper we first identify the goals of a spatio-temporal conceptual model and then we describe the MADS model along the structural, spatial, and temporal dimensions. As the modeling concepts are orthogonal, the proposed model achieves both simplicity (as concepts are independent from each other) and expressive power (as concepts may be freely associated). The model has been implemented and can be translated to operational models of existing products. The paper briefly describes the architecture we have defined to support users with a set of conceptual interfaces for defining and accessing spatio-temporal databases. Finally, the paper reports on results of an experimentation which allowed us to assess the qualities of the model.

MOTS-CLES : conception de bases de données, modélisation conceptuelle, modèles de données, bases de données spatiales, bases de données temporelles, systèmes d'information, SIG, bases de données géographiques, outils CASE, expérience pratique.

KEYWORDS : database design, conceptual modeling, data models, spatial databases, temporal databases, information systems, GIS, geographic information systems, CASE tools, practical experiments.

1. Introduction

Les concepteurs de bases de données classiques connaissent bien l'intérêt de passer par une étape de modélisation conceptuelle avant d'aborder la modélisation logique. La première ne s'intéresse qu'à représenter le plus fidèlement possible les caractéristiques intrinsèques des données de l'application, sans se soucier de leur mise en oeuvre. La deuxième, au contraire, vise à décrire les données conformément aux spécificités du logiciel qui sera utilisé pour en assurer la gestion. Les modèles de type entité-association [CHE 76], ou objet-association (OMT [RUM 91]), sont les plus connus et pratiqués au niveau conceptuel. La modélisation logique se partage aujourd'hui entre les modèles relationnels et ceux orientés objets.

Le premier avantage des modèles conceptuels est d'être à la portée des utilisateurs. Ceux-ci peuvent ainsi exprimer, sans les ambiguïtés de la langue naturelle, leur connaissance des données applicatives et participer activement à l'élaboration du schéma conceptuel. Le résultat obtenu est bien meilleur et, parce qu'il est indépendant de l'outil informatique qui assurera sa mise en oeuvre, restera valable en cas de changement technologique (seule la traduction du schéma conceptuel en schéma logique est affectée). Au rythme actuel de l'évolution technologique, notamment pour les outils SIG (Système d'Information Géographique), ceci est un facteur clé de flexibilité car il réduit les coûts et augmente les chances de réussite d'un transfert vers une nouvelle technologie. Enfin, la modélisation conceptuelle, par sa lisibilité, facilite les échanges d'informations entre partenaires d'organisations différentes. A l'époque où l'accès via Internet à des sources d'informations extérieures devient une banalité et une nécessité, la capacité à comprendre la sémantique des informations obtenues est déterminante pour leur utilisation correcte.

Les concepteurs de bases de données spatiales ou temporelles ne jouissent pas, à ce jour, des mêmes privilèges. Ils ne disposent en effet que soit des modèles conceptuels classiques, qui ignorent les concepts spatio-temporels, soit des modèles logiques des SIG, qui reflètent plus les techniques d'implantation interne que des considérations de niveau conceptuel.

Or, dans la modélisation d'applications spatio-temporelles, à la difficulté inhérente de la tâche s'ajoutent les difficultés supplémentaires dues à la complexité des composantes spatiale et temporelle. Déjà, ces applications sont grandes consommatrices de concepts avancés, tels que :

- l'agrégation, ou composition d'objets: par exemple, une ville est composée de quartiers, eux-mêmes composés d'immeubles et de routes,
- la généralisation/spécialisation: par exemple, le concept de route regroupe ceux de route communale, cantonale et nationale,
- la modélisation des champs continus: par exemple, représentation de la profondeur d'un lac de façon à obtenir une valeur en chaque point de l'espace recouvert par le lac.

De plus, plusieurs niveaux d'abstraction spatiale peuvent coexister, induisant des représentations alternatives qu'il faut savoir décrire (localisation, forme et taille) et agencer correctement. Des visions continues de l'espace peuvent s'imbriquer avec des

visions discrètes. L'identification des liens spatiaux pertinents (principalement la proximité, l'inclusion, l'adjacence) n'est pas nécessairement aisée car elle sort du domaine habituel de la modélisation. Les aspects temporels soulèvent des difficultés semblables. Enfin, un dernier obstacle est encore aujourd'hui l'exigence d'une connaissance approfondie des particularités techniques du SIG cible.

Ci-dessous, nous précisons les besoins des concepteurs par une liste de caractéristiques souhaitables pour un modèle conceptuel spatio-temporel. Le constat qu'aucune des propositions déjà avancées ne répond de façon satisfaisante à ces besoins conduit naturellement à développer une nouvelle proposition : le modèle MADS.

Le paragraphe 2 présente les concepts MADS pour la modélisation des données classiques. Le paragraphe 3 aborde la modélisation des données spatiales. Les caractéristiques temporelles sont discutées dans le paragraphe 4. Le paragraphe 5 donne un exemple concret de modélisation. Enfin, le paragraphe 6 conclut l'article. Il est suivi d'une présentation des outils qui sont en cours de réalisation et qui rendent l'approche opérationnelle.

1.1. Besoins et état de l'art

Un modèle conceptuel spatio-temporel doit offrir aux utilisateurs une grande richesse d'expression, pour répondre à la diversité des besoins, et en même temps leur permettre de décrire un schéma de données lisible et facile à appréhender. Un élément clé pour la réalisation de ce double objectif est l'orthogonalité des trois dimensions – structurelle, spatiale et temporelle – du modèle (et plus généralement des concepts du modèle). Orthogonalité signifie ici qu'un choix dans l'une des dimensions ne doit pas limiter les possibilités de choix dans une autre dimension. En particulier, le choix d'une représentation structurelle d'une information (comme objet, attribut, agrégation ou association) doit pouvoir être fait librement, que cette information ait des caractéristiques spatio-temporelles ou non. La figure 1 illustre deux modélisations possibles du fait que des réservoirs sont placés sur des rivières : dans la première, l'information sur les réservoirs est traitée comme une propriété des rivières, et donc modélisée comme un attribut du type d'objet Rivière ; dans la deuxième, les réservoirs sont modélisés comme des objets à part entière, chaque réservoir étant lié par une association à la rivière correspondante. La spatialité des réservoirs comme celle des rivières doit pouvoir être décrite aisément dans les deux modélisations.

Or, cela n'est pas le cas dans les propositions que l'on peut trouver dans la littérature pour la modélisation conceptuelle d'applications à données spatio-temporelles. Comme on le verra ci-après, ces modèles ont fait un choix de représentation qui s'impose au concepteur d'applications. Une telle limitation de sa marge de manoeuvre entraîne l'impossibilité de modéliser fidèlement toutes les situations réelles, alors que cela est l'objectif même de l'approche conceptuelle. A contrario, cette orthogonalité est à la base de la proposition que nous développerons dans cet article.

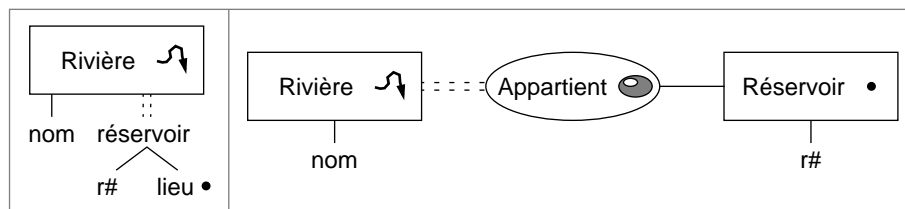


Figure 1. Modélisations alternatives d'une même réalité spatiale

Un deuxième élément clé est la compatibilité avec la modélisation traditionnelle, à savoir le modèle spatio-temporel doit aussi permettre la modélisation de données qui ne sont pas spatiales ou temporelles. Ceci répond à un besoin évident (tout n'est pas spatial ou temporel), conditionne l'utilisation effective du modèle dans la pratique, et permet la réutilisation de bases de données existantes, conçues avec des modèles classiques. Ce critère n'est pas respecté par plusieurs modèles évoqués ci-dessous, notamment dans le domaine temporel.

La connaissance des *liens topologiques* entre les entités du monde réel est également une composante essentielle des besoins des applications à données spatiales. Les SIG actuels répondent en partie à ce besoin en offrant un calcul automatique des liens topologiques à partir des coordonnées physiques des objets. Trois besoins importants restent cependant non satisfaits:

- pouvoir contraindre des objets spatiaux à respecter un lien topologique donné (affirmation a priori de l'existence du lien plutôt que constat a posteriori),
- pouvoir définir une sémantique propre à l'application pour ces liens (par exemple, l'adjacence pourrait être définie comme “se trouvant à une distance réciproque de moins de 300 mètres terrain”), et
- pouvoir décrire explicitement dans le schéma un lien topologique important pour les applications afin de le voir, le nommer et éventuellement lui associer des attributs. Par exemple, une application de gestion routière voudra matérialiser les croisements des routes pour en décrire l'équipement signalétique.

D'autres concepts importants pour la modélisation des données spatiales ou temporelles, tels l'*agrégation*, la *généralisation/spécialisation* et la modélisation des *champs continus*, ont déjà été proposés. Cependant, les caractéristiques qui leur sont associées diffèrent d'un modèle à l'autre. Un travail rigoureux de définition reste nécessaire.

Au point de vue structurel, les modèles proposés pour la modélisation conceptuelle de données spatiales relèvent soit de l'approche entité-association [CHE 76], soit de l'approche orientée objets. Le premier groupe inclut MODUL-R [CAR 93, BED 96] et Géo2 [DAV 93]. Le deuxième groupe inclut GeoOM [TRY 97], POLLEN [GAY 97], et CONGOO [PAN 96]. MODUL-R et POLLEN ont aussi une composante temporelle.

Ces modèles spatiaux diffèrent surtout par leur façon d'intégrer la spatialité. GeoOM et POLLEN représentent explicitement l'espace dans le schéma par un jeu de types d'entités (ou d'objets) géométriques: Point, Ligne ou Surface. On trouvera en [LAU 93] des propositions pour la représentation de ces types géométriques. POLLEN fait de même pour le temps (avec les types d'objets Instant et Intervalle). Les objets de l'application sont décrits de façon traditionnelle. Leur spatialité éventuelle est définie par un lien d'association avec l'un des types géométriques. Cette approche possède deux inconvénients majeurs. D'une part elle tend à surcharger les schémas, qui deviennent vite illisibles du fait de la multiplication des liens. D'autre part elle ne permet d'associer la spatialité qu'aux types d'entités (une association ne peut lier que des types d'entités), et force donc la modélisation comme entité de toute information ayant une caractéristique spatiale.

Une autre approche est de permettre de définir un type d'entités comme spatial (ou temporel, ou les deux). MODUL-R offre ainsi une palette de types spatiaux très complète: point, ligne, surface, complexe (point et ligne, par exemple), alternatif (ligne ou surface, par exemple) et multiple (deux ou plusieurs géométries non déductibles l'une de l'autre). CONGOO, quant à lui, propose une très (trop ?) large variété de types d'objets spatiaux simples ou composés, ce qui en fait un modèle très complet mais aussi très complexe. Cette approche permet d'obtenir des schémas compacts: les types spatiaux et temporels sont représentés par une icône associée au type d'entité. Par contre elle reste réductrice par rapport aux besoins de modélisation.

Une troisième voie est complémentaire de la précédente. Elle associe la spatialité non pas aux types d'entités mais aux attributs. Ainsi, dans GéO2, les objets spatiaux sont décrits par des entités possédant un (ou plusieurs) attribut(s) de domaine *Geometry*. *Geometry* est un type abstrait de données ayant pour structure un ensemble de primitives (point, ligne et surface) avec des fonctions géométriques associées (intersection, union). La structure ensembliste permet ainsi à des entités de même type d'avoir des géométries de dimensions différentes (ligne et surface, par exemple).

Pour ce qui est de la topologie, la plupart des modèles conceptuels permettent uniquement de décrire les liens topologiques à l'aide d'associations classiques, sans sémantique particulière et sans contrôle d'intégrité adéquat. CONGOO offre la possibilité de décrire dans le schéma les liens topologiques autorisés, obligatoires ou interdits entre les entités du monde réel à l'aide de relations topologiques de voisinage et de superposition. Ces "relations topologiques" n'existent qu'en tant que contraintes d'intégrité spatiales: elles ne sont jamais instanciées. Ce ne sont pas des associations au sens entité-association car elles ne lient pas deux occurrences d'entités.

Seul GéO2 propose un concept d'agrégation spatiale qui inclut la propagation de la valeur des attributs et des méthodes, comme préconisé par [EGE 92b]. Quant aux mécanismes d'héritage associés à la généralisation/spécialisation, ils sont trop souvent mal ou pas définis. Enfin, la possibilité de décrire une vue continue de l'espace n'est proposée que par POLLEN et GeoOM. Dans POLLEN, la vue continue d'un objet est exprimée par un lien multivalué vers un autre objet représentant le champ spatial continu, lui-même relié à un objet géométrique Point. GeoOM associe ce concept à l'espace et non à l'instance, ce qui entraîne des problèmes lorsque des entités se chevauchent, c'est-à-dire partagent le même espace.

Sur le plan des notations, l'utilisation de pictogrammes graphiques, comme dans MODUL-R, permet d'appréhender de manière visuelle les différentes caractéristiques spatiales et temporelles. Dans GÉO2, POLLEN et GeoOM, ces informations sont décrites de manière textuelle. Dans POLLEN et GeoOM, il est de plus nécessaire de parcourir les associations pour trouver ces informations. Dans CONGOO, des sigles sont associés aux différents types d'objets spatiaux; la spatialité de l'objet et les contraintes d'intégrité topologique sont décrites textuellement, ce qui est trop lourd pour un utilisateur occasionnel ou non spécialiste.

Dans le domaine des bases de données temporelles, une intense activité de recherche a, ces dernières années, couvert les aspects de modélisation, des langages de requêtes, de standardisation et d'implémentation, comme témoignent les bibliographies (par exemple [TSO 96]), les études (par exemple [OZS 95]), et les livres [TAN 93, CLI 95] qui ont été publiés. Un pas important vers la disponibilité pratique de solutions temporelles a été la conception d'une extension temporelle de SQL-92, appelé TSQL2 [SNO 95].

Si la plupart de ces travaux adoptent une démarche basée sur les modèles logiques (relationnel et orienté objets), il en existe une dizaine qui proposent des modèles conceptuels de type entité-association. On trouvera en [GRE 97] une analyse détaillée de ces propositions. Il en ressort une classification similaire à celle des modèles spatiaux entre: 1) modèles qui représentent le temps comme des objets (type d'entité Date, par exemple), 2) modèles qui associent le temps uniquement aux attributs (pour garder l'historique des valeurs), et 3) modèles qui associent le temps aux attributs comme aux types d'entités (pour garder aussi le cycle de vie des objets). Peu de propositions offrent la possibilité de représenter le futur. Aucune ne s'est intéressée à la dimension spatiale. Dans l'ensemble, les niveaux conceptuels et logiques ne sont pas clairement séparés. Ceci fait conclure aux auteurs [GRE 97] qu'un modèle conceptuel satisfaisant reste à trouver, leur avis reprenant ainsi celui des auteurs d'un rapport détaillé sur l'état des recherches en bases de données temporelles [PIS 94].

1.2. Le modèle conceptuel MADS

L'élaboration du modèle conceptuel MADS (Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles) a été guidée par les objectifs que nous venons d'identifier : 1) l'orthogonalité des dimensions structurelle, spatiale et temporelle, 2) la possibilité de décrire des relations topologiques ou temporelles entre les entités de manière explicite, 3) une définition formelle des concepts tels l'agrégation spatiale ou temporelle, la généralisation/spécialisation et les mécanismes d'héritage associés, 4) la possibilité de décrire des champs spatiaux continus, 5) la provision de types spatiaux génériques au delà des types de base, et enfin 6) des notations visuelles intuitives. A noter que MADS a aussi pour objectif de dépasser le strict cadre de la modélisation cartographique pour satisfaire plus largement les besoins des applications spatio-temporelles.

Dans la dimension structurelle, MADS permet la modélisation des données classiques en offrant un ensemble de concepts bien connus: type d'objet, attribut, encapsulation des méthodes, type d'association, lien de généralisation, lien d'agrégation, ainsi

qu'un ensemble de contraintes d'intégrité associées. Les objets et les associations peuvent avoir une structure complexe grâce aux attributs complexes et multivalués. Les types d'objet peuvent être organisés dans des hiérarchies de généralisation (classes/sous-classes) ou d'agrégation. Le type d'association permet la modélisation explicite des liens n-aires entre objets.

Suivant le principe d'orthogonalité, la spatialité et/ou la temporalité peuvent être associés aux types d'objet, aux liens d'association et d'agrégation, ainsi qu'aux attributs. Le modèle offre également la possibilité de représenter des champs continus dans l'espace grâce au concept d'attribut variable. Au point de vue ergonomique, la spatialité et la temporalité sont visualisées dans les diagrammes par des pictogrammes, ce qui permet une appréhension visuelle immédiate et non ambiguë de ces caractéristiques supplémentaires. Ces aspects ergonomiques sont essentiels pour le développement d'outils CASE d'édition visuelle d'un schéma spatio-temporel ou de formulation visuelle interactive de requêtes d'interrogation et de mise à jour. Le développement de tels outils fait également partie des nos objectifs.

2. Modélisation des données classiques

Le modèle MADS est basé sur un modèle de type objet + relation [SPA 92] qui offre les concepts usuels de: type d'objet, type d'association, attribut, lien de généralisation, lien d'agrégation ainsi qu'un ensemble de contraintes d'intégrité associées. Ces concepts sont définis brièvement ci-dessous.

- Un **objet** représente une entité du monde réel qu'on veut modéliser.
- Un **type d'objet** représente un ensemble d'entités du monde réel ayant une structure et un comportement similaires.
- Une **association** représente un lien entre deux ou plusieurs objets, où chaque objet joue un rôle donné.
- Un **type d'association** représente un ensemble de liens avec des caractéristiques similaires (reliant des types d'objet du même type, avec les mêmes rôles, et des propriétés similaires).
- Un **attribut** représente une propriété du monde réel; il peut être porté indifféremment par des types d'objet ou des types d'association et peut être :
 - **simple** (avec des valeurs atomiques) ou **complexe** (c.-à-d. composé d'autres attributs simples ou complexes);
 - **monovalué** (avec une seule valeur) ou **multivalué** (avec un ensemble de valeurs);
 - **obligatoire** (avec une valeur dans chaque objet) ou **facultatif** (avec une valeur dans certains objets et pas de valeur dans d'autres).

Les caractéristiques mono-/multivaluée et facultative/obligatoire d'un attribut sont des contraintes d'intégrité exprimées avec le concept de **cardinalité minimale/maximale**. Les cardinalités sont aussi applicables aux rôles des types d'association. Elles spécifient alors le nombre minimal et maximal d'occurrences du type d'association qui peuvent, à un instant donné, lier une occurrence du type d'objet.

La valeur d'un attribut peut être calculée, c'est-à-dire inférée automatiquement par le système, à partir des valeurs d'autre(s) attribut(s) appartenant au même objet ou à la même association, ou à d'autres objets ou associations qui lui sont liés. Ces attributs sont appelés **attributs dérivés**.

– Une **méthode** est une opération qu'on peut effectuer sur les occurrences d'un type d'objet. Sa déclaration est composée d'une **interface**, où sont spécifiés le nom de la méthode, les paramètres d'appel avec leur type, et éventuellement le type du résultat, et d'une (ou plusieurs) **implémentations**, c'est-à-dire le code de la méthode.

– La **généralisation** est un lien binaire, orienté, de sémantique particulière, reliant un type d'objet appelé sous-type et un autre appelé sur-type. Ce lien exprime le fait qu'un sous-ensemble des entités réelles décrites par le sur-type, caractérisé par des propriétés particulières, d'intérêt pour l'application, est décrit par le sous-type: chaque objet du sous-type est lié par une instance du lien de généralisation à un objet du sur-type qui décrit la même entité réelle. MADS suit le principe de substituabilité: lors des manipulations, tout rôle assumé par un objet du sur-type peut aussi être assumé par un objet du sous-type. En conséquence le sous-type hérite des propriétés (attributs, méthodes et liens) du sur-type.

Dans certains cas, les propriétés héritées ont dans le sous-type un domaine plus restreint que celui associé au sur-type. Par exemple dans la figure 2, l'âge d'un Employé, attribut hérité de Personne, varie de 16 à 65 ans, tandis que celui de Personne varie de 0 à 130 ans. Le mécanisme de **raffinement** permet de déclarer dans le sous-type un sous domaine pour un attribut hérité.

Dans d'autres cas, les entités décrites dans le sous-type ont pour une propriété héritée une nouvelle réalisation spécifique du sous-type. Par exemple, l'âge en Corée est calculé de façon particulière: à la naissance, le bébé a un an, et les anniversaires ont tous lieu au nouvel an. Le mécanisme de **redéfinition** permet d'avoir pour la propriété âge (méthode ou attribut) des réalisations (codes ou valeurs) différentes dans le sur-type Personne et dans le sous-type Coréen.

Le raffinement/redéfinition pour les caractéristiques spatiales et temporelles est discuté plus en détail dans les paragraphes 3 et 4.

Des contraintes d'intégrité peuvent être exprimées sur un ensemble de sous-types d'un même sur-type:

- l'ensemble est dit **exclusif** si un objet ne peut pas appartenir à plus d'un sous-type;

- l'ensemble est dit **couvrant** si chaque objet du sur-type doit appartenir à au moins un sous-type.

Enfin un type d'objet peut être la spécialisation de plusieurs types d'objet génériques (**spécialisation multiple**).

– L'**agrégation** est une association binaire, orientée et de sémantique particulière. Elle permet d'exprimer le fait que les objets d'un type, dits objets **composés**, correspondent à l'agrégation d'objets d'un autre type, dits objets **composants**. Des contraintes peuvent lui être associées :

- un des deux types d'objet participant à une agrégation (composé ou compo-

sant) est dit **dépendant** de l'autre si, lorsqu'un objet de ce dernier cesse d'exister, tous les objets du premier qui lui sont liés sont détruits; sinon il est dit **indépendant**.

- un ensemble d'agrégations ayant le même type d'objet composant est dit **partagé/exclusif** si chaque objet du type composant peut/ne peut pas participer à plusieurs liens d'agrégation de l'ensemble.

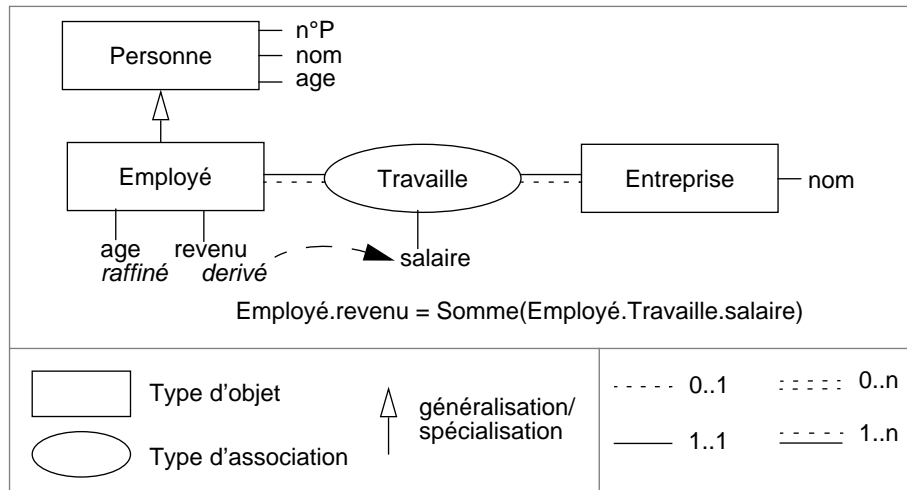


Figure 2. Exemple de schéma MADS pour données classiques

La figure 2 montre un exemple simple de modélisation de données classiques, en utilisant les concepts et notations de MADS.

3. Modélisation des caractéristiques spatiales

Les SIG offrent deux manières de décrire les relations entre les objets et l'espace: le point de vue **discret**, où la base de données contient des objets qui peuvent être localisés dans l'espace, et le point de vue **continu**, où la base de données contient des régions de l'espace sur lesquelles des variables sont définies comme des champs continus de valeurs. Le modèle MADS [PAR 98] adopte le point de vue discret, car il est plus fréquent chez nos utilisateurs (gestionnaires du territoire, des eaux, des routes...). Néanmoins, MADS fournit également des concepts pour pouvoir exprimer une vue continue. Pour des raisons pragmatiques, le modèle est actuellement limité à la représentation de données à une ou deux dimensions.

3.1. Description de la spatialité

Le concept de spatialité recouvre généralement les notions d'emprise et de localisation. L'emprise décrit la forme associée à la représentation: de type point, ligne, surface,... La localisation permet de situer cette forme dans l'espace. La spatialité en MADS peut être définie plus ou moins précisément. Par exemple, le type d'emprise peut être décrit dans le schéma par un type générique, regroupant plusieurs choix possibles (cf. ci-dessous), un choix précis étant ensuite fait au niveau de chaque instance ou groupe d'instances. De même, au lieu d'utiliser des coordonnées absolues, une localisation peut être spécifiée de façon relative par rapport à d'autres localisations connues (par exemple, Lausanne est à 60 km de Genève sur la nationale N1).












type spatial	picto.	dimension	définition
géo		0, 1 ou 2	tout type spatial défini ci-dessous dans ce tableau
géosimple		0, 1 ou 2	tout type spatial simple (un point, une ligne, une ligne orientée ou une surface simple)
point		0	un point
ligne		1	toute ligne qu'elle soit droite, courbe, brisée, fermée ou non, orientée ou non
ligne orientée		1	toute ligne orientée qu'elle soit droite, courbe, brisée, fermée ou non
surface simple		2	toute surface connexe (avec éventuellement des trous)
géocomposé		0, 1 ou 2	toute composition de types spatiaux simples
semis		0	une collection de points
graphe		1	une collection de lignes
digraphe		1	une collection de lignes orientées
surface complexe		2	une collection de surfaces simples

Table 1. Types abstraits spatiaux

La connaissance de l'espace peut être décrite avec plus ou moins de complétude. Par exemple, un plan schématique des transports urbains requiert uniquement la définition des relations topologiques entre les arrêts et les lignes (tel arrêt est sur telle ligne). Les relations métriques (tel arrêt est à 500 mètres de tel autre) et les relations d'orientation (tel arrêt est à 40° degrés de tel autre) sont généralement secondaires et peuvent ne pas être respectées. A l'opposé, un plan cadastral sera exact vis-à-vis de ces trois types de relations, topologiques, métriques et d'orientation. Les coordonnées des objets (bâtiments, rues...) seront, elles aussi, exactes, au degré de précision du plan près.

MADS fournit un ensemble de types abstraits spatiaux [SCH 96], organisés en une hiérarchie de généralisation (cf. table 1 et figure 3). A chaque type spatial est associé un ensemble de méthodes permettant de définir et manipuler les instances de ce type. La hiérarchie peut être étendue, selon les besoins de l'application, en créant des sous-types particuliers ou en regroupant plusieurs types dans un même sur-type, comme par exemple le regroupement de point et de surface pour décrire la spatialité des villes, petites et grandes.

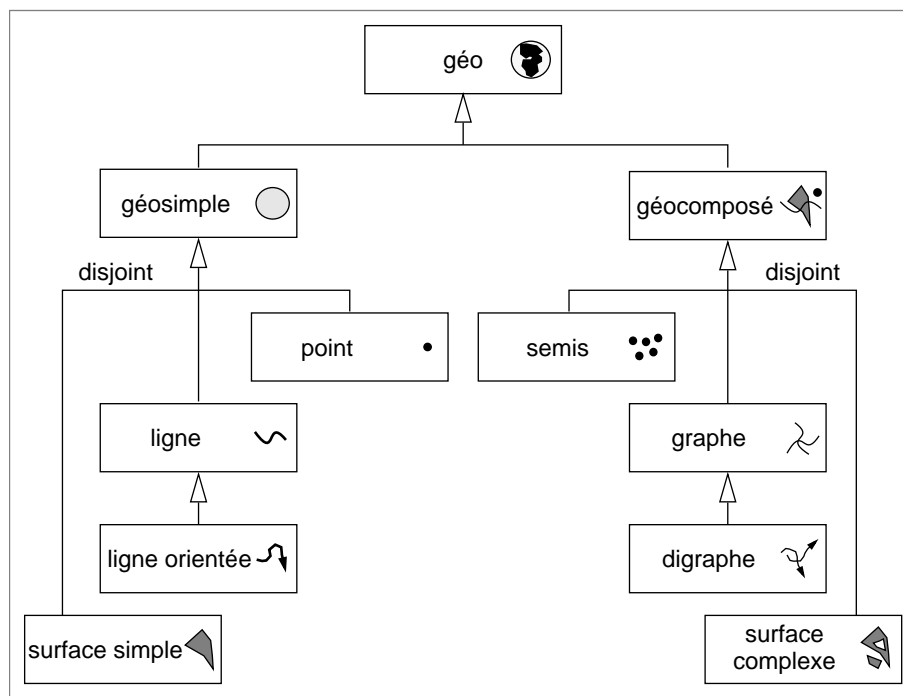


Figure 3. *Hiérarchie de types abstraits spatiaux*

Le type **géo**, le plus générique, signifie uniquement “ce type est spatial” sans préciser aucunement son emprise. La définition du type précis de chaque occurrence se

fera lors de sa création. Le type géosimple représente n'importe quel type spatial simple. Le type spatial géocomposé permet de décrire toute composition de types spatiaux simples: par exemple, un réseau fluvial défini par un ensemble de rivières (lignes orientées) et de lacs (surfaces). Les sous-types homogènes de géocomposé ont été définis: le semis (ensemble de points), exemple: les maisons d'un hameau, le graphe (ensemble de lignes), exemple: une portion de réseau routier, le digraphe (ensemble de lignes orientées), exemple: une rivière avec ses affluents et la surface complexe (ensemble de surfaces simples), exemple: un pays avec ses îles.

3.2. Types d'objet et attributs spatiaux

MADS permet au concepteur d'attacher une spatialité aux types d'objets comme aux attributs.

Un type d'objet sera caractérisé par une spatialité lorsqu'il représente une classe d'entités dont la référence spatiale est pertinente pour l'application. La spatialité d'un type d'objet est décrite en MADS par un attribut prédéfini, géométrie, dont le domaine de valeurs est un type abstrait spatial, soit prédéfini (cf. table 1), soit défini explicitement pour l'application.

Un attribut spatial est un attribut simple, monovalué ou multivalué, dérivé ou non, dont le domaine de valeurs est un type abstrait spatial.

Diverses contraintes spatiales peuvent être attachées aux types d'objet et aux attributs spatiaux. Par exemple, on peut restreindre la spatialité des occurrences d'un type d'objet Commune de façon à ce qu'elles ne se chevauchent pas, à ce qu'elles soient connexes, etc. D'autres types de contraintes permettent de restreindre la spatialité d'un attribut par rapport à la spatialité de l'objet auquel il appartient.

3.3. Types d'association spatiales

Les besoins de représentation spatiale ne se limitent pas à l'association d'une spatialité aux objets ou attributs. La description des relations spatiales entre objets spatiaux y joue un rôle prépondérant. Ces relations peuvent être de différents types: topologiques, d'orientation, métriques, et d'agrégation.

Les relations spatiales, pour autant que la spatialité des objets soit définie directement par leurs coordonnées, peuvent être déduites de la spatialité des objets. Ainsi, ces relations existent implicitement et sont accessibles aux utilisateurs via les fonctions du SIG. Néanmoins, comme il a été dit dans le paragraphe 1.1, il est important de pouvoir décrire les relations spatiales explicitement dans le schéma conceptuel. Cela enrichit le schéma, permet de nommer ces relations, de leur attacher des attributs et des méthodes, et de leur donner éventuellement une sémantique complémentaire de celle que l'on peut obtenir via les fonctions du SIG.

Dans MADS, un type d'association spatiale est un type d'association liant au moins deux objets spatiaux, et éventuellement d'autres objets non-spatiaux, et dont la sémantique est une contrainte d'intégrité spatiale explicitement définie. Par exemple, on peut

définir une association spatiale CarrefourRoutier, reliant des objets du type Route, et ayant pour sémantique la relation topologique de croisement (cf. paragraphe 3.3.1). Cette définition implique que le système n'autorisera l'insertion d'occurrences de CarrefourRoutier que si les lignes représentant les deux routes liées se croisent effectivement.

MADS offre deux types prédéfinis d'associations spatiales, les associations topologiques et les associations d'agrégation. Ces associations sont les plus fréquentes dans les applications. Elles sont décrites dans les paragraphes suivants. D'autres types de relation spatiale peuvent être déclarés explicitement par l'utilisateur à l'aide des méthodes associées aux types abstraits spatiaux. Par exemple, une association spatiale de proximité, ProcheDe, peut être définie entre les types d'objet spatiaux Ville et Lac, avec la contrainte d'intégrité spatiale $\text{distance}(\text{Ville}, \text{Lac}) < 5 \text{ km}$.

3.3.1. Types d'association topologiques

Ce type d'association décrit une relation topologique. Il existe un grand nombre de relations topologiques différentes. Celles-ci ont été abondamment étudiées en tant qu'opérateurs spatiaux pour la manipulation d'objets spatiaux. Des classifications en ont été proposées [EGE 91, EGE 92a, CHA 92].







type spatial	picto.	définition
disjonction		aucun partage (valable pour tout type d'objet spatial)
adjacence		partage sans intérieur commun
croisement		partage d'une partie de l'intérieur tel que la dimension de l'objet partagé est strictement inférieure à la plus grande dimension des deux objets en relation.
recouvrement		partage d'une partie de l'intérieur tel que la dimension de l'objet partagé est égale à la plus grande dimension des deux objets en relation (valable pour des types spatiaux de même dimension)
inclusion		la totalité de l'intérieur de l'un correspond à une partie de l'intérieur de l'autre
égalité		partage de la totalité de l'intérieur et de la totalité de l'enveloppe (valable pour des types spatiaux de même dimension)

Table 2. Types de relation topologique

Cependant, ces classifications conduisent à définir un très grand nombre d'opérateurs spatiaux différents, ce qui est inutilisable dans un modèle conceptuel servant d'outil de communication entre humains, non nécessairement spécialistes en topologie. Nous avons plutôt retenu la classification proposée par [CLE 93], qui regroupe

toutes ces relations topologiques élémentaires en quelques classes. Nous y avons ajouté l'égalité, qui est utile quand un objet spatial assume plusieurs rôles différents ou quand deux objets spatiaux occupent le même espace. Les relations topologiques ont été définies en fonction des notions d'intérieur et d'enveloppe que nous avons étendues au cas des surfaces complexes [NGU 97]. La liste des types de relation topologique prédéfinis dans MADS est donnée dans la table 2.

Tout type d'association topologique est donc caractérisé, entre autres, par son type spatial, représenté visuellement par un pictogramme. Ces pictogrammes mettent en jeu des objets surfaciques, mais ces symboles sont valables pour tout type spatial.

L'exemple de la figure 4 montre un schéma contenant trois types d'objet spatiaux, Commune (surface complexe), Ville (point) et Lac (surface simple), et deux types d'association topologique, SituéeDans (inclusion) et AuBordDe (adjacence).

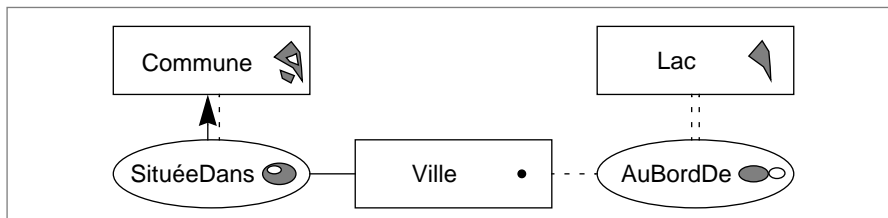


Figure 4. Exemple de types d'association topologique

3.3.2. Agrégation spatiale

Le lien d'agrégation est très présent dans les applications à données spatio-temporelles. Par exemple, dans la figure 5 on représente un canton comme une agrégation de 10 à 1000 communes, où une commune est composante d'un et un seul canton. Un attribut `dateRattachement` enregistre la date à laquelle la commune a été rattachée au canton.

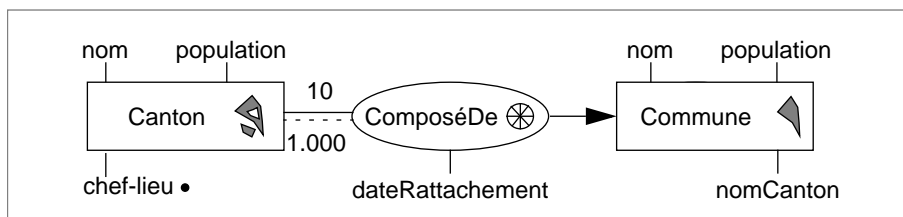


Figure 5. Exemple d'agrégation spatiale

L'agrégation est un lien binaire: un objet composé de plusieurs objets de types différents est représenté par plusieurs liens d'agrégation, un pour chaque composant. Ceci permet d'exprimer notamment les cardinalités des rôles et les attributs du lien en fonction de chaque composant.

Pratiquement, rien ne distingue une agrégation spatiale d'une agrégation non spatiale, si ce n'est que les objets liés sont spatiaux et qu'il est très fréquent –mais pas obligatoire– que la géométrie de l'objet composé soit dérivée ou liée à celle de ses objets composants. De même, la valeur de certains attributs, spatiaux ou non, de l'objet composé (parfois de l'objet composant) peut être liée à celle des objets composants (composé). Ces interdépendances sont exprimées soit par des attributs dérivés, soit par des contraintes d'intégrité. Quelques exemples de contraintes d'intégrité spatiales liées à l'agrégation sont :

- les surfaces des communes d'un canton doivent être connexes;
- la surface d'une maison doit être incluse dans celle de son lotissement;
- toute maison appartenant à un lotissement doit avoir une autre maison à moins de 25 mètres faisant partie du même lotissement.

Autrement, les interdépendances entre les géométries et les attributs peuvent être exprimées par des attributs dérivés. Par exemple, dans la figure 5 on peut définir les formules suivantes:

Canton.géométrie = **UnionSpatiale** (ComposéDe.Commune.géométrie)

Canton.population = **Somme** (ComposéDe.Commune.population)

Commune.nomCanton = ComposéDe.Canton.nom

Les formules de dérivation peuvent avoir plusieurs arguments provenant soit du même objet composant (respectivement composé) soit de plusieurs objets composants (respectivement composés) de types différents. Par exemple, dans un réseau hydrographique composé de rivières et de lacs, le volume global des eaux est calculé à partir de ceux des rivières et de ceux des lacs. Chaque fois qu'un rôle multivalué ou attribut multivalué est traversé, une fonction d'agrégation (qui réduit la collection à une valeur) peut être employée.

3.4. Attributs variables

Comme dit précédemment, un champ continu peut être perçu de deux manières différentes:

– soit comme décrivant les valeurs d'une variable sur des régions de l'espace. C'est l'approche choisie par [TRY 97] et par tous les SIG qui offrent une discrétisation de l'espace raster.

– soit comme décrivant les valeurs d'un attribut sur la géométrie d'un objet. Cette solution est plus souple que la précédente puisqu'elle permet la description de champs continus se superposant, tout en conservant une puissance d'expression équivalente. C'est l'approche retenue dans le modèle MADS, à la fois pour les objets et pour les attributs spatiaux de dimension non nulle.

En MADS, un attribut est dit **variable** si sa valeur est définie par une fonction dont le domaine est l'ensemble d'éléments géométriques (point, ligne ou surface) dans lesquels la géométrie de l'objet (ou attribut) considéré a été décomposée. Par exemple, le relief d'une commune peut être représenté comme un ensemble de valeurs d'altitude mesurées sur un semis de points distribués (régulièrement ou non) dans la surface de

la commune. De façon similaire, le type de culture d'une région agricole peut être représenté par la valeur de la culture dominante sur des surfaces d'échantillonnage de 100 mètres carrés. Les attributs variables sont indiqués au moyen du pictogramme ■.

Le choix de l'implémentation de l'attribut variable (grille, isolignes, tessélation de triangles ou de polygones, gradients, ... [LAU 93]) ne relève pas du schéma conceptuel et sera fait ultérieurement lors de la définition du schéma logique en fonction des organisations offertes par le SIG.

Du point de vue de la modélisation conceptuelle, il est techniquement possible de faire l'économie du concept d'attribut variable en ayant recours uniquement aux concepts d'entité, d'association ou d'attribut complexe. Par exemple dans la figure 6(a), le champ continu altitude est exprimé directement à l'aide d'un attribut variable. Par contre, dans la figure 6(b) il est exprimé par un attribut multivalué complexe de composants la valeur à décrire et l'attribut spatial lieu représentant l'endroit où est mesurée la valeur. Cependant cette dernière solution est à rejeter pour plusieurs raisons. Le concept de champ continu n'étant pas représenté explicitement, le système l'ignore et donc l'interpolation des valeurs d'altitude lors des requêtes sera à la charge des utilisateurs. Il faut aussi rajouter au schéma 6(b) une contrainte d'intégrité spatiale spécifiant que la localisation de l'attribut lieu doit se trouver incluse dans la géométrie de la Commune. Enfin, le schéma obtenu est plus complexe.



Figure 6. *Altitude modélisée avec et sans attribut variable*

L'affectation des valeurs d'un attribut variable s'effectue en insérant des couples (géométrie, valeur), où géométrie est incluse dans la géométrie considérée. Les valeurs de l'attribut variable peuvent être consultées soit globalement (une liste des couples est alors rendue), soit localement (consultation de la valeur de l'attribut en un endroit donné). Dans ce dernier cas, si la valeur n'est pas connue en cet endroit elle est obtenue par interpolation.

3.5. Hiérarchie de généralisation

Le lien de généralisation peut relier des types d'objet spatiaux et non-spatiaux. Quatre cas peuvent se présenter qui correspondent à quatre besoins différents.

La figure 7(a) illustre le cas où le sur-type n'est pas spatial, mais le sous-type l'est. Le type d'objet StationMesure, non spatial, regroupe des stations portables et d'autres fixes. Seule la localisation des stations fixes est utile pour l'application et est donc mémorisée dans un sous-type spatial, SMFixe.

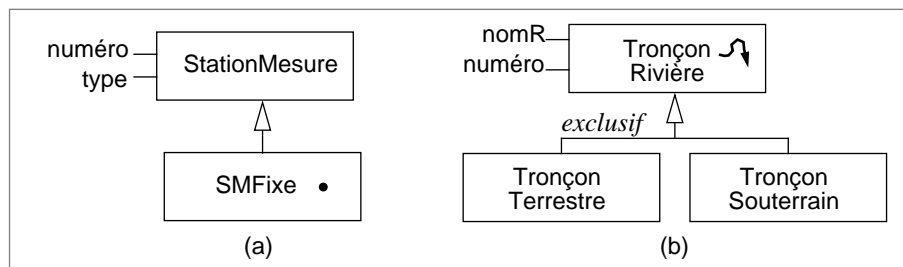


Figure 7. Généralisations

Par définition, les sous-types d'un type spatial sont spatiaux, puisque les objets appartenant au sous-type appartiennent aussi au sur-type et héritent ainsi de sa spatialité. La figure 7(b) montre un exemple de ce type de situation. Chaque objet de Tronçon-Terrestre et de TronçonSouterrain a une spatialité héritée qui est la ligne orientée définie dans TronçonRivière.

Cependant, ces mécanismes classiques d'héritage ne sont pas toujours suffisants et les mécanismes de raffinement et de redéfinition s'avèrent utiles. La figure 8(a) représente une hiérarchie de généralisation pour une application de gestion des eaux dont certains traitements voient un ensemble unique hétérogène, appelé Eau, de spatialité générique géo, regroupant les rivières et les lacs, et d'autres traitements voient deux ensembles distincts, les lacs d'une part et les rivières d'autre part. Dans ce schéma, la spatialité de Rivière et celle de Lac sont héritées avec raffinement de celle de Eau: tout objet a une seule spatialité, une ligne orientée si c'est une rivière, une surface simple si c'est un lac. Les traitements sur Eau peuvent utiliser les méthodes génériques de géo, et ceux portant sur Rivière (respectivement sur Lac) les méthodes spécifiques des lignes orientées (respectivement des surfaces simples).

Un autre besoin fréquent des applications, est la représentation multiple des objets, par exemple selon les métiers, ou selon les échelles. Le lien de généralisation peut être employé pour la représentation multi-échelle. En effet, au fur et à mesure que la représentation est moins précise, des entités spatiales de petite taille ou de moindre importance disparaissent. Lors du passage à une échelle moins détaillée, on obtient un sous-ensemble d'objets avec une représentation graphique différente, simplifiée, ce qui peut être représenté par un lien de généralisation avec redéfinition de la géométrie. Par exemple figure 8(b), les routes sont représentées à deux échelles différentes. Les objets de Route1/10000 ont une géométrie, la ligne représentant la route au 1/10000. Les objets qui sont aussi représentés au 1/50000 en ont deux: la ligne héritée du sur-type et une ligne simplifiée, avec moins de virages, au 1/50000. La redéfinition est indiquée graphiquement par une flèche grisée.

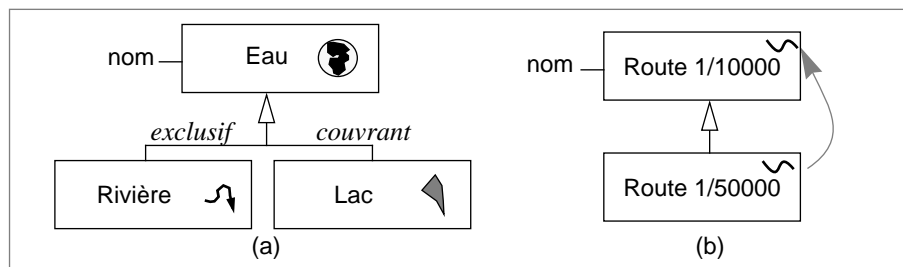


Figure 8. *Raffinement et redéfinition du type spatial*

Un autre cas est celui de la spécialisation multiple qui permet dans un autre type de situation d'avoir aussi plusieurs géométries différentes. Dans la figure 9 le type d'objet Château est à la fois sous-type de Curiosité (de spatialité point) et de Bâtiment (de spatialité surface). Dans ce cas on peut consulter la spatialité d'une occurrence de Château en spécifiant le point de vue considéré (Curiosité ou Bâtiment) et ainsi obtenir l'une ou l'autre de ses spatialités héritées (un point ou une surface).

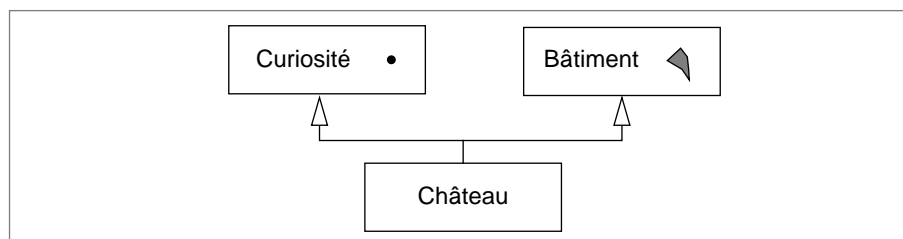


Figure 9. *Spécialisation multiple*

4. Modélisation des caractéristiques temporelles

La connaissance de l'évolution temporelle des données, en particulier spatiales, est souvent indispensable pour comprendre la dynamique des phénomènes du monde réel.

MADS offre les concepts permettant d'associer le temps à l'information suivant deux axes complémentaires:

- l'estampillage, pour localiser dans le temps la pertinence d'une information. L'estampillage a été le plus souvent appliqué aux valeurs d'attributs. Appliqué aux objets et associations, il définit leur cycle de vie: création, désactivation, réactivation et destruction.
- la modélisation des liens dynamiques entre objets, liens dont la sémantique a une composante temporelle inhérente (par exemple, tel objet a généré tel autre objet, tel objet a vécu avant tel autre). Ce type d'information est important, en particulier

pour des applications liées à la gestion, l'analyse et la compréhension des phénomènes naturels et humains.

4.1. Concepts temporels de base

La partie temporelle de MADS s'appuie sur les concepts définis dans le glossaire consensuel des bases de données temporelles [JEN 94], dans les langages TSQL2 [SNO 95] - extension de SQL-92 - et SQL/Temporal [SNO 96] - proposition d'extension temporelle de SQL3 soumise aux comités de standardisation ISO et ANSI.

La temporalité peut être exprimée selon trois points de vue indépendants et complémentaires :

- **le temps de transaction**, basé sur l'horloge du système, qui mémorise la période pendant laquelle une information est/a été active dans le système de gestion de bases de données (SGBD) ou dans le SIG. Cette période va de l'enregistrement de l'information à sa suppression. Ainsi, le temps de transaction ne concerne que le passé et le présent.

- **le temps de validité** (le plus utilisé), qui mémorise la période pendant laquelle une information est valide dans le monde applicatif. Ces périodes sont explicitement définies par l'utilisateur et peuvent couvrir le passé, le présent et le futur.

- **le temps défini par l'utilisateur**, le seul utilisable dans les SGBD et SIG non temporels, qui consiste en attributs dont le domaine se réfère au temps (par exemple, DATE) et dont la valeur est gérée directement par l'utilisateur.

Le temps peut être représenté de manière linéaire ou non linéaire (arbre ou graphe dirigé). Il peut être discret, dense ou continu, selon que l'axe est vu comme une séquence de points dans le temps, isomorphe aux nombres entiers, rationnels, ou réels.

Un instant, ou chronon, est un point dans l'axe du temps. Il représente le temps d'avènement d'un événement. Un intervalle est une période de temps définie par un chronon de début et un chronon de fin. Un élément temporel est l'union d'un ensemble d'intervalles disjoints. Les éléments temporels peuvent être contraints à ne contenir que des instants ou que des intervalles non-instantanés. Pour le temps de validité, un chronon particulier, appelé «*now*», permet, lorsqu'il est utilisé en fin d'intervalle, d'exprimer le sens «valide jusqu'à nouvel ordre» [CLI 97]. Ainsi, «*now*» représente symboliquement l'instant présent qui se renouvelle à chaque instant.

L'estampillage peut être défini de manière absolue ou de manière relative, c'est-à-dire par référence à la temporalité d'un autre objet. La logique d'intervalles d'Allen [ALL 83] définit un ensemble complet d'opérateurs booléens de base pour le positionnement relatif dans le temps: *précède*, *succède*, *égale*, *rencontre*, *chevauche*, *pendant*, *commence*, et *finit*. Les éléments temporels étant des ensembles d'intervalles, ils sont comparés à l'aide d'une extension du calcul d'Allen [KAN 83, LIG 91].

Le système de référence temporelle le plus utilisé est le calendrier grégorien (seul disponible en SQL-92). Il a un ensemble fixe de granularités : année, mois, jour, heure, minute, et seconde. D'autres calendriers sont utilisables : calendrier lunaire, calendrier fiscal, calendrier académique, etc.

4.2. L'approche temporelle de MADS

L'approche MADS pour la modélisation temporelle [ZIM 97] adhère aux principes importants suivants, qui trouvent leur motivation dans l'objectif d'orthogonalité :

- l'information modélisée est aussi bien temporelle que non temporelle,
- la temporalité peut être associée à tout concept du modèle (objets, associations, et attributs à tous niveaux). Elle peut donc exprimer aussi bien un cycle de vie que la validité des valeurs d'attribut.

- l'ajout, au contexte temporel conventionnel, de la modélisation des liens dynamiques entre objets. Ces liens permettent de décrire des filiations entre objets, des règles de précedence temporelle et des situations d'agrégation particulières que l'on rencontre notamment lors de l'intégration de bases de données spatiales hétérogènes. Ce type d'information est rarement géré par les modèles existants.

D'autres principes sont adoptés par MADS sur la base de considérations pragmatiques :

- une représentation linéaire et discrète du temps, du passé au futur,
- un estampillage par le temps de validité (l'approche étant aisément extensible au temps de transaction),
- une gestion de structures temporelles ponctuelles et de type intervalle, et plus généralement des éléments temporels,
- le choix du calendrier est laissé à l'utilisateur (des fonctions permettent de convertir d'une granularité à l'autre comme d'un calendrier à l'autre),
- la prise en compte de règles de cohérence sémantique, par une logique temporelle de premier ordre basée sur des intervalles [CHO 98].

4.3. Attributs temporels

Un attribut est dit temporel s'il est estampillé. Il enregistre alors l'évolution de ses valeurs: les différentes valeurs sont conservées, chacune associée à un élément temporel qui décrit sa période de validité. Par exemple dans la figure 10, le type d'objet Tronçon, qui décrit les tronçons des rivières, possède plusieurs attributs temporels. L'attribut temporel état, de domaine de valeurs: "à ciel ouvert", "couvert sous pont", et "canalisé", permet de garder trace de toutes les valeurs d'état qui ont été, sont, ou seront valides (au cas où des travaux changeant l'état du tronçon soient planifiés) pour ce tronçon ainsi que le temps de validité associé. La valeur d'un attribut est supposée indéfinie (inconnue ou inapplicable) pendant les intervalles de temps qui ne sont pas inclus dans sa période de validité.

Tout attribut peut être temporel, quelles que soient ses caractéristiques structurelles (simple ou complexe, monovalué ou multivalué) et spatiales (spatial ou non, variable ou non). Par exemple, la géométrie des tronçons, déclarée temporelle, conserve toutes les lignes orientées décrivant l'historique du tracé de la rivière sur ce tronçon. De même, l'attribut qualité, variable et temporel, mémorise l'historique du champ

continu décrivant la qualité de l'eau tout au long du tronçon: l'utilisateur peut demander en chaque point du cours, la valeur de la qualité de l'eau pour chaque instant.

Lors de la définition d'un attribut comme temporel, sa granularité doit être spécifiée. Les attributs non-temporels peuvent être constants (par exemple nomR et numéro) ou peuvent varier avec le temps (par exemple longueur) sans que l'application soit intéressée à garder trace de l'évolution des valeurs.

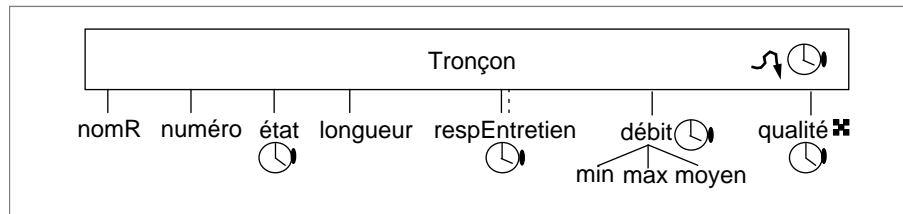


Figure 10. *Attributs temporels*

Pour les attributs multivalués temporels (comme respEntretien), une période de validité est associée à chaque ensemble de valeurs de l'attribut. Quant aux attributs complexes, une temporalité peut y être attachée à tout niveau. Par exemple, dans la figure 10, débit est un attribut temporel complexe, composé de min, max et moyen. Une valeur de débit est un ensemble de triplets (min, max, moyen), chacun associé à une période de validité. On mémorise ainsi les valeurs minimale, maximale et moyenne pour, par exemple, chaque mois. En revanche, si seulement moyen était temporel, une valeur pour débit contiendrait une valeur pour min et max, et un ensemble de valeurs pour moyen, chacune associée à une période de validité; ceci permettrait de mémoriser, par exemple, les valeurs minimale et maximale jamais atteintes, et la valeur moyenne pour chaque mois.

Un attribut temporel complexe peut avoir des composants temporels. Par exemple, si dans la figure 10 les attributs débit et moyen étaient tous les deux temporels, ceci permettrait de garder pour le débit de chaque année les valeurs minimale et maximale ainsi qu'un ensemble de valeurs pour le débit moyen par mois.

Des contraintes temporelles construites à partir des opérateurs d'Allen peuvent être définies sur les attributs complexes et leurs composants. Les contraintes suivantes sont très courantes dans les applications:

- l'inclusion d'un attribut composant dans son attribut complexe spécifie que la période de validité de toute valeur de l'attribut composant doit être incluse dans celle de l'attribut complexe. Par exemple, une inclusion de moyen dans débit spécifie que la période de validité de chaque valeur de moyen doit être incluse dans la période de validité du débit associé.

- la couverture d'un attribut complexe par un de ses composants spécifie que pour toute valeur de l'attribut complexe, sa période de validité doit être incluse dans l'union des périodes de validité associées aux valeurs correspondantes de l'attribut composant. Par exemple, une couverture de débit par moyen garantit qu'à tout instant

inclus dans la période de validité de débit il y a une valeur associée de l'attribut moyen.

– l'égalité est équivalente à des contraintes d'inclusion et de couverture sur les mêmes attributs: elle spécifie que l'union des périodes de validité associées aux valeurs d'un attribut doit être égale à l'union des périodes de validité associées aux valeurs de l'autre attribut.

Il n'y a pas en MADS de contrainte par défaut entre les éléments temporels des attributs complexes et composants. Des contraintes temporelles similaires peuvent être définies entre un objet (ou association) temporel et ses attributs, comme entre un objet composé et ses objets composants.

Les cardinalités des attributs sont interprétées comme statiques, c'est-à-dire qu'elles définissent le nombre possible de valeurs d'attribut à tout instant. Une cardinalité temporelle, notée $h(\max)$, permet de contraindre le nombre maximal de changements de valeurs d'un attribut pendant le cycle de vie de l'objet. Par exemple, la cardinalité statique (1,1) de l'attribut état indique qu'à chaque instant un tronçon a un seul état. Une cardinalité dynamique $h(3)$ sur le même attribut indiquerait que pendant le cycle de vie du tronçon au plus 3 changements d'état sont permis.

4.4. Types d'objet temporels

Associée aux types d'objet, la temporalité concerne l'existence des objets dans leur type, plutôt que leur valeur. Les objets sont créés comme des instances d'un type d'objet, peuvent migrer dans d'autres types, peuvent être temporairement suspendus dans un type, être réactivés et finalement être détruits.

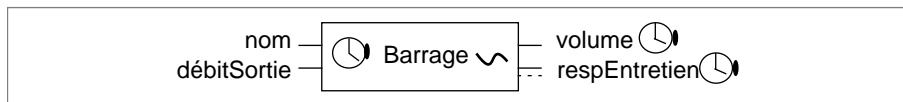


Figure 11. Types d'objet temporels

Un type d'objet temporel garde trace du cycle de vie de ses instances, défini par les événements de création, de suspension, de réactivation, et de destruction. Pour chaque instance, cette information reste disponible après sa destruction, ainsi que les dernières valeurs de chaque attribut, de manière à pouvoir associer l'information sur le cycle de vie à l'entité correspondante du monde réel. Un exemple est donné dans la figure 11.

Plus précisément, le cycle de vie d'un objet temporel comprend trois états (actif, suspendu et détruit) chacun associé à un élément temporel. Ainsi, la période active d'un objet est l'élément temporel associé au statut actif dans le cycle de vie.

Comme le montre la figure 11, un type d'objet temporel peut avoir des attributs non-temporels et temporels. Ainsi, au cycle de vie de chaque objet s'ajoutent la mé-

morisation de la dernière valeur pour les attributs non-temporels et de l'évolution des valeurs pour les attributs temporels.

Des contraintes de type inclusion, couverture, égalité ou autre, peuvent être définies entre les éléments temporels associés à l'objet et ceux de ses attributs temporels. Ceci permet, par exemple, de contraindre le temps de validité des valeurs de volume par rapport au cycle de vie du barrage associé.

4.5. Types d'objet temporels et généralisation

Les liens de généralisation s'appliquent aux objets temporels comme aux objets non temporels. Cependant, le cas où un sous-type est temporel alors que son sur-type ne l'est pas mérite un commentaire. Par exemple, figure 12(a), la déclaration de StationMesure comme non-temporelle et de StationPluviométrique comme temporelle spécifie que l'on ne veut pas conserver la trace des stations de mesure en général, mais on veut conserver celle d'un sous-ensemble d'entre elles, les stations pluviométriques. Pour toute station qui n'est pas de type pluviométrique le système ne conservera pas son cycle de vie, mais il le conservera, associé à leur valeur, pour les stations de type pluviométrique.

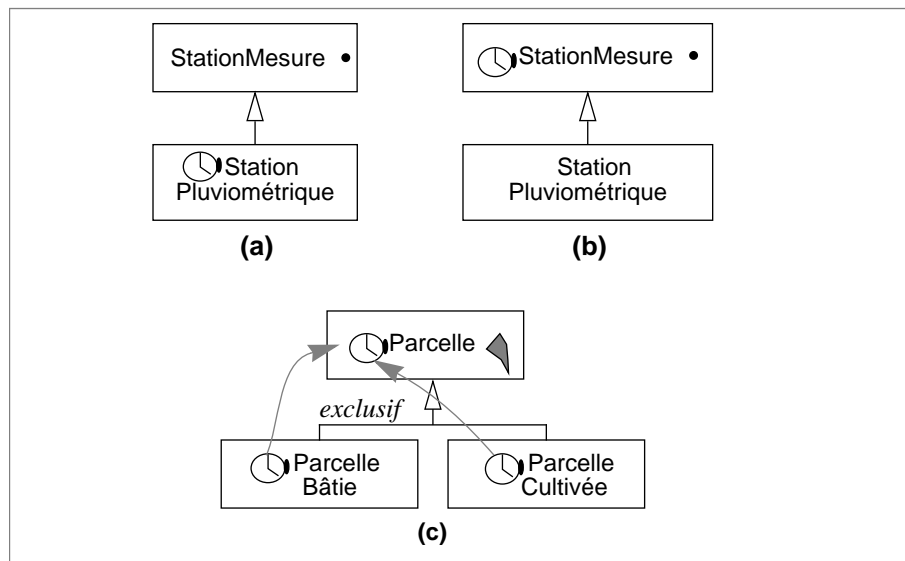


Figure 12. Types d'objet temporels et généralisation

De par la sémantique du lien de généralisation, tous les sous-types d'un sur-type temporel sont nécessairement temporels. Par exemple, figure 12(b), le type d'objet StationPluviométrique est temporel, comme StationMesure. Le mécanisme de redéfinition se révèle utile pour toutes les situations où il s'agit de modéliser le cycle de vie

d'entités qui changent de classification, comme les parcelles de la figure 12(c). Les parcelles cultivées peuvent se transformer en parcelles bâties et donc une parcelle bâtie possède deux cycles de vie, l'un hérité de Parcelle qui décrit la vie totale de la parcelle, qu'elle soit cultivée ou bâtie, et l'autre, propre à ParcelleBâtie qui décrit la portion du cycle de vie de la parcelle quand elle est (était ou sera) bâtie. La sémantique de la généralisation impliquant qu'un objet ne peut appartenir à un sous-type que s'il appartient au sur-type, il est nécessaire que le cycle de vie redéfini dans un sous-type soit toujours inclus dans celui du sur-type.

Les contraintes d'exclusivité et de couverture définies sur un ensemble de sous-types d'un type d'objet temporel impliquent que:

- pour un ensemble exclusif, les périodes actives d'un objet dans les différents sous-types doivent être disjointes;
- pour un ensemble couvrant, l'union des périodes actives d'un objet dans les sous-types doit inclure toutes les périodes actives dans son sur-type.

4.6. Associations temporelles

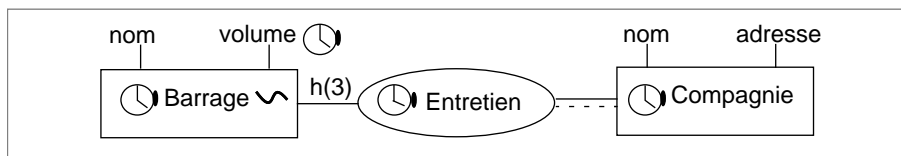


Figure 13. Association temporelle

Un type d'association temporelle permet de garder trace du cycle de vie de ses instances. Celles-ci peuvent être créées, suspendues, réactivées et détruites. Par exemple, dans la figure 13 le type d'association Entretien est temporel: dès lors, les couples (barrage, compagnie) passés, présents, et futurs sont gardés dans la base.

Un type d'association temporel peut relier des types d'objet non-temporels. Si Entretien était temporel et Barrage et Compagnie non-temporels, la sémantique serait de garder toutes les instances passées, présentes et futures d'Entretien qui concernent les barrages et les compagnies actuellement valides. Pour éviter les références manquantes, à savoir une association reliant des objets sur lesquels aucune information n'est gardée, la destruction d'un barrage ou d'une compagnie entraîne automatiquement la destruction des instances d'Entretien auxquelles il participe.

Un type d'association non-temporel peut relier des types d'objet temporels. Si Entretien était non-temporel tandis que Barrage et Compagnie étaient temporels, cela signifierait que l'on voudrait garder trace des barrages et des compagnies passés, présents et futurs, mais que dans Entretien on ne s'intéresserait ni à l'historique ni au futur des couples (barrage, compagnie).

Comme pour les attributs, les cardinalités reliant les types d'objet aux types d'association sont interprétées comme statiques, définissant le nombre minimal et maximal d'associations pouvant lier un objet à un instant donné. La cardinalité temporelle, notée $h(\max)$, définit le nombre total maximal d'associations qui peuvent lier un objet au cours de sa vie. Par défaut, la cardinalité temporelle pour un rôle est $h(n)$, à savoir non limitée.

Par exemple, dans la figure 13, la cardinalité statique (1,1) du lien de Barrage signifie qu'à tout instant il y a une compagnie responsable de l'entretien du barrage. En revanche, la cardinalité temporelle $h(3)$ indique qu'au cours du cycle de vie des barrages, il peut y avoir au plus trois compagnies responsables de son entretien.

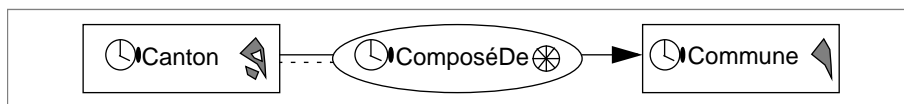


Figure 14. Agrégation temporelle

Un exemple d'agrégation spatiale temporelle est donné dans la figure 14. Les deux types d'objet ainsi que l'agrégation sont temporels pour garder trace de leur évolution: par exemple, des nouvelles communes sont créées par division d'unités plus grandes, tandis que d'autres disparaissent par fusion, ou encore l'appartenance des communes dans les cantons varie avec le temps suite à des référendums.

4.7. Modélisation temporelle dynamique

Une connaissance fine des phénomènes dynamiques (décrivant ou régissant l'évolution des objets et des liens) est cruciale pour les applications spatio-temporelles. MADS propose quatre types d'association, dites dynamiques, qui permettent de décrire des liens particuliers entre objets où le temps joue un rôle essentiel. Comme tout type d'association, les associations dynamiques peuvent être nommées, avoir des attributs, et intervenir dans des formules de dérivation et des contraintes d'intégrité.

4.7.1. Association de transition

Ce type d'association modélise le changement de classe des objets: on dit qu'un objet subit une transition lorsque l'objet migre de la population d'un type d'objet source vers la population d'un type d'objet cible. Comme l'objet qui subit la transition garde son identité (puisque'il représente la même entité du monde réel), les types d'objet source et cible doivent appartenir à la même hiérarchie de généralisation.

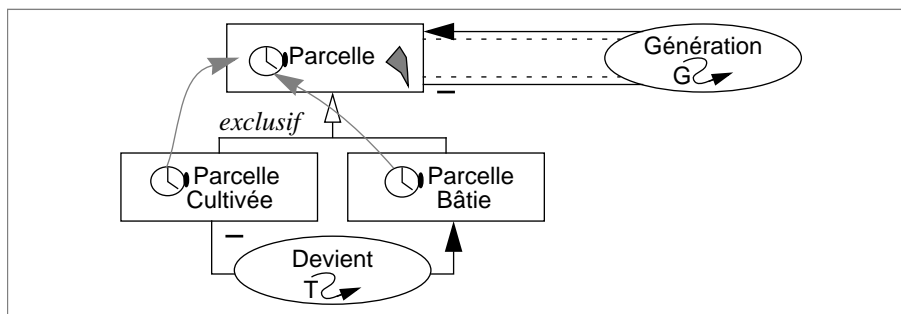


Figure 15. Associations de transition et de génération dynamique

Il y a deux types de transition, selon que l'objet qui transite est préservé ou non comme instance du type d'objet source. S'il est préservé, la transition induit une situation de représentation multiple de la même entité. Une transition est effectuée soit quand l'utilisateur la demande explicitement, soit quand elle peut être déterminée automatiquement grâce à des critères explicites d'appartenance aux types. C'est le cas, par exemple, lorsque une spécialisation est définie par des prédicats sur les valeurs d'un attribut.

La figure 15 montre une spécialisation de *Parcelle* en *ParcelleCultivée* et *ParcelleBâtie*. La transition *Devient* permet de garder trace des transformations des parcelles cultivées en parcelles bâties. Le signe - attaché au lien de l'objet source indique que ce dernier est consommé dans la transition.

4.7.2. Association de génération

Ce type d'association modélise les processus qui donnent lieu à l'émergence de nouveaux objets: une instance (ou un ensemble d'instances) d'un type d'objet source génère une instance (ou un ensemble d'instances) d'un type d'objet cible. Cette association permet de modéliser des relations de causalité et de temporalité liées à l'apparition et à la disparition d'entités dans le monde réel.

Comme pour la transition, on peut distinguer plusieurs types de génération, selon que les instances source sont préservées ou non. Pour des générations M:N, c'est-à-dire où M objets interagissent pour générer N objets, certains objets source peuvent être consommés et d'autres pas.

Exemple: dans une application cadastrale une parcelle peut être divisée donnant naissance à plusieurs parcelles plus petites, ou au contraire, plusieurs parcelles peuvent fusionner pour en créer une plus grande. Dans la figure 15, l'association de génération, *Génération*, permet de garder trace des parcelles qui ont donné naissance à d'autres parcelles.

4.7.3. Association inter-temporelle

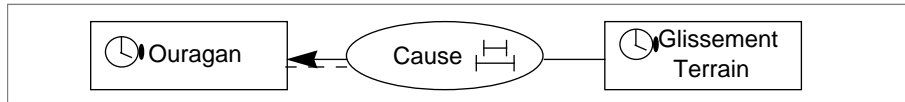


Figure 16. Association inter-temporelle de type pendant

Ce type d'association binaire est le pendant en temporel des associations topologiques en spatial. Associer deux types d'objets par un type d'association inter-temporelle revient à spécifier une contrainte d'intégrité temporelle liant les cycles de vie des deux types d'objet. Par exemple dans la figure 16, l'association *Cause* entre *Ouragan* et *Glissement Terrain*, définie à l'aide de l'opérateur temporel *pendant*, spécifie qu'une occurrence de *Glissement Terrain* ne peut être liée à une occurrence d'*Ouragan* que si la période de validité de l'occurrence de *Glissement Terrain* est incluse dans celle d'*Ouragan*.

Pour la définition de la sémantique des associations inter-temporelles, MADS offre les types prédéfinis correspondant aux opérateurs d'Allen [ALL 83]: *précède*, *succède*, *égale*, *rencontre*, *chevauche*, *pendant*, *commence*, et *finis*. MADS permet aussi au concepteur de définir une formule spécifique à l'aide de la logique temporelle de premier ordre [CHO 98]. De plus, comme les cycles de vie des objets comprennent trois états (actif, suspendu et détruit), chacun associé à un élément temporel, les opérateurs temporels sont étendus de manière à comparer les cycles de vie de deux façons différentes: comparaison de la durée totale du cycle de vie (c.-à-d. estampilles de naissance et mort) ou comparaison de ses périodes actives.

4.7.4. Agrégation d'instantanés

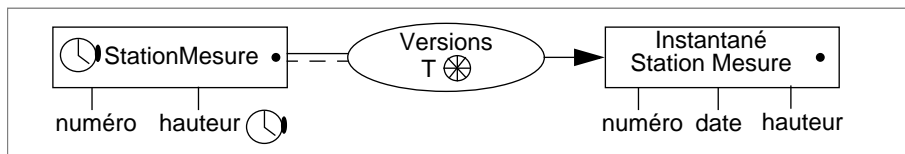


Figure 17. Agrégation d'instantanés

L'agrégation d'instantanés est un cas particulier d'agrégation, où le type d'objet composé est temporel tandis que le type d'objet composant ne l'est pas forcément, et dont la sémantique est particulière. Elle signifie que les objets composants représentent soit des instantanés, soit des périodes de la vie de leurs objets composés. Cette association est très utile lors de l'intégration d'une base de données temporelle avec une autre non-temporelle décrivant les mêmes objets. Des formules de dérivation étendues au temporel permettent de spécifier comment le cycle de vie et les périodes de validité

des attributs temporels de l'objet composé sont dérivés du cycle de vie et/ou des attributs du composant. Par exemple, dans la figure 17, l'agrégation d'instantanés *Versions* permet de dériver le cycle de vie et l'attribut temporel *hauteur* d'une occurrence de *StationMesure* à partir des occurrences d'*InstantanéStationMesure* qui lui sont associées.

5. L'expérimentation dans le cadre de l'application GESREAU

MADS a été employé pour modéliser plusieurs applications réelles: gestion pétrolière en Colombie, gestion du réseau urbain des eaux claires et usées de la ville de Genève, étude de l'évolution du bassin versant du cours supérieur de la Sarine, et gestion des ressources en eau du Canton de Vaud. Cette dernière application, appelée GESREAU [CRA 97], nous a permis de comparer deux modélisations de la même application, l'une avec un modèle classique et l'autre en MADS. L'application GESREAU décrit, entre autres, un réseau hydrographique complet, à savoir les cours d'eau, les étendues d'eau, les bassins versants, les stations de mesure (pluie, débit et hauteur des cours d'eau, qualité de l'eau), etc. Les entités sont décrites autant sur le plan technique qu'administratif. Un extrait du schéma GESREAU en MADS est présenté. Le schéma préexistant (environ 160 types d'objet et d'association) avait été fait avec l'outil de conception IE de Texas Instruments Software [IEF 88], qui utilise un modèle de type entité-association.

Lors de la re-modélisation en MADS, plusieurs apports importants du modèle ont été constatés:

- la simplification du schéma, MADS ayant permis de diminuer de 22% le nombre de types d'objet et de types d'association par rapport au schéma IE. Comme le modèle IE n'accepte que des entités à structure simple, les entités du monde réel étaient éclatées en plusieurs entités et associations, alors qu'il y a adéquation entre les entités réelles et les objets MADS.

- la possibilité de décrire explicitement les caractéristiques spatiales de l'application, qui restaient implicites en IE. Dans le schéma IE de GESREAU, deux tiers des associations représentaient en fait des relations topologiques. On y retrouvait aussi très fréquemment des associations correspondant à une agrégation spatiale. La description explicite des relations topologiques et des agrégations a permis de découvrir des redondances dans le schéma d'origine, notamment entre les relations décrivant les déversements des cours d'eau, des segments hydrographiques et des étendues d'eau.

- le fait de se placer au niveau conceptuel permet au concepteur de se concentrer sur les besoins réels de son application sans avoir à se préoccuper de leur traduction dans des concepts logiques plus pauvres. A contrario, dans le schéma IE plusieurs constructions artificielles avaient dû être introduites pour respecter les restrictions du SIG sur lequel la base allait être chargée, ce qui ne devrait apparaître qu'au niveau du schéma logique. Par exemple, les tronçons de rivière avaient été découpés non pas en

fonction des besoins de l'application, mais en fonction des changements de valeur de leurs attributs thématiques, même si ces changements n'étaient pas significatifs. De même, le SIG ne permettant pas d'avoir plus de deux zones partageant la même frontière (l'une à droite et l'autre à gauche), certains types d'objets, surfaciques dans la réalité, avaient été déclarés non spatiaux, ou bien les frontières communes n'avaient pas été déclarées comme communes.

– la découverte de l'étendue de la composante temporelle de l'application. Les concepteurs du schéma originel en IE, ne disposant que d'un modèle conceptuel non temporel et sachant que l'implémentation se ferait sur un SIG non temporel, ont été conduits à ignorer quasi complètement la composante temporelle de l'application, alors que celle-ci était essentielle pour l'établissement de prévisions et pour l'aide à la décision. La re-modélisation en MADS a révélé que de nombreux attributs étaient temporels, notamment les mesures et le type d'occupation du sol. Plusieurs types d'objets avaient leur cycle de vie (complexe, avec des suspensions) représenté de façon détournée (par exemple les stations de mesure qui tombent en panne).

Parmi les caractéristiques spatiales de MADS, outre les entités, attributs et associations spatiales, les attributs variables ont été utiles pour modéliser l'occupation du sol des bassins versants, ainsi que les fonds de carte. L'occupation du sol est en GESREAU un attribut à la fois variable et temporel, enregistré toutes les années. Enfin, l'organisation des types abstraits spatiaux en une hiérarchie s'est révélée utile chaque fois que le type spatial n'était pas bien connu ou variable selon les occurrences. Par exemple, les droits de prélever de l'eau dans une rivière peuvent être ponctuels ou valables sur un tronçon de rivière.

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté le modèle conceptuel MADS, qui permet la modélisation de données spatiales et/ou temporelles. MADS a été conçu dans un contexte applicatif de gestion et aménagement du territoire et certaines de ses orientations (limitation à deux dimensions dans l'espace, vision discrète de l'espace, linéarité du temps) reflètent les besoins des responsables de ces applications. Néanmoins, une large gamme d'applications rentre dans ce cadre particulier.

L'objectif qui a le plus fortement marqué l'élaboration de MADS est celui de l'orthogonalité entre les trois dimensions: structurelle, spatiale et temporelle. Ceci permet d'obtenir un modèle à la fois simple (puisque les concepts sont indépendants) et puissant (puisque ces concepts peuvent être combinés avec flexibilité). L'orthogonalité permet également de répondre à une autre exigence fondamentale, qui est de pouvoir mélanger dans une application des données classiques avec des données spatio-temporelles. MADS permet de décrire explicitement les relations topologiques ou temporelles entre les objets. La sémantique de ces relations peut être personnalisée pour épouser les besoins spécifiques d'une application. La possibilité de décrire des champs spatiaux continus est une autre fonctionnalité importante. Enfin, l'utilisation

de notations visuelles intuitives assure le confort du concepteur et facilite le développement d'interfaces visuelles.

MADS a été testé dans plusieurs contextes applicatifs (cf. l'exemple de la figure 19). Ses avantages en termes de concision et de lisibilité apparaissent de façon évidente. Les utilisateurs ont également apprécié le confort d'utilisation dû au fait de ne plus avoir à prendre en considération les particularités techniques des SIG ou SGBD existants.

Les axes de recherche qui sont en cours d'approfondissement couvrent principalement les points suivants:

- la définition de langages de manipulation de données, complément indispensable du modèle descriptif,
- l'amélioration des concepts permettant des représentations multiples d'un même objet, notamment pour modéliser les changements de géométrie des objets et de leurs liens topologiques en fonction de la résolution/échelle cartographique;
- la formalisation des relations topologiques pour les objets complexes;
- la gestion du futur et de spécifications temporelles imprécises, ainsi que la formalisation des règles de coexistence entre objets temporels et objets non-temporels;
- l'intégration de bases de données spatio-temporelles hétérogènes afin d'offrir la possibilité de construire une base cohérente et intégrée à partir de sources de données diverses [DEV 98].

Parallèlement, nous avons entrepris la réalisation d'outils destinés à offrir les fonctionnalités de MADS aux concepteurs et utilisateurs de bases spatio-temporelles. Cette implémentation est présentée dans le paragraphe suivant.

7. Implémentation

Au delà des qualités intrinsèques d'un modèle conceptuel, trois facteurs déterminent sa diffusion et son succès auprès des utilisateurs:

- la disponibilité d'un outil logiciel, appelé éditeur de schémas pour créer, modifier, conserver et consulter des schémas exprimés dans ce modèle.
- la disponibilité d'un (ou plusieurs) traducteurs capables de reformuler, avec un appauvrissement sémantique minimal, un schéma conceptuel en un schéma logique acceptable par un logiciel de type SGBD ou SIG.
- la disponibilité d'un langage de manipulation associé au modèle conceptuel pour exprimer les requêtes de mise à jour et d'interrogation dans le formalisme du modèle.

Un éditeur de schémas conceptuels non accompagné de traducteurs est essentiellement un moyen de documenter le travail d'analyse de l'entreprise et de conception de la base de données. Un éditeur de schémas couplé seulement avec des traducteurs (cas le plus fréquent) permet la mise en oeuvre du schéma conceptuel mais oblige les utilisateurs à apprendre le modèle logique et ses langages pour pouvoir manipuler les données de la base. Par exemple, les utilisateurs d'une méthode de conception entité-association doivent également apprendre les singularités du modèle relationnel et du

langage de requêtes SQL pour avoir accès à leurs données. La définition d'un langage de manipulation conceptuel permet au contraire d'offrir un environnement de travail homogène.

Dans le contexte de plus en plus fréquent d'utilisation directe des bases de données par des utilisateurs non spécialistes, le mode de travail qui s'impose pour ces outils est celui de l'interaction directe à l'écran. Il y a donc un besoin marqué d'outils graphiques pour l'édition de schémas et d'outils visuels d'aide à la formulation de requêtes.

Le projet de recherche dans lequel s'inscrit la proposition du modèle conceptuel MADS a aussi pour objectif le développement d'un jeu d'interfaces conceptuelles permettant à l'utilisateur le dialogue avec la base de données au travers du seul formalisme MADS. L'approche s'inspire de l'expérience acquise sur les interfaces conceptuelles pour bases de données classiques [DEN 95]. Il se base également sur une étude des caractéristiques des divers outils CASE (Computer-Assisted System Engineering), ou AGL (Ateliers de Génie Logiciel) disponibles sur le marché [PAG 92, POU 97]. Un des constats les plus marquants de cette étude est qu'il n'existe pas ou peu d'outils s'appuyant sur un modèle de données spatio-temporelles.

Les interfaces conceptuelles forment une couche logicielle servant d'intermédiaire entre les concepteurs/utilisateurs et les systèmes sous-jacents (SGBD ou SIG). A terme l'utilisateur disposera ainsi des modules suivants :

- l'éditeur visuel de schémas pour la définition / consultation / mise à jour de schémas MADS, incluant le support d'un dictionnaire de données et un générateur de documentation HTML;

- l'éditeur de requêtes, visuel, permettant d'écrire une requête selon l'un des trois modes suivants ou en combinant plusieurs modes:

1. mode schéma: à partir du schéma affiché à l'écran, l'utilisateur construit par manipulations directes la structure des objets désirés en résultat et spécifie les conditions à satisfaire, par exemple en pointant les relations thématiques, spatiales ou temporelles qui doivent être satisfaites;

2. mode croquis (ou par esquisses ou "sketch"): l'utilisateur dessine le croquis de la configuration spatiale qu'il recherche;

3. mode cartographique: sur des cartes affichées à l'écran, l'utilisateur définit les conditions spatiales que doivent satisfaire les objets, par exemple par pointage d'un objet, sélection d'une zone ou intersection de *buffers*. Ce mode permettra aussi la consultation des résultats spatiaux.

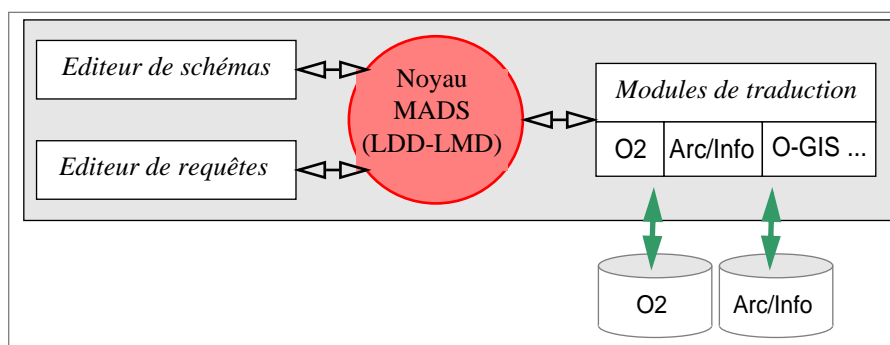


Figure 18. Architecture du système

Le noyau MADS, au coeur de l'architecture, implémentera les langages de définition (LDD) et de manipulation (LMD) de données MADS. Les modules de traduction assureront la traduction des schémas et des requêtes MADS dans le LDD/LMD du SGBD ou SIG cible (cf. figure 18).

Un prototype de l'éditeur de schémas MADS a été réalisé. Il a été réalisé en Java pour assurer sa portabilité sur diverses plate-formes. La figure 19 montre une capture d'écran de cet éditeur. Il obéit aux principes de manipulation directe et de flexibilité. La construction d'un schéma s'effectue principalement à l'aide de la souris et des boîtes de dialogue. Des menus contextuels ont été définis pour permettre un accès immédiat à un ensemble d'actions possibles sur l'élément en cours.

Des traducteurs ont été développés. Ils transforment un schéma MADS en son équivalent IEF (modèle de type entité association simple) [IEF 88], INTERLIS (norme suisse d'échange entre SIG) ou en relationnel. Il est à noter que les caractéristiques spatio-temporelles des données sont conservées dans la spécification cible pour autant que le SIG ou SGBD sache gérer l'espace ou le temps. Dans le cas contraire, la sémantique spatio-temporelle est formulée conformément à des patrons (patterns) standards que le concepteur d'applications pourra retrouver facilement. Un générateur de documentation HTML accompagne l'éditeur.

Le langage de manipulation de données MADS et l'éditeur de requêtes multiparadigme sont en cours de spécification. Au delà, les points qui resteront également à développer sont l'intégration de la modélisation des traitements, la personnalisation du graphisme et des fonctionnalités en fonction de besoins spécifiques, la robustesse, l'aide en direct et l'interopérabilité.

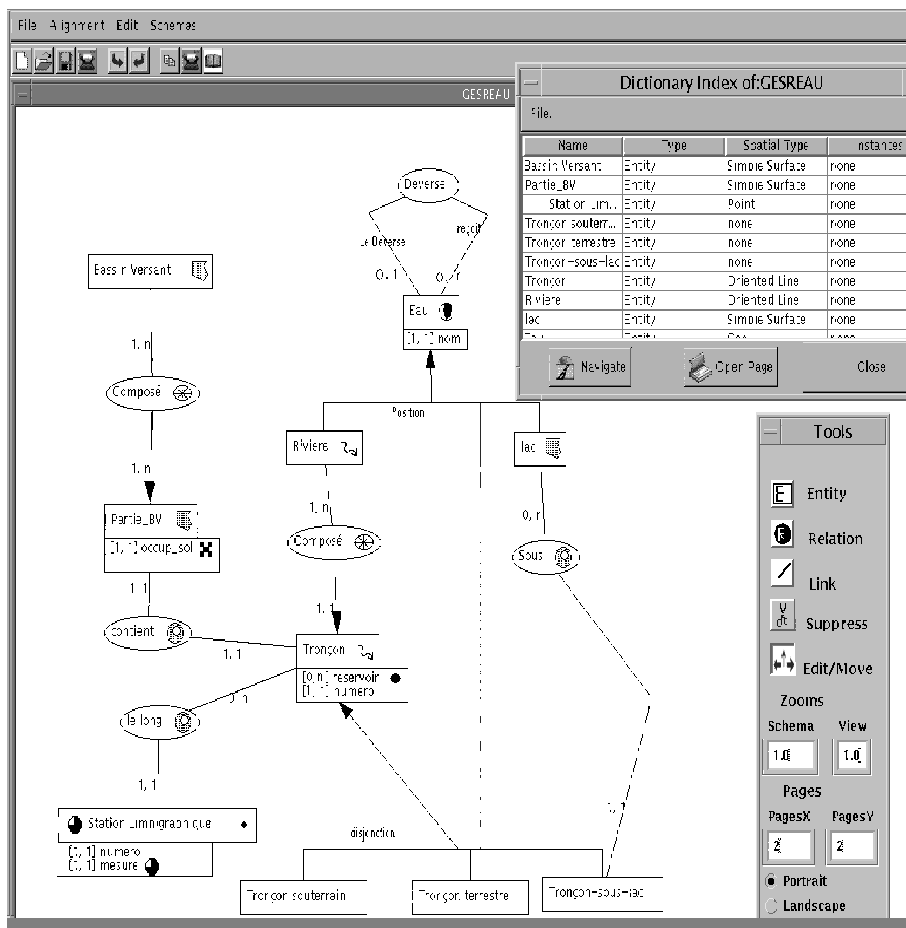


Figure 19. Capture d'écran de l'éditeur MADS

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude à Christophe Claramunt, pour son aide assidue et bienveillante dans la compréhension des besoins des utilisateurs et des particularités applicatives des phénomènes spatiaux et temporels. Nous tenons également à remercier chaleureusement nos partenaires, MM. Jaunin et Imhof de l'Administration Cantonale Vaudoise et M. Berthoud de Texas Instruments Software, pour leur collaboration efficace et patiente.

8. Bibliographie

- [ALL 83] J. ALLEN, *Maintaining Knowledge about temporal intervals*, Communications of the ACM, 26(11), p. 832-843, 1983.
- [BED 96] Y. BÉDARD, C. CARON, Z. MAAMAR, B. MOULIN, D. VALIÈRE, *Adapting Data Models for the design of Spatio-Temporal Databases*, Computer Environment and Urban Systems, 20(1), 1996.
- [CAR 93] C. CARON, Y. BÉDARD, P. GAGNON, *MODUL-R, Un formalisme individuel adapté pour les SIRS*, Revue de géomatique, 3(3), 1993.
- [CHA 92] P. CHAMPOUX, *Notions fondamentales d'analyse spatiale et d'opérateurs spatiaux*, Revue des sciences de l'Information Géographique et de l'Analyse Spatiale, 2(2), 1992.
- [CHE 76] P.P. CHEN, *The Entity Relationship Model - Towards a Unified View of Data*, ACM Transactions on Database Systems, 1(1), p. 9-36, 1976.
- [CHO 98] J. CHOMICKI, D. TOMAN, *Temporal Logic in Information Systems*. In Logics for Databases and Information Systems, pp. 31-70. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [CLE 93] E. CLEMENTINI, P. DI FELICE, P. VAN OOSTEROM, *A Small Set of Formal Topological Relationships Suitable for End-User Interaction*, Proceedings of the 3rd International Symposium on Advances in Spatial Databases, SSD'93, p. 277-295. Springer Verlag, Lecture Notes in Computer Science 692, 1993.
- [CLI 95] J. CLIFFORD, A. TUZHILIN. *Recent Advances in Temporal Databases*, Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases, Zurich, Switzerland, 1995. Springer-Verlag.
- [CLI 97] J. CLIFFORD, C. DYRESON, T. ISAKOWITZ, C.S. JENSEN, R.T. SNODGRASS, *On the Semantics of "Now"*, ACM Transactions on Database Systems, 22(2), p. 171-214, 1997.
- [CRA 97] P.A. CRAUSAZ, A. MUSY, *GESREAU: un outil de gestion des eaux par une modélisation du territoire*, Revue de internationale de géomatique, 7(2), juin 1997, p. 127-139.
- [DAV 93] B. DAVID, L. RAYNAL, G. SCHORTER, *GeO2: Why objects in a geographical DBMS?*, Proceedings of the 3rd International Symposium on Advances in Spatial Databases, SSD'93, p. 264-276. Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science 692, 1993.
- [DEN 95] Y. DENNEBOUY ET AL, *SUPER: Visual interfaces for object + relationship data models*, Journal of Visual Languages and Computing, 6(1), p. 73-99, 1995.
- [DEV 98] T. DEVOGELE, S. SPACCAPIETRA, C. PARENT, *On Spatial Database Integration*, International Journal of Geographic Information Systems, Special Issue on System Integration, 1998, A paraître.
- [EGE 91] M.J. EGENHOFER, J. HERRING, *High-Level Spatial Data Structures for GIS*, Geographical Information Systems, D. Maguire, M. Goodchild, D. Rhind, Eds., Longman, London, 1991.
- [EGE 92a] M.J. EGENHOFER, J. HERRING, *Categorizing Binary Topological Relationships between Regions, Lines and Points in Geographic Databases*, Department of Survey Engineering, Université du Maine, 1992.

- [EGE 92b] M.J. EGENHOFER, A.U. FRANCK, *Object-Oriented Modeling for GIS*, URISA Journal, 4(2), 1992.
- [GAY 97] O. GAYTE, T. LIBOUREL, J.P. CHEYLAN, S. LARDON, *Conception des systèmes d'information sur l'environnement*, Hermès, Paris, 1997.
- [GRE 97] H. GREGERSEN, C. S. JENSEN, *Temporal Entity-Relationship Models - A Survey*, Technical Report R-96-2039, Aalborg University, janvier 1997.
- [IEF 88] IEF INFORMATION ENGINEERING FACILITY, *A Guide to Information Engineering Using the IEF*, Texas Instruments, 1988.
- [JEN 94] C.S. JENSEN, J. CLIFFORD, R. ELMASRI, S.K. GADIA, P. HAYES, S. JAJODIA, *A Consensus Glossary of Temporal Database Concepts*. SIGMOD Record, 23(1), p. 52-64, 1994.
- [KAN 83] E.Y. KANDRASHINA, *Representation of Temporal Knowledge*. in A. Bundy (Ed.), Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, p. 346-348. Karlsruhe, FRG, August 1983. William Kaufmann.
- [LAU 93] R. LAURINI, F. MILLERET-RAFFORT, *Les bases de données en géomatique*, Hermes 1993
- [LIG 91] G. LIGOZAT, *On Generalized Interval Calculi*, Proceedings of the 9th National Conference on Artificial Intelligence, pp 234-240, Anaheim, California, 1991. AAAI Press / The MIT Press.
- [NGU 97] V.H. NGUYEN, C. PARENT, S. SPACCAPIETRA, *Complex Regions in Topological Queries*, Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory, CO-SIT'97, Pennsylvania, USA, 1997.
- [OZS 95] G. OZSOYOGLU ET R. SNODGRASS, *Temporal and Real-Time Databases: A Survey*, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 7(4), p. 513-532, 1995.
- [PAG 92] J. PAGEAU, Y. BÉDARD, *Conception d'un outil CASE pour la modélisation des données à référence spatiale*, Conférence canadienne sur les SIG, p. 381-392, Ottawa, Canada, 1992.
- [PAN 96] D. PANTAZIS, J.P. DONNAY, *La conception de SIG - Méthode et formalisme*, Hermès, 1996.
- [PAR 98] C. PARENT, S. SPACCAPIETRA, E. ZIMÁNYI, P. DONINI, C. PLAZANET, C. VANGENOT, *Modeling Spatial data in the MADS Conceptual Model*, Proceedings of the International Symposium on Data Handling, SDH 98, Vancouver, Canada, July 11-15, 1998
- [PIS 94] N. PISSINOU ET AL. *Towards an Infrastructure for Temporal Databases*, SIGMOD Record, 23(1), p. 35-51, 1994.
- [POU 98] J. POULIOT, N. ROGNON, Y. BÉDARD, F. GOLAY, *De la sélection à la mise en oeuvre d'outils de conception pour les SIRS*, Revue internationale de géomatique, 7(3/4), 1997.
- [RUM 91] J. RUMBAUGH, M. BLAHA, W. PREMERLANI, F. EDDY, W. LORENSEN, *Object oriented modeling and design*, Prentice Hall, 1991.
- [SCH 96] M. SCHOLL, A. VOISARD, J.-P. PELOUX, L. RAYNAL, P. RIGAUX, *SGBD Géographiques - Spécificités*, International Thomson Publishing, 1996

- [SNO 95] R.T. SNODGRASS, éditeur, *The TSQL2 Temporal Query Language*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [SNO 96] R.T. SNODGRASS, M.H. BÖHLEN, C.S. JENSEN, A. STEINER. *Adding Valid Time to SQL/Temporal*. ISO/IEC JTC1/SC21/WG3 DBL MAD-146r2 21/11/96.
- [SPA 92] S. SPACCAPIETRA AND C. PARENT, *ERC+ : An Object based Entity Relationship Approach*, In *Conceptual modeling, databases, and CASE*, P. Loucopoulos and R. Zicari (Eds.), John Wiley & Sons, 1992, p. 69-86.
- [TRY 97] N. TRYFONA, D. PFOSE, T. HADZILACOS, *Modeling Behavior of Geographic Objects: An Experience with the object modeling technique*, Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Information Systems Engineering, CAiSE'97, Barcelone, Espagne. Springer-Verlag, 1997.
- [TSO 96] V. TSOTRAS, A. KUMAR, *Temporal Database Bibliography Update*, SIGMOD Record, 25(1), p. 41-51, 1996.
- [TAN 93] A. UZ TANSEL, J. CLIFFORD, S. GADIA, S. JAJODIA, A. SEGEV, R. SNODGRASS, *Temporal databases: Theory, design, and implementation*, Benjamin/Cummings, 1993.
- [ZIM 97] E. ZIMANYI, C. PARENT, S. SPACCAPIETRA, *TERC+ : A Conceptual Temporal Model*, Proceedings of the International Symposium on Digital Media Information Base, DIBM'97, Nara, Japan, November 26-28, 1997