

Modélisation conceptuelle des trajectoires

Christine Parent*, Stefano Spaccapietra**
Christelle Vangenot**, Maria-Luisa Damiani***, José de Macedo**, Fabio Porto**

*UNIL-HEC-ISI, Dorigny, CH-1015 Lausanne
christine.parent@unil.ch
<http://lbd.epfl.ch/~cparent/christine.html>
**EPFL-IC-LBD, Station 14, CH-1015 Lausanne
(stefano.spaccapietra, christelle.vangenot, jose.macedo, fabio.porto)@epfl.ch
<http://lbd.epfl.ch>
***Università Milano
mdamiani@ dico.unimi.it

Résumé Une perception intelligente du mouvement d'objets mobiles (personnes, voitures, colis, etc.) est à la base de nombreuses applications (par exemple le suivi d'une distribution postale à travers le monde, l'optimisation du trafic routier ou l'étude de la migration d'animaux). Les systèmes de gestion de bases de données actuels n'offrent ni les concepts ni les fonctions nécessaires à une analyse sémantique du mouvement, se limitant au stockage et à l'interrogation de positions spatiales individuelles, hors contexte temporel. Des travaux de recherche précédents ont introduit et développé le concept d'objet mobile ou spatio-temporel. Dans cet article nous allons plus loin en proposant le concept de trajectoire comme unité sémantique de mouvement sur laquelle se construit la vision applicative. Nous proposons de décrire les trajectoires, au niveau conceptuel, avec leurs aspects géométriques, temporels et sémantiques et leurs composants structurels : point de départ, point d'arrivée, arrêts et déplacements intermédiaires. Chaque élément, trajectoire, arrêt, déplacement, voire partie de déplacement, peut recevoir des annotations sémantiques sous forme de valeurs d'attributs ou de liens vers des objets de la base. L'approche de modélisation décrite dans cet article est basée sur les patrons de modélisation, qui permettent une solution générique pour modéliser les caractéristiques standard des trajectoires tout en étant ouverte aux caractéristiques spécifiques à l'application envisagée. Enfin, l'implémentation dans une base de données relationnelle étendue est présentée.

1 Introduction

Le monde bouge et bien des phénomènes ne peuvent être compris sans étudier leurs mouvements. Heureusement, de nouvelles technologies (GPS et autres transmetteurs, capteurs et réseaux de capteurs, marqueurs de type RFID) permettent désormais de saisir des positions spatio-temporelles et ainsi de suivre un grand nombre d'objets en mouvement. Cette voie correspond aux besoins réels d'applications dans de nombreux domaines, parmi lesquels l'analyse des déplacements des habitants d'une ville ou d'un état afin d'optimiser les

infrastructures de transport, le suivi d'une flotte de véhicules de livraison, ou encore les études comportementales d'animaux migratoires.

Malheureusement les systèmes de gestion de base de données (SGBD) actuels n'offrent au mieux que la possibilité de traiter de positions fixes. Toute la logique de modélisation et de traitement du mouvement est à la charge des programmes d'applications. Le monde de la recherche a été plus loin, en concrétisant au niveau du prototypage les concepts et les opérations liés à la gestion d'objets en mouvement, dits objets mobiles (Almeida et al., 2006, Pelekis et al., 2006). Toutefois, ces travaux n'ont abordé que la dimension spatio-temporelle du mouvement, à savoir la trace géométrique du parcours de l'objet dans l'espace au cours du temps.

Cela est insuffisant pour les applications qui utilisent une vision plus structurée, plus sémantique, du mouvement. Par exemple, de nombreuses applications perçoivent le mouvement d'un objet non pas comme un déplacement unique qui commencerait au début de la vie de l'objet et ne se terminerait qu'avec elle, mais comme une séquence de déplacements, chaque déplacement ayant son propre but, un lieu et un instant de départ bien définis, et un lieu et un instant d'arrivée bien définis. C'est, entre autres, le cas des applications qui analysent les déplacements quotidiens des employés entre leur domicile et leur lieu de travail, les tournées hebdomadaires de camions qui livrent des marchandises dans une région donnée, ou les migrations annuelles d'oiseaux à la recherche d'une nourriture plus abondante. Dans ces cas, la perception d'un mouvement unique pour chaque objet n'est pas adéquate, et une perception sémantique verra plutôt une succession de déplacements nettement différenciés les uns des autres. C'est chacun de ces déplacements successifs, effectués au cours de la vie d'un objet mobile, que nous appelons trajectoire. L'analyse de ces trajectoires permet de construire des modèles de mobilité servant soit à une prise de décision (par exemple récolter des trajectoires urbaines afin d'en dériver des connaissances utiles pour optimiser le trafic), soit à l'acquisition de connaissances concernant l'objet mobile (par exemple analyser les trajectoires des oiseaux pour mieux comprendre leur comportement), soit encore au contrôle de stratégies, notamment en logistique (par exemple surveiller le bon fonctionnement et l'efficacité du système de livraison de colis par une entreprise postale).

Du point de vue des applications, l'étude de ces trajectoires demande de récolter de nombreuses autres informations en plus du chemin parcouru. Par exemple pour une application étudiant les déplacements quotidiens pour aller au travail, le moyen de transport est une information essentielle. Pour l'étude des migrations d'oiseaux, ce sont les conditions météorologiques et les arrêts des oiseaux en cours de parcours (quand, dans quel type de lieu, pourquoi et pendant combien de temps). Il est aussi important de pouvoir décrire les contraintes liées à l'application, comme le fait que certains oiseaux ne volent jamais durant la nuit, tandis que d'autres ne volent que de nuit. Ces applications ont besoin de nouvelles structures de représentation qui aillent au-delà de la simple description du mouvement. Ces nouvelles structures doivent comprendre une partie fixe pour les caractéristiques communes à toutes les trajectoires, et une partie variable pour les caractéristiques spécifiques aux trajectoires de chaque application.

Cet article étudie le problème de modélisation des trajectoires au niveau conceptuel, ce qui nous permet d'établir les bases de modélisation sans être influencés par des considérations liées à des implémentations particulières. Nous proposons un patron de modélisation des trajectoires qui peut être adapté à toute application qui utilise des trajectoires. Cette approche par patron semble particulièrement adaptée parce qu'elle offre la flexibilité indispensable pour prendre en compte la diversité de la sémantique des

trajectoires. Le modèle conceptuel ainsi défini permet de prendre en compte aussi bien les trajectoires simples (déplacements directs d'un point à un autre) que les trajectoires complexes (où le déplacement est composé d'une séquence de déplacements séparés par des arrêts temporaires). Il permet aussi d'associer des annotations sémantiques aux trajectoires, que ce soit sous la forme d'attributs (par exemple, le moyen de transport utilisé) ou de liens entre la trajectoire et des objets de la base de données de l'application (par exemple, un lien avec le client auquel on a livré un colis).

Dans un but de simplification, cet article ne considère que des objets mobiles représentés dans l'espace géographique par un point, qu'il s'agisse d'objets effectivement perçus comme des points par l'application, ou d'objets indéformables ou dont la déformation n'est pas intéressante pour l'application. Leur position peut donc être décrite par une fonction du temps vers l'espace (vu comme un ensemble de points). L'approche peut être généralisée aux objets surfaciques déformables, en décrivant le mouvement de l'objet par une fonction du temps vers l'espace vu comme un ensemble de surfaces (ou de lignes ou de volumes).

L'article est organisé comme suit. Le paragraphe qui suit propose un aperçu de l'état de l'art. Le paragraphe 3 présente l'application que nous avons utilisée pour illustrer notre approche, l'étude des migrations des cigognes blanches. Le paragraphe 4 définit les composants de base de notre approche de modélisation de trajectoires alors que le paragraphe 5 explore les besoins des applications et leur mise en œuvre à l'aide de ces composants de base. Le paragraphe 6 présente le patron de modélisation des trajectoires. Le paragraphe 7 propose une implémentation du patron sur un SGBD relationnel étendu avec des types de données spatiaux. Finalement, le paragraphe 8 propose des directions de recherche qui peuvent compléter ce travail.

2 État de l'art

Depuis longtemps différents types de mouvements ont fait l'objet d'études dans des domaines divers. C'est le cas en sciences sociales pour l'étude des migrations, des déplacements quotidiens ou des comportements humains en voyage (Kwan et Lee 2003, Thériault et al. 2002). C'est le cas en biologie pour l'étude du déplacement des cellules ou en médecine pour l'étude de la propagation de maladies...

Par ailleurs en géomatique, le mouvement effectué par un objet mobile a été décrit de façon générique. Il est appelé "ligne de vie géospatiale" par Mark et al. (1999) et est décrit comme une ligne dans un espace spatio-temporel à trois dimensions (x,y,t), les coordonnées géographiques (x,y) et le temps, t. Hornsby et Egenhofer (2002) en ont proposé une définition formelle qui permet d'appréhender les problèmes des granularités multiples. Laube et al. (2005) ont fait appel aux techniques de fouille des données pour analyser les lignes de vie géospatiales afin d'en extraire une typologie des déplacements. Suivant une approche base de données, Güting et al. (Güting et al. 2000, Güting et Schneider 2005) ont apporté une contribution essentielle en proposant une théorie formelle pour les objets mobiles (points et surfaces) et un prototype qui implémente cette théorie en utilisant un SGBD propriétaire extensible, Secondo (Güting et al. 2004). Le cœur de cette théorie est un ensemble de types de données qui comprend des types spatiaux, des types temporels et des types "mobiles" (des types qui représentent une valeur qui varie dans le temps). Plus récemment, les auteurs ont étendu leur approche à la modélisation et manipulation de trajectoires contraintes par un réseau prédéfini, par exemple, un réseau ferré ou routier (Güting et al. 2006). La plupart des

travaux sur le mouvement contraint par un réseau décrivent, d'un côté, le réseau avec sa structure et sa localisation et, d'un autre côté, l'objet mobile avec ses coordonnées. Puis ils contraignent les coordonnées de l'objet à se situer sur le réseau. L'approche de Güting et al. (2006) est différente : ils décrivent la position de l'objet via une référence aux routes du réseau, par exemple "sur l'autoroute A9, 10 km après Montreux en direction du Valais". Cette technique de spécification implique que l'objet mobile est nécessairement positionné à l'intérieur du réseau, ce qui rend inutile le recours à des contraintes spatiales.

Wolfson et al. (1998, 1999) ont élaboré une autre approche des objets mobiles dans l'objectif de réduire le coût des mises à jour. Ceci les conduit à stocker des vecteurs de mouvement (direction, vitesse, instant) plutôt que des positions spatio-temporelles (point, instant), ce qui a l'avantage de permettre de prédire le mouvement futur en fonction du dernier vecteur de mouvement. Le vecteur courant reste actif tant que la différence entre la position prédite et la position relevée est inférieure à un seuil donné. Quand le seuil est dépassé un nouveau vecteur est calculé et stocké. Ce travail ne considère que les points mobiles, pas les régions mobiles. Les mêmes auteurs se sont aussi intéressés aux déplacements contraints par un réseau. Notons que ce thème des déplacements contraints a aussi été étudié par Speicys et al. (2003).

Noyon et al. (2005) ont étudié comment les déplacements de deux objets mobiles ponctuels ou surfaciques peuvent être corrélés via des mesures de distance, ou comment analyser l'évolution de la position relative d'un objet par rapport à celle d'un autre objet.

L'étude des mouvements périodiques (se répétant régulièrement, par exemple le mouvement de planètes, de trains ou d'animaux migrateurs) a intéressé plusieurs équipes. Behr et al. (2006) ont proposé un modèle formel pour représenter les mouvements périodiques qui peuvent contenir des répétitions imbriquées comme, par exemple, le mouvement d'un métro qui réalise la même trajectoire chaque jour de la semaine. Suivant l'approche initiale à base de types abstraits de données proposée par Güting et al. (2000), les auteurs ont défini et implémenté sur Secondo un ensemble de types de données apte à décrire les mouvements périodiques, en particulier, le type *pmpoint* (periodic moving point).

Du côté des implémentations, on trouve le système Hermès (Pelekis et al. 2006), dont les spécifications ont été construites en se basant sur les approches de Güting et de Wolfson. Hermès est une nouvelle cartouche de données spatio-temporelles pour le SGBD relationnel-objet Oracle 10. La cartouche utilise les types spatiaux statiques d'Oracle (Oracle 2007) et les types temporels proposés par la cartouche temporelle de TAU-TLL de Pelekis et Theodoulidis (2002). Hermès offre aussi différents types de fonctions d'interpolation pour reconstituer d'éventuelles parties manquantes du mouvement. Par ailleurs, certains travaux ont élaboré des techniques d'indexation spécifiques aux objets mobiles pour améliorer les performances du système (voir Chakka et al. 2003 et Pelanis et al. 2006).

A contrario, la prise en compte d'une vision applicative des objets mobiles, c'est-à-dire une vision qui tienne compte des aspects sémantiques du mouvement, ne semble pas avoir motivé les chercheurs. Ainsi, nous n'avons pas trouvé d'approche conceptuelle du mouvement qui soit basée sur les besoins des applications. Les modèles conceptuels pour bases de données spatio-temporelles proposent bien le concept de point mobile (voir par exemple Khatri et al. 2004 ou Parent et al. 2006a), mais elles ne vont pas au-delà. À notre connaissance un seul travail, Brakatsoulas et al. (2004), s'est donné pour objectif d'enrichir la sémantique d'un modèle pour objets mobiles. Malheureusement les trajectoires de ces auteurs restent au niveau géométrique. Ce sont des polygones qui connectent les différentes positions spatio-temporelles relevées; elles représentent le mouvement par une séquence de

segments spatio-temporels plutôt que par une séquence d'étapes sémantiques. De même, les propriétés des trajectoires sont uniquement celles qui sont dérivables des positions spatio-temporelles, comme la vitesse ou le chemin parcouru, et non d'autres propriétés sémantiques qu'une application pourrait souhaiter conserver à propos de ses trajectoires, comme, par exemple, le but de la trajectoire.

Se démarquant des approches purement géométriques, cet article perçoit les trajectoires comme des déplacements qui ont une signification sémantique (trajectoires de personnes allant au travail, d'animaux en migration, de véhicules en route pour une destination, de phénomènes naturels régis par les lois de la nature, ...). La liste des positions spatio-temporelles d'un objet tout au long de sa vie ne fournit qu'un des éléments de la trajectoire. D'autres éléments décrivent, entre autres, quand la trajectoire débute, se termine ou quand elle est temporairement suspendue. Ces éléments sont déterminés par l'application qui, seule, peut définir la sémantique de la trajectoire. Notre approche est basée sur ce principe.

Les applications ont aussi souvent besoin de pouvoir décrire des trajectoires selon différentes granularités spatiales et temporelles. Quelques travaux se sont intéressés à la multi-granularité dans le cadre des objets mobiles (Friis-Christensen et al. 2005, Camossi et al. 2003). Nous prévoyons de réutiliser un travail précédent sur la multi-représentation dans les bases de données spatio-temporelles (Balley et al. 2004), Parent et al. 2006b) et de proposer une approche similaire pour la multi-représentation des trajectoires. Cet aspect n'est cependant pas présenté dans cet article.

3 Une application

Ce paragraphe présente un exemple typique d'application utilisant des trajectoires. Ce type d'application a pour objectif d'analyser les déplacements d'animaux migrateurs. Les données sur leurs mouvements sont soit obtenues automatiquement grâce à des émetteurs portés par les animaux et qui envoient régulièrement leur position, soit obtenues par observation directe en capturant, temporairement, les animaux.

L'exemple qui nous sert d'illustration concerne les migrations annuelles des cigognes blanches (*Ciconia ciconia*), auxquelles s'intéressent plusieurs groupes de recherche¹. Comme plusieurs espèces d'oiseaux migrateurs, les cigognes migrent tous les ans. Chaque automne, elles quittent l'hémisphère nord, notamment l'Europe, pauvre en nourriture en hiver, et migrent vers l'hémisphère sud, où la nourriture est abondante tout au long de l'année. Mais pour se reproduire et nourrir leurs petits, les cigognes ont besoin des longues journées qu'offre l'hémisphère nord en été. Elles reviennent donc vers le nord au printemps.

L'analyse des migrations animales a pour objectif général d'améliorer les connaissances concernant le comportement animal. Est-ce que la migration est innée et en quelque sorte programmée génétiquement ? Comment les oiseaux s'orientent-ils lors de la migration ? En effet, ils reviennent souvent dans les mêmes endroits pour se reproduire. Comment font-ils pour voler sur de si longues distances ? Volent-ils en groupe ? Où et quand s'arrêtent-ils pour se reposer pendant la migration ? Quels sont les facteurs environnementaux qui influencent leur migration (topographie, conditions météorologiques, prédateurs, disponibilité de

¹ <http://www.storchenhof-loburg.info>, <http://www.fr.ch/mhn/>,
<http://www.vogelwarte.ch>

nourriture) ? Quels sont les dangers rencontrés ? Pourquoi certains oiseaux ne survivent-ils pas à la migration ? ...

Pratiquement les données que nous avons utilisées proviennent d'un ensemble de cigognes blanches. Elles ont été équipées chacune d'un petit émetteur qui émet régulièrement des signaux qui sont captés par des satellites. Les cigognes blanches volent uniquement durant la journée parce qu'elles utilisent les courants thermiques créés par le soleil quand il réchauffe la terre. Elles interrompent donc leur vol la nuit et en profitent pour se reposer et se nourrir. Elles peuvent parcourir plusieurs centaines de kilomètres par jour selon les conditions météorologiques. Elles migrent en groupes dont la composition peut changer lors des arrêts. Pour détecter les groupes de cigognes volant ensemble on analyse les positions spatio-temporelles des cigognes. Cependant, comme seul un petit pourcentage des cigognes sont équipées d'un émetteur, le groupe dans lequel vole un oiseau peut rester inconnu.

Afin d'analyser le comportement des cigognes blanches durant leur migration, les chercheurs ont besoin de connaître deux types d'information :

(1) Informations propres aux trajectoires des oiseaux :

Durant le vol des cigognes, les informations suivantes sont enregistrées à intervalles réguliers :

- leur position spatio-temporelle.
- l'altitude à laquelle la cigogne vole. Cette information, de même que les conditions météorologiques et les objets naturels ou artificiels rencontrés, change le long de la trajectoire de l'oiseau.
- le groupe avec lequel la cigogne vole.

Lorsque les cigognes blanches sont à l'arrêt, les informations suivantes sont enregistrées :

- le type d'arrêt : arrêt pour la nuit ou arrêt plus long (généralement quelques jours ou semaines) pour se reposer et se nourrir.
- si possible, les activités de l'oiseau durant l'arrêt : alimentation, repos, ...
- si la cigogne a pu être attrapée durant l'arrêt, son poids, le pourcentage de graisse, la température de son corps et sa condition générale.

(2) Informations sur les conditions environnementales des trajectoires :

Ici sont principalement enregistrés :

- Les conditions météorologiques : vent (direction, force), température, pression, état du ciel (soleil, pluie, nuages, brouillard, ciel clair).
- Les objets naturels (montagnes, grandes étendues d'eau, déserts...), et les objets artificiels (lignes électriques, antennes, gratte-ciels, éoliennes...) qui peuvent constituer des obstacles pour les cigognes et influencent donc leur vol, notamment leur direction de vol. La description de ces obstacles est particulièrement importante parce qu'ils constituent une menace qui peut entraîner la mort des migrateurs.

4 Trajectoires : Définitions de base

Nous présentons maintenant les définitions de base sur lesquelles repose notre travail, et l'approche de modélisation conceptuelle des trajectoires que nous avons élaborée à partir de l'étude des besoins. Notre objectif est de permettre aux applications gérant des objets mobiles

de décrire leur vision du mouvement d'un objet mobile (c'est-à-dire l'évolution de sa position au cours de sa vie) par un ensemble de trajectoires identifiables et significatives pour l'application. Par exemple, une entreprise gérant une flotte de camions de livraison pourra décrire les déplacements des camions par un ensemble de trajectoires, chacune correspondant à une tournée de livraison qui part du siège de l'entreprise et qui y retourne. À une autre granularité temporelle, le déplacement d'un oiseau migrateur pourra être décrit par deux trajectoires annuelles : l'une en automne de l'Europe vers l'Afrique, l'autre au printemps suivant de l'Afrique vers l'Europe. La figure 1 illustre l'idée de la désignation d'un ensemble de trajectoires dans le mouvement d'un objet mobile. La figure montre aussi que certains segments du mouvement peuvent n'appartenir à aucune trajectoire (par exemple, le segment entre t_1 et t_2). Cette non-appartenance traduit le fait que ces segments correspondent à des déplacements qui n'intéressent pas l'application.

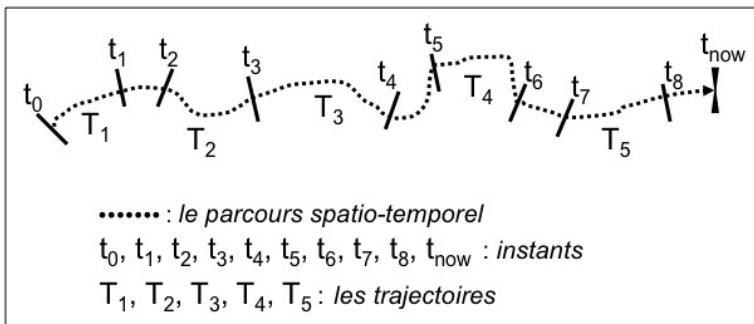


FIG. 1 – Parcours spatio-temporel d'un objet en mouvement, support de trajectoires définies par segmentation sémantique

Étant donné qu'un objet ne peut être qu'à un seul endroit à un instant donné, chaque trajectoire d'un objet est repérable par l'intervalle de temps qui la délimite, depuis l'instant (appelé *tdébut*) où l'objet commence un déplacement dans un but donné jusqu'à l'instant (appelé *tfin*) où le déplacement pour ce but se termine. Identifier (soit directement soit par une règle de calcul) le début et la fin de chaque trajectoire est de la responsabilité de l'application, en fonction de ses propres règles de gestion.

Nous pouvons maintenant définir, au niveau conceptuel, la notion de trajectoire pour un objet ponctuel ou indéformable.

Définition 1 (Trajectoire) : Une trajectoire est la description, du point de vue utilisateur, de l'évolution de la position (perçue comme un point) d'un objet qui se déplace pendant un intervalle de temps donné pour un but particulier.

Trajectoire : $[t_{\text{début}}, t_{\text{fin}}] \rightarrow \text{espace}$

Les trajectoires sont ainsi introduites comme un concept sémantique, qui interprète un segment du parcours d'un objet mobile, identifié par le choix de l'intervalle de temps $[t_{\text{début}}, t_{\text{fin}}]$, comme une unité significative par rapport à l'application. Par exemple, dans l'application de suivi des oiseaux, les ornithologistes doivent définir s'ils voient l'aller-retour annuel d'un oiseau comme une seule trajectoire ou comme deux trajectoires différentes. Dans certains domaines d'application, les trajectoires sont facilement identifiables : par exemple, le parcours des camions de livraison peut être aisément segmenté en trajectoires

journalières. Dans d'autres domaines d'application, par exemple le suivi de chimpanzés, il n'est pas toujours évident de déterminer quand l'objet (le chimpanzé) commence une nouvelle trajectoire et quand il continue simplement la trajectoire précédente. Dans ce cas, la segmentation peut être induite par l'observateur plutôt que par l'observé : par exemple, en définissant une trajectoire par période d'observation. Quel que soit le critère choisi par l'application, l'intervalle de temps qui définit la trajectoire, $[t_{début}, t_{fin}]$, est nécessairement inclus dans le cycle de vie de l'objet et est nécessairement disjoint (ou adjacent) aux intervalles de temps des autres trajectoires du même objet. Si la segmentation en trajectoires couvre l'intégralité du parcours, les intervalles de temps définissant deux trajectoires successives se touchent toujours. De nouveau, ce choix dépend de l'application.

La trajectoire ainsi définie ne constitue que la trace matérielle d'un voyage de l'objet. Cette description minimale peut être enrichie, par exemple en décrivant également, avec plus ou moins de richesse, l'objectif assigné à la trajectoire, les conditions dans lesquelles elle a été réalisée, ou les résultats auxquels elle a abouti.

La fonction temps \rightarrow espace qui définit une trajectoire n'est pas nécessairement identique à celle produite par le processus d'acquisition des données. Ce dernier fournit les données brutes du déplacement sous la forme d'une suite de couples (point d'échantillonnage, instant). Ces données brutes sont souvent d'abord modifiées (nettoyées), afin de corriger les erreurs de saisie et les approximations réalisées lors de l'acquisition, puis retravaillées pour constituer une fonction qui produise une image du déplacement ayant la qualité souhaitée. Enfin, les besoins applicatifs déterminent comment la fonction-trajectoire doit être définie. L'application pourrait n'être intéressée que par un sous-ensemble des points connus : par exemple, elle peut supprimer les points acquis durant la nuit et ne conserver que les déplacements réalisés durant la journée. Elle peut aussi avoir ses propres règles pour simplifier la fonction en remplaçant certaines séquences de points par un point unique synthétisant la séquence.

Les objets ne se déplacent pas nécessairement tout le temps pendant une trajectoire (c'est le cas dans l'exemple des oiseaux). Ils peuvent marquer des temps d'arrêt. Les trajectoires peuvent donc être elles-mêmes segmentées en périodes de déplacement et périodes d'absence de déplacement (où l'objet est vu comme immobile). Nous appelons ces premières des *déplacements* et ces dernières des *arrêts*. Une trajectoire peut donc être perçue comme une séquence de *déplacements* allant d'un *arrêt* à l'*arrêt* suivant. Par exemple, un oiseau en migration va faire un *arrêt* quelque part pour un intervalle de temps donné pour se nourrir, un autre arrêt pour se reposer et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il atteigne sa destination finale, la fin de sa trajectoire. Des représentants de commerce en déplacement vont faire des *arrêts* à tous les endroits où ils doivent rencontrer un client.

Comme pour la détermination du début et de la fin des trajectoires, l'identification des *arrêts* et des *déplacements* dans une trajectoire est de la responsabilité de l'application. Les arrêts physiques (c'est-à-dire le fait que la position de l'objet est la même durant au moins deux instants consécutifs) ne sont pas systématiquement des *arrêts* conceptuels, parce qu'ils peuvent être la conséquence d'événements qui ne sont pas pertinents pour l'application. Par exemple, l'arrêt fait par le représentant de commerce pour boire un café n'est pas pertinent pour l'application. Par contre, l'*arrêt* réalisé pour rencontrer un client l'est. L'application peut vouloir compter le nombre d'*arrêts* par trajectoire et ici seuls les *arrêts* significatifs doivent être comptés. Dans la suite, nous supposons que les *arrêts* et les *déplacements* couvrent complètement la trajectoire (c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'instant inclus dans

$[t_{début}, t_{fin}]$ qui n'appartienne ni à un *arrêt* ni à un *déplacement*). Nous définissons sémantiquement les *arrêts* et les *déplacements* comme suit :

Définition 2 (Arrêt) : Un *arrêt* est une partie de la trajectoire telle que :

- L'utilisateur a explicitement spécifié que cette partie de la trajectoire définie par l'intervalle temporel $[t_{débutArrêt}, t_{finArrêt}]$ représente un arrêt.
- L'intervalle de temps $[t_{débutArrêt}, t_{finArrêt}]$ n'est pas vide.
- Du point de vue de l'application l'objet ne bouge pas, c'est-à-dire l'emprise spatiale formée par la trajectoire pour l'intervalle $[t_{débutArrêt}, t_{finArrêt}]$ est un point.
- Tous les arrêts sont temporellement disjoints : les intervalles de temps correspondants à deux arrêts sont toujours disjoints.

Définition 3 (Déplacement) : Un *déplacement* est une partie de la trajectoire telle que :

- Cette partie est délimitée par deux extrémités qui sont soit deux arrêts consécutifs, soit $t_{début}$ et le premier arrêt, soit le dernier arrêt et t_{fin} , soit encore $t_{début}$ et t_{fin} . Soient $t_{débutDéplacement}$ et $t_{finDéplacement}$ ces deux instants.
- L'intervalle de temps $[t_{débutDéplacement}, t_{finDéplacement}]$ n'est pas vide.
- L'emprise spatiale de la trajectoire pour l'intervalle $[t_{débutDéplacement}, t_{finDéplacement}]$ est la ligne (non réduite à un point) définie par la fonction de la trajectoire. Pratiquement c'est la polygone construite à partir des points de l'échantillon appartenant à l'intervalle $[t_{débutDéplacement}, t_{finDéplacement}]$.

Nous ne considérons pas le début et la fin de la trajectoire comme des arrêts. Leur emprise temporelle est en effet un instant, et non pas un intervalle non vide.

5 Étude des besoins pour la modélisation de trajectoires

Les définitions précédentes sont valables quel que soit le type de trajectoire. Cependant, les besoins en termes de modélisation peuvent varier suivant le type de trajectoire considéré. Nous différencions dans cet article trois types de trajectoires : les trajectoires *métaphoriques*, les trajectoires *géographiques* et les trajectoires *spatio-temporelles*.

5.1 Les trajectoires métaphoriques

Le terme de trajectoire est quelquefois utilisé dans un sens métaphorique afin de décrire une évolution qui n'est pas un mouvement physique. Par exemple, il n'est pas rare de parler de la trajectoire professionnelle d'une personne pour décrire une succession d'états ou de changements, comme dans *"Je suis passée du milieu académique à l'industrie où j'ai travaillé dans une grande compagnie, puis je suis retournée dans le milieu académique"*. Cette utilisation métaphorique de la notion de trajectoire repose sur l'image d'un objet (ici une personne) se déplaçant dans un espace abstrait dont les points sont les différentes valeurs d'un attribut thématique (ici un attribut décrivant le secteur professionnel).

Du point de vue de la modélisation, ce type de trajectoire peut être décrit en définissant l'attribut thématique comme variable dans le temps, c'est-à-dire un attribut dont la valeur est définie par une fonction du temps vers le domaine de valeurs de l'attribut. Réciproquement, tout attribut thématique variable dans le temps peut être vu comme définissant une trajectoire

métaphorique pour les objets qui ont cet attribut. Les modèles de base de données spatio-temporelles existants, tels ceux de Khatri et al. (2004) ou Parent et al. (2006a), proposent ce concept d'attribut variable dans le temps. La variabilité peut être :

- continue : les valeurs de l'attribut changent de façon continue. C'est le cas, par exemple, de la température mesurée en un point particulier ou de la valeur d'une action en bourse.
- par paliers : les changements de valeur sont instantanés et chaque valeur est valable durant un intervalle de temps. C'est le cas, par exemple, du salaire d'un employé ou du secteur professionnel de la personne dans l'exemple ci-dessus.
- discrète : les valeurs de l'attribut existent uniquement à certains instants. C'est le cas, par exemple, de l'attribut prime d'un employé qui est un événement ponctuel.

Un attribut variable en continu a nécessairement un domaine de valeurs continu à la granularité près. Par contre, un attribut à domaine de valeurs continu peut être variable selon l'un quelconque des trois types. Le choix entre ces trois types dépend de comment change la valeur de l'attribut dans le temps : évolution continue, remplacement d'une valeur par une autre au bout d'un certain temps, valeur significative seulement à certains instants.

Tant que l'application n'a besoin que de mémoriser l'évolution de la valeur des attributs, modéliser ce type de trajectoire métaphorique ne requiert pas de nouveaux concepts. Cependant, si la description d'une trajectoire métaphorique implique des liens entre la trajectoire et d'autres objets de l'application, la trajectoire doit alors être modélisée comme un objet et non comme un attribut. En conséquence, ces trajectoires, dont la sémantique est plus riche, doivent être modélisées de manière similaire aux trajectoires spatio-temporelles (voir le paragraphe 5.3). Dans ce cas, les relations topologiques et de synchronisation fréquemment utilisées pour modéliser les trajectoires spatio-temporelles seront de simples relations thématiques.

5.2 Les trajectoires à connotation géographique naïve

Les voyages sont fréquemment décrits comme un déplacement d'un endroit à un autre, par exemple d'une ville à une autre ville: "*Je suis allée à Paris, puis à Bruxelles, puis je me suis rendue à Amsterdam et Berlin avant de revenir à Lausanne*". De façon similaire, les déplacements d'une trajectoire peuvent être définis par référence à des objets à connotation géographique de nature linéaire mais dont les coordonnées spatiales ne sont pas définies ou pas utiles pour l'application. Par exemple : "*J'ai pris le TGV de Lausanne à Paris, puis le Thalys de Paris à Bruxelles...*". Le voyage a dans ces exemples une connotation géographique forte – ce pourquoi nous qualifions ces trajectoires de géographiques – mais ils n'est pas défini en termes de coordonnées spatiales: il est défini par référence à des objets géographiques (comme dans les approches dites "Géographie Naïve" Egenhofer et al. (1995)). De fait, les trajectoires géographiques naïves sont un cas particulier de trajectoires métaphoriques. Comme ces dernières, elles peuvent être décrites en utilisant des attributs thématiques variables dans le temps (dans les exemples ci-dessus *villeVisitée* et *trainUtilisé*) ou d'une manière similaire aux trajectoires spatio-temporelles.

5.3 Les trajectoires spatio-temporelles

Une trajectoire est dite spatio-temporelle si des cordonnées spatiales – dans l'espace vu comme ayant deux ou trois dimensions – sont utilisées pour décrire la position de l'objet qui se déplace. Une trajectoire spatio-temporelle comprend deux composantes :

Une composante géo-temporelle qui décrit physiquement le déplacement de l'objet. Cette composante a été définie au paragraphe 4 ci-dessus. Elle se matérialise comme une fonction continue d'un intervalle de temps donné vers l'espace : trajectoire : $[t_{\text{début}}, t_{\text{fin}}] \rightarrow \text{espace}$. Cette fonction est implémentée de façon discrète par une suite de (point, instant) et une fonction d'interpolation (ou une suite de fonctions d'interpolation). La fonction pourrait être décrite à l'aide d'un type de données qui décrit un point mobile, comme le type de données *time-varyingPoint* de Parent et al. (2006a) ou *movingPoint* de Guting et al. (2005). Cependant nous ne suivons pas cette approche puisque nous percevons les trajectoires comme d'abord composées d'une succession de déplacements et d'arrêts. Ce sont les déplacements qui, eux, seront décrits à l'aide d'un type de données point mobile.

Une composante sémantique qui décrit les informations de la trajectoire liées à l'application telles que des annotations et des liens vers les objets décrits dans la base de données. Cette composante sémantique est analysée dans le paragraphe suivant.

5.4 La sémantique des trajectoires

Les caractéristiques sémantiques pertinentes des trajectoires varient d'une application à une autre. Cependant, on peut identifier des constantes qui peuvent faire l'objet d'une approche de modélisation générique. Ce sont ces constantes qui nous intéressent ici et qui nous conduisent à proposer un patron de modélisation.

Comme nous l'avons déjà dit, une première préoccupation consiste à définir, s'il en existe, les arrêts qui décomposent la trajectoire en une séquence de déplacements.

Les arrêts peuvent être définis directement par l'objet mobile. C'est le cas, par exemple, de la trajectoire d'un représentant de commerce qui définira lui-même quand il est en arrêt pour visiter des clients, de même qu'il définira lui-même quand il commence et termine sa tournée, c'est-à-dire une trajectoire. Par contre, d'autres applications ne peuvent pas compter sur des interactions avec l'objet mobile. Elles doivent elles-mêmes repérer et définir les segments du parcours spatio-temporel qui peuvent constituer des arrêts, ainsi que le début et la fin de chaque trajectoire. C'est le cas du suivi des cigognes. Dans ce cas, c'est la connaissance que l'on a du comportement des animaux qui permet de fixer des règles qui, lors de l'analyse de leur déplacement, vont déterminer les composants : début, fin, arrêts et déplacements. Les règles ci-dessous en sont des exemples.

- Les cigognes ne volent jamais de nuit.
- Les cigognes s'arrêtent pour manger et pour se reposer.
- Le début d'une nouvelle trajectoire est détecté en observant dans la suite des positions spatio-temporelles de l'oiseau un changement entre une période de résidence stable de l'oiseau (plusieurs mois pendant lesquels sa position nocturne reste dans une même zone) et une période de déplacement (une suite de journées où l'oiseau se déplace en s'éloignant de sa zone de résidence). Le déplacement constaté doit se diriger approximativement vers le Sud s'il a lieu en automne, vers le Nord s'il a lieu en fin d'hiver. Les paramètres exacts de ce calcul (taille de la zone de résidence, durée du séjour, durée minimale permettant de conclure à un début de

déplacement) sont à fixer en fonction des caractéristiques du comportement des cigognes.

- La fin d'une trajectoire est détectée de façon similaire mais inverse, en observant un changement entre une période de déplacement et une période de résidence stable de l'oiseau.
- Une suite de positions spatio-temporelles situées entre le début et la fin d'une trajectoire constituent un arrêt si elle satisfait les trois conditions suivantes. 1/ Les positions forment un nuage de points dont le rayon est inférieur à un certain seuil (par exemple 10 Km). 2/ L'intervalle de temps défini par l'instant de la première position et celui de la dernière position a une durée supérieure à un certain seuil (par exemple 30 minutes). 3/ Cette suite est maximale, c'est-à-dire que la position spatio-temporelle précédant la première position de la suite et celle suivant la dernière position ne satisfont pas les conditions. Pour l'arrêt ainsi défini, son point sera le centre du nuage de points et son intervalle sera formé des instants de la première à la dernière position de la suite.
- On appellera arrêt de nuit un arrêt d'une durée supérieure à 6h, ayant lieu approximativement du coucher du soleil au lever du soleil le lendemain.
- On appellera arrêt de repos tout autre arrêt.

Une autre caractéristique des trajectoires est qu'une partie, importante, de leur sémantique est traduite par des liens entre la trajectoire et les autres objets de la base de données (en particulier, les objets géographiques comme les rues, bâtiments, villes, régions, pays, lacs...). Lorsque l'objet lié est un objet spatial, doté de sa géométrie, ces liens sont habituellement porteurs de contraintes topologiques (par exemple, pour exprimer que les arrêts de la trajectoire se situent nécessairement dans une ville). Lorsque ce n'est pas le cas, le lien est une simple relation classique d'association. Certains liens sont au niveau de la trajectoire entière, d'autres sont au niveau d'une partie de trajectoire ou de ses composants. Un lien à contrainte spatiale au niveau trajectoire exprime que chaque point de la trajectoire doit satisfaire la contrainte spatiale. Par exemple, telle tournée d'un camion de livraison (c'est-à-dire telle trajectoire du camion) est tout entière incluse dans telle région. Comme exemple de lien à contrainte spatiale au niveau composant, citons de nouveau le cas des trajectoires de migration des cigognes: les ornithologues peuvent lier chacun des arrêts à l'objet géographique surfacique qui est situé à cet endroit et qui présente un intérêt du point de vue ornithologique, tel qu'un marais ou une roselière au bord d'un cours d'eau. La relation sera une relation topologique de type inclusion, ce qui signifie que le point représentant la cigogne doit être dans la surface associée à l'objet géographique. Les ornithologues peuvent aussi vouloir mémoriser quels obstacles la cigogne a survolé, par exemple une ligne à haute tension. Ils pourront le faire en reliant à l'aide d'une relation topologique chaque déplacement de la trajectoire aux objets qui décrivent les obstacles surmontés.

En plus de liens vers des objets de la base de données, la description sémantique d'une trajectoire peut conduire à associer à la trajectoire ou à ses composants des attributs et des contraintes d'intégrité, et plus généralement toute caractéristique offerte par un modèle conceptuel. Le processus qui consiste à associer une information thématique aux instances de trajectoire est généralement appelé *annotation sémantique*. Des exemples d'annotation sont: le but de la trajectoire, le moyen de locomotion, le nom du lieu où se trouve l'objet mobile à chaque instant, le type d'activité de l'objet mobile durant ses déplacements ou durant ses arrêts, les rencontres effectuées lors des arrêts, et pour les migrations d'oiseaux l'altitude et

les conditions météorologiques lors des vols. Suivant le cas, ces annotations prennent la forme de valeurs d'attribut (par exemple, pour le but de la trajectoire) ou d'instanciation d'un lien vers un objet particulier de la base de données (par exemple, pour noter le nom du lieu où se trouve un point de la trajectoire, en supposant que ce lieu est représenté comme un objet dans la base de données).

Ces annotations peuvent avoir la même valeur pour toute la trajectoire (par exemple le but de la trajectoire) ou une valeur différente pour chaque composant de la trajectoire (par exemple la vitesse moyenne par déplacement, l'activité principale pendant chaque arrêt). Ainsi, selon le cas, l'attribut sera un attribut de la trajectoire, du déplacement, ou de l'arrêt. De plus, la valeur de l'attribut peut varier tout au long de la trajectoire ou du déplacement ou de l'arrêt. Dans ce dernier cas l'attribut sera variable dans le temps. Par exemple pour les cigognes, la valeur de l'attribut altitude varie pendant chaque déplacement. Quand il y a plusieurs annotations variables dans le temps, il faut déterminer quelles sont les règles d'échantillonnage utilisées par l'application. Si plusieurs annotations variables sont mesurées aux mêmes instants, alors elles seront décrites par un seul attribut complexe qui regroupera ces différentes valeurs et qui sera variable dans le temps. Il y aura ainsi une seule et même suite de points d'échantillon pour toutes les valeurs. Par contre si chaque annotation variable est mesurée selon une séquence d'instantanés qui est indépendante de la séquence des autres, alors chaque annotation sera décrite par un attribut simple variable dans le temps.

Des contraintes d'intégrité thématique, spatiale et temporelle peuvent aussi être associées aux trajectoires. Par exemple, un avion ne peut pas voler s'il n'y a pas une équipe de pilotes et d'hôtesse, les cigognes ne volent pas durant la nuit, les arrêts des représentants doivent inclure au moins un rendez-vous avec un client, un nombre limité d'arrêts est autorisé, ou encore la distance ou la durée entre deux arrêts ne doit pas être inférieure ou supérieure à un certain seuil. Très fréquemment les trajectoires des humains sont contraintes de suivre un réseau spécifique, par exemple les voitures et les camions ne peuvent se déplacer que sur le réseau routier. Une trajectoire contrainte par un réseau doit respecter deux types de contraintes : une contrainte topologique d'inclusion (le point mobile doit toujours être dans la géométrie du réseau), et les contraintes associées aux noeuds du réseau. En effet, le réseau routier décrit non seulement les voies, mais aussi les intersections avec les changements de direction autorisés (tourner à droite ou à gauche, faire demi-tour...). La position des objets qui se déplacent dans un réseau peut être décrite par rapport à la géométrie du réseau : chaque point mobile est alors défini par l'identifiant de la voie et sa position relative sur cette voie (par exemple au 12^{ème} km), Güting et al. (2006).

Un type particulier de trajectoire contrainte est celui des trajectoires fixes et récurrentes, comme celle des trains, métros et bus, qui font toujours le même trajet avec les mêmes arrêts, avec des horaires prédéfinis. D'autres trajectoires ont des contraintes spatiales ou temporelles particulières, qui doivent être calculées dynamiquement. C'est le cas, par exemple, des trajectoires des oiseaux migrateurs qui font du vol plané grâce aux thermiques, qui ne peuvent pas traverser de grandes étendues d'eaux (les cigognes contournent la Méditerranée) ou s'effectuer de nuit à cause de l'absence de thermiques.

Les applications peuvent aussi souhaiter conserver des caractéristiques dérivées du mouvement, comme la direction, la vitesse, l'accélération (instantanée ou moyenne). Les informations de ce type sont calculables à partir de la fonction qui définit la trajectoire ou de la séquence de points d'échantillon et sont généralement obtenues en appelant des méthodes du type de données point mobile.

Enfin, les applications doivent avoir la possibilité de spécifier plusieurs représentations de la même trajectoire selon le point de vue, la résolution et les objectifs de l'application. Tous les composants et toutes les informations sémantiques de la trajectoire peuvent avoir plusieurs représentations. Par exemple, si on considère la trajectoire d'une cigogne, une application aura besoin de différencier les différents types d'arrêts le long de la trajectoire (de repos, de nuit, etc...) et décrira chaque type avec des informations spécifiques. Une autre application aura simplement besoin de savoir que l'oiseau s'est arrêté et à tel endroit pendant tant de temps, sans s'intéresser à d'autres informations relatives à cet arrêt. Enfin, une troisième application ne prendra en compte que les longs arrêts de repos et ignorera les arrêts qui ne durent qu'une nuit. Un mécanisme qui permet cette représentation multiple pour les objets spatio-temporels a été présenté dans MADS, Parent et al. (2006b).

En résumé, une trajectoire est composée d'un début, d'une fin, de déplacements et d'arrêts. Un modèle conceptuel pour trajectoires doit permettre la définition de trajectoires et de leurs composants avec des attributs, des liens vers les objets de la base de données, des contraintes thématiques, spatiales et temporelles. Chaque élément a une géométrie, qui est ponctuelle pour le début, la fin et les arrêts, et qui est linéaire pour les déplacements. Chaque élément a une extension temporelle qui est un instant pour le début et la fin, et un intervalle de temps pour les arrêts et les déplacements. Ces derniers peuvent donc être annotés avec des attributs variables ou non dans le temps.

6 Modélisation des trajectoires

Certains modèles conceptuels pour bases de données incluent la description des aspects spatiaux et temporels, par exemple Parent et al. (2006a), Tryfona et al. (2003), Bédard et al. (2004). Ces modèles permettent de décrire des objets en mouvement et répondent donc en partie aux besoins de modélisation des trajectoires : la description de la composante géo-temporelle. Mais ils n'offrent pas de constructeurs spécifiques aux trajectoires; les notions de trajectoire, de début, de fin, d'arrêt et de déplacement ne font pas partie du modèle et seront donc ignorés du SGBD sur lequel la base de données sera implantée. Ces notions restent alors du domaine exclusif des utilisateurs et des programmes d'application. Nous avons donc étudié différentes solutions pour compléter les services offerts par les SGBD spatio-temporels, et en avons développé deux. La première est basée sur la définition d'un patron de modélisation, la seconde sur celle de nouveaux types de données. Dans cet article, nous présentons la première solution, la seconde est décrite dans Spaccapietra et al. (2008).

Le concept de patron de modélisation – de l'anglais "design pattern" Gamma et al. (1995) – vient du génie logiciel. Appliqué aux bases de données, il dénote un schéma prédéfini qui décrit une solution simple à un problème de modélisation récurrent. Il peut être utilisé par le concepteur de bases de données dans l'étape de modélisation. Le patron est en effet prévu pour être facilement intégré dans un schéma de bases de données. Notre patron de modélisation pour trajectoires vise à représenter explicitement les trajectoires et leurs composants, début, fin, arrêts et déplacements. Cette solution utilise un modèle conceptuel spatio-temporel sans le modifier, ce qui permet de l'implémenter facilement sur tout SGBD qui offre un support pour le spatial (par exemple Oracle, DB2 ou SQL Server) ou sur un système d'information géographique. Cette solution réifie les composants des trajectoires : le début, la fin, les arrêts et les déplacements sont représentés par des objets. Cette réification a pour but de satisfaire un des besoins vus aux paragraphes précédents : le début, la fin, les

arrêts et les déplacements doivent pouvoir être reliés à des objets de la base de données. Pour cela, ils doivent être représentés eux aussi comme des objets. En effet, les modèles de données permettent de relier entre eux des éléments de premier rang (les entités en entité-relation, les objets en orienté-objets, les tables en relationnel), mais pas les attributs. Cette solution a l'avantage de donner des schémas clairs, lisibles et qui permettent facilement de compléter la description des trajectoires avec l'information sémantique spécifique à l'application. De plus, ces schémas peuvent évoluer facilement.

Le paragraphe 6.1 décrit dans ses grandes lignes le modèle conceptuel spatio-temporel, MADS, dans lequel est décrit le patron pour trajectoires. Le patron est présenté en détail au paragraphe 6.2, et un exemple de schéma utilisant le patron est décrit au paragraphe 6.3.

6.1 Le modèle conceptuel spatio-temporel MADS

Le modèle MADS est un modèle de données de type entité-relation étendu au spatial, au temporel et à la multi-représentation (possibilité d'avoir plusieurs représentations différentes pour une même information). Pour la dimension thématique, on notera simplement que MADS permet de décrire des attributs simples et des attributs complexes (composés d'autres attributs), des attributs monovalués (qui prennent une valeur) et des attributs multivalués (qui peuvent prendre plusieurs valeurs).

Pour la dimension spatiale, MADS offre un jeu de types de données spatiales, organisé en une hiérarchie. Les types les plus courants sont *Point*, *Line*, *Surface*, et le type générique *Geo* qui contient toutes les valeurs spatiales qu'elles soient simples ou complexes. De même il y a une hiérarchie de types de données temporels dont *Time* est la racine et *Instant*, *TimeInterval*, *InstantSet* sont les plus courants. En MADS, les types d'objet, tout comme les types de relation, peuvent être spatiaux et/ou temporels. Un type d'objet (ou de relation) spatial possède un attribut particulier, appelé *geometry*, qui décrit son emprise spatiale et dont le domaine de valeurs est l'un des types spatiaux. Un type d'objet (ou de relation) temporel possède un attribut particulier, appelé *lifecycle*, qui décrit sa durée de vie et les états par lesquels il passe au cours de sa vie : actif, suspendu, invalidé. Certains types de relations contraignent les objets qu'ils lient. Ce sont d'une part les relations topologiques qui relient deux objets spatiaux et contraignent leurs attributs *geometry* à satisfaire un prédicat topologique, par exemple adjacence, intersection ou inclusion, et d'autre part les relations de synchronisation qui relient deux objets temporels et contraignent leurs attributs *lifecycle* à satisfaire un prédicat temporel, par exemple l'un doit succéder à l'autre. Les attributs, quelles que soient leurs caractéristiques, peuvent varier dans le temps et/ou dans l'espace. Dans ce cas, leur valeur est définie au niveau conceptuel par une fonction qui associe à chaque instant et/ou chaque point un élément du domaine de définition de l'attribut. Si l'attribut est spatial (c'est-à-dire qu'il a pour domaine un des types de données spatiales) et variable dans le temps, alors cet attribut décrit un déplacement et/ou une déformation. Par exemple, un attribut de domaine *Point* et variable dans le temps a pour valeur un point mobile. Il existe trois catégories d'attribut variable : attribut variable en continu, par paliers ou attribut variable discret. Chacune correspond à une façon de varier des phénomènes décrits. Par exemple, la température varie de façon continue, le salaire d'un employé varie par paliers. Selon la catégorie d'attribut variable, les valeurs sont relevées de façon différente. Les valeurs d'un attribut variable en continu ou discret sont fournies sous la forme d'une suite de couples (valeur-instantanée, instant), et celles d'un attribut variable par paliers sous la forme d'une suite de couples (valeur-instantanée, intervalle-de-temps).

Le lecteur qui voudrait avoir plus de détails sur le modèle de données MADS est invité à consulter Parent et al. (2006a).

6.2 Patron de conception pour les trajectoires

Comme nous l'avons vu, un patron de conception pour les trajectoires doit comprendre un type d'objet pour représenter chacun des concepts : trajectoire, début, fin, arrêt, et déplacement. La figure 2 représente le patron de conception que nous proposons. Dans ce patron, le type d'objet *Noeud* regroupe le début, la fin et les arrêts des trajectoires dans le même type parce qu'ils ont des caractéristiques similaires². Le type d'objet *Noeud* possède un cycle de vie, qui est un intervalle de temps simple, et une géométrie, qui est un point. Un type de relation *EstComposéDe* relie les trajectoires à leurs noeuds. Ses cardinalités contraignent chaque noeud à appartenir à une trajectoire unique, et chaque trajectoire à posséder au moins un noeud. Le type d'objet *Déplacement* possède un cycle de vie qui est un intervalle de temps simple et une géométrie qui est un point variable dans le temps. Le cycle de vie des objets *Trajectoire* est un intervalle de temps qui est dérivé des cycles de vie de la première et de la dernière instances de *Noeud* qui lui sont liées (c'est-à-dire les instants de son début et de sa fin).

Les deux types d'objet *Noeud* et *Déplacement* sont reliés par deux types de relation, *De* et *Vers*, représentant le fait que chaque déplacement commence et finit par un arrêt. Ces deux relations sont à la fois topologiques et de synchronisation (à contrainte de type adjacence temporelle avant/après). Les deux contraignent chaque déplacement à être lié à des arrêts qui leur sont adjacents dans l'espace et dans le temps. Dans les modèles de données spatio-temporels, la sémantique des relations spatiales qui contraignent les géométries de deux objets doit être étendue au cas où l'un des deux objets (voire les deux) bouge ou se déforme. À cette fin en MADS, les relations topologiques qui lient des objets qui bougent ont été étendues en demandant au concepteur de définir la portée temporelle de la contrainte : la contrainte doit être satisfaite soit au moins pendant un instant, soit pendant toute la durée de vie de l'objet, ce qui dans notre cas revient à toute la durée de la trajectoire ou toute celle d'un arrêt ou d'un déplacement. Par exemple, le fait qu'une cigogne passe au-dessus d'une ligne à haute tension pendant un certain déplacement, sera représenté en deux dimensions par une relation topologique d'inclusion du point mobile (la cigogne) dans la ligne (haute tension) pendant au moins un instant du déplacement. Dans le patron de la figure 2, la contrainte topologique de la relation *De* (*Vers*), qui lie un déplacement à son noeud de départ (fin), est une contrainte d'égalité qui doit être satisfaite au premier (dernier) instant du déplacement.

² D'autres variantes du patron peuvent être définies, par exemple en représentant chaque type de noeud, début, fin et arrêt, par un type d'objet différent.

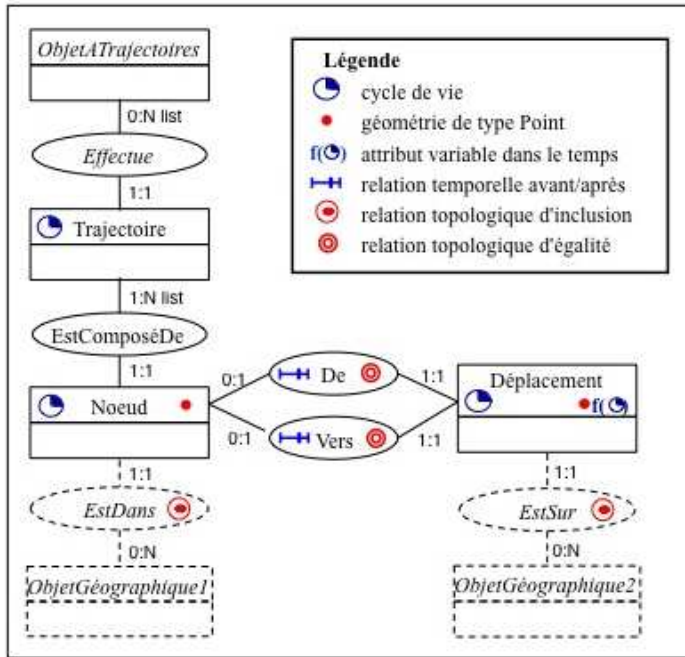


FIG. 2 – Un patron de modélisation de trajectoires

En plus de la description de la structure interne de la trajectoire, le patron inclut des relations-crochets qui seront utilisées par le concepteur pour relier la trajectoire aux objets de l'application. Dans la figure 2, les noms des crochets sont écrits en italiques. Le type d'objet *Trajectoire* est relié à un type d'objet-crochet *ObjetATrajectoires* qui représente l'objet du monde réel qui effectue les trajectoires. Début, fin et arrêt (*Noeud*) peuvent être reliés à des types d'objets spatiaux qui sont représentés par le type d'objet-crochet spatial générique, *ObjetGéographique1*. La relation *EstDans* impose une contrainte topologique d'inclusion : le noeud doit être situé dans l'objet géographique. Comme ce crochet est optionnel, il est dessiné en pointillés. De façon similaire, les déplacements peuvent être reliés à un type d'objet-crochet spatial *ObjetGéographique2* par une autre relation topologique d'inclusion, *EstSur*. Cette dernière peut être utilisée pour modéliser les trajectoires contraintes par un réseau.

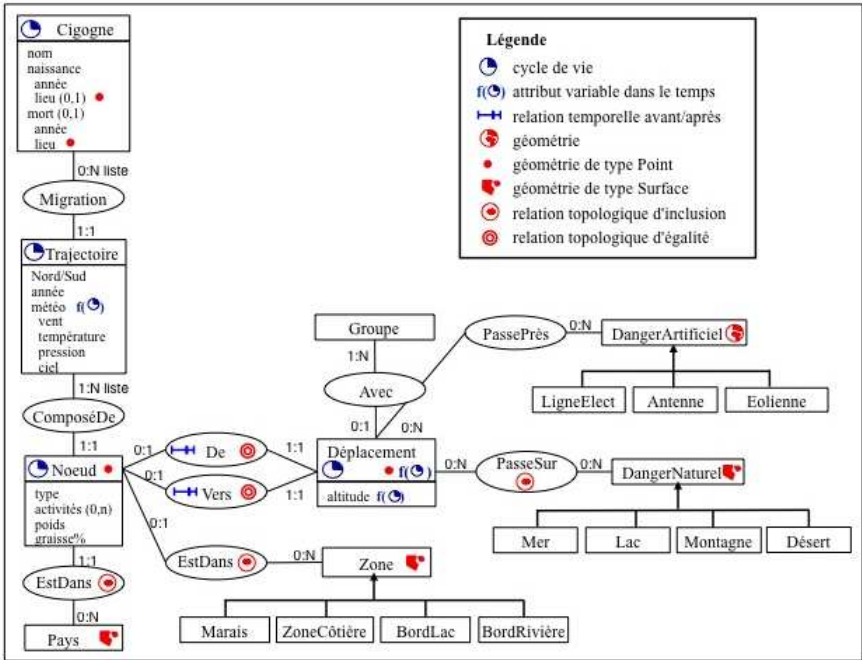


FIG. 3 – Le patron de trajectoires utilisé pour l'application des Cigognes

6.3 Un exemple d'emploi du patron de trajectoires

Quand un patron est utilisé, les concepteurs doivent l'adapter à leur application. Ils peuvent, par exemple, supprimer des éléments sans intérêt pour l'application, ajouter de nouveaux éléments répondant à des besoins supplémentaires ou modifier la structure du patron pour l'adapter à leurs besoins. Par exemple, des types d'objet *Début*, *Fin* et *Arrêt* peuvent être ajoutés comme sous-types de *Noeud*. Afin de connecter le patron au reste du schéma, les concepteurs doivent remplacer les types d'objet-crochet par des types d'objet de l'application ou rajouter d'autres relations-crochets spécifiques à l'application.

La figure 3 montre un exemple d'utilisation du patron de trajectoires pour l'application de migration des cigognes. Les concepteurs ont personnalisé le patron de la façon suivante. Le type d'objet-crochet *ObjetATrajectoires* a été mis en correspondance avec le type d'objet *Cigogne*. Le type d'objet-crochet *ObjetGéographique1* et sa relation ont été dédoublés et sont devenus *Pays* et *Zone* (ce dernier avec sa hiérarchie de sous-types). *Zone* et ses sous-types décrivent les zones d'intérêt pour les oiseaux. De la même façon, le type d'objet-crochet *ObjetGéographique2* et sa relation ont été dédoublés. La relation *PasseSur*, qui décrit le fait que l'oiseau est passé au-dessus d'une zone dangereuse pour lui, est une relation topologique de type inclusion pour un instant au moins : Pour qu'une instance de *Déplacement* puisse être liée à une instance de *DangerNaturel* le point mobile du déplacement doit être au moins un instant dans la zone du danger naturel. Quant à la relation *PassePrès* son type a été modifié.

C'est une relation métrique qui contraint la distance entre les objets liés. Un nouveau lien, non spatial, *Avec*, a été ajouté au type d'objet *Déplacement*; il décrit le groupe - s'il est connu - avec lequel l'oiseau a fait ce vol (ce déplacement).

Finalement, des attributs spécifiques à l'application ont été ajoutés aux types d'objets du patron. Par exemple, la direction (*Nord/Sud*), l'année de la trajectoire, la météo durant la trajectoire ont été ajoutés à *Trajectoire*; l'altitude est enregistrée le long des déplacements; pour chaque arrêt où l'oiseau a été observé, le type de l'arrêt, les activités de l'oiseau, son poids et son pourcentage de graisse sont enregistrés. Les attributs *météo* et *altitude* sont des attributs variables dans le temps, c'est-à-dire que l'historique de la météo est enregistré durant la totalité de la trajectoire et l'historique de l'altitude de l'oiseau est enregistré durant chaque déplacement. En pratique, la fonction spécifiant un attribut continu variable dans le temps est définie par une liste de couples (valeur, instant), appelées valeurs d'échantillon (ou points d'échantillon dans le cas de points variables dans le temps) et par des fonctions d'interpolation entre les points de l'échantillon. Quand un objet comporte plusieurs attributs variables dans le temps, a priori leurs fonctions sont indépendantes, c'est-à-dire que leurs valeurs d'échantillon sont définies pour différents instants. Cependant, si les valeurs de plusieurs attributs variables sont toujours enregistrées en même temps, ces attributs sont temporellement liés. Et cela doit être explicitement spécifié par une contrainte d'intégrité ou en regroupant les attributs dans un attribut complexe qui sera, lui, variable dans le temps. Par exemple, dans la figure 3, *météo* est un attribut complexe variable dans le temps dont les valeurs d'échantillon possèdent le format suivant: (*instant, vent, température, pression, ciel*).

D'un autre côté, le type d'objet *Déplacement* possède deux attributs variables dans le temps, *geometry* et *altitude* qui ne peuvent pas être regroupés dans un attribut complexe parce que *geometry* est un attribut prédéfini par le modèle de données MADs. Une contrainte d'intégrité est donc nécessaire afin d'exprimer la contrainte suivante : "Les listes de points d'échantillon des attributs *geometry* et *altitude* sont basées sur la même liste d'instants".

Enfin, afin de faciliter l'accès à l'information pour les utilisateurs, les concepteurs peuvent choisir de stocker de l'information redondante et de gérer la cohérence de cette redondance via des contraintes d'intégrité. Par exemple, l'attribut *naissance.année* du type d'objet *Cigogne* est défini comme dérivé de l'instant de début du cycle de vie de l'objet et l'attribut *Nord/Sud* de *Trajectoire* comme dérivé des positions spatiales du début et de la fin de la trajectoire (c'est-à-dire les positions des premier et dernier objets *Næud*).

7 Implémentation de l'approche

Afin de valider nos approches de modélisation des trajectoires, nous sommes en train de recueillir les descriptions et les données de plusieurs applications portant sur des trajectoires. Nous modélisons les bases de données des applications, puis les implémentons sur un SGBD relationnel étendu au spatial (Oracle 10). Nous utilisons ces bases de données de plusieurs façons : pour répondre à des requêtes ponctuelles de type classique (SQL), pour faire de la fouille des trajectoires à l'aide de programmes spécifiques, et enfin nous montons un entrepôt spécialisé pour les trajectoires.

Dans ce paragraphe, nous présentons pour l'application des cigognes le schéma relationnel de la base de données qui correspond au schéma conceptuel de la figure 3 et, à titre d'exemples, quelques requêtes SQL. Le schéma relationnel (voir la figure 4) a été obtenu

en suivant les règles classiques de traduction d'un schéma entité-relation vers un schéma relationnel. Une particularité est la traduction des attributs variables dans le temps dont la valeur est basée sur une liste de valeurs associées à leur temps de validité. Selon que l'attribut varie de façon continue, discrète ou par paliers, le temps de validité est noté soit par un instant (cas des attributs continus et discrets), soit par un intervalle de temps (cas des attributs par paliers). Dans tous les cas, un attribut variable est implémenté en relationnel par une table qui lui est propre et qui contient trois attributs : la valeur instantanée, l'instant ou l'intervalle de validité, et une clé étrangère référençant l'objet propriétaire de l'attribut. Ainsi, les attributs variables en continu, *altitude* et *geometry*, qui appartiennent au type d'objet *Déplacement*, génèrent chacun une table relationnelle, *DpltAltitude* et *DpltPoint*. De même l'attribut variable en continu *météo* du type d'objet *Trajectoire*, qui est un attribut complexe regroupant les attributs *vent*, *température*, *pression* et *ciel*, génère la table relationnelle *TrajMeteo*.

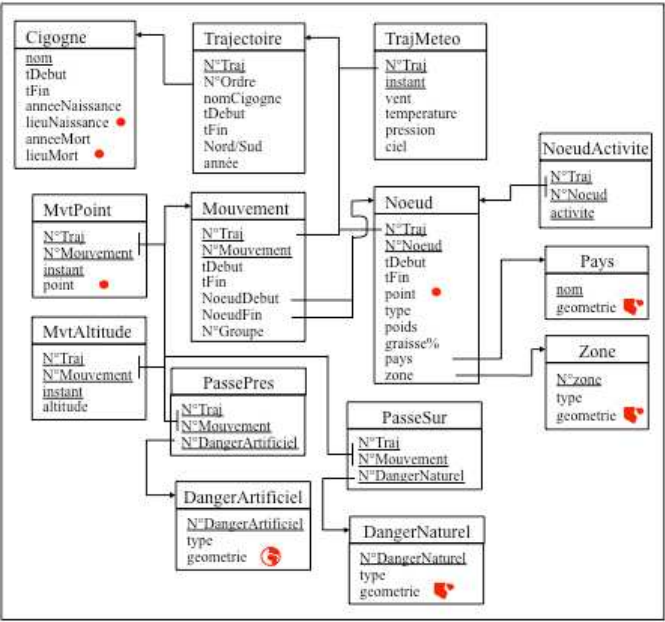


FIG. 4 – Schéma relationnel correspondant à la figure 3

Une autre spécificité des schémas MADs est la présence de types de relation topologique ou de synchronisation temporelle qui contraignent les géométries ou les cycles de vie des objets liés. Ces types de relation à contraintes sont traduits de la même façon que des relations classiques, mais avec en plus un trigger qui vérifie lors des insertions et des mises à jour des objets liés que leurs géométries ou leurs cycles de vie satisfont bien la contrainte. Par exemple, le type de relation topologique *EstDans*, qui lie *Noeud* à *Pays* dans la figure 3, est traduit, dans la table *Noeud* de la figure 5, par une clé étrangère, *pays*, et par un trigger. Ce trigger vérifie chaque fois qu'un tuple est inséré ou modifié dans *Noeud* que la valeur

spatiale de son attribut *point* est bien incluse dans la valeur spatiale de l'attribut *géométrie* du tuple de *Pays* qui est référencé par la clé étrangère *pays*. De même, le type de relation *De*, qui lie *Noeud* et *Déplacement* dans la figure 3, est implémenté par la clé étrangère *NoeudDebut* dans la table *Déplacement* et par deux triggers. Le premier assure la contrainte d'adjacence temporelle : pour chaque tuple de *Déplacement*, *tDebut* doit être l'instant suivant le *tFin* du tuple de *Nœud* référencé par *NoeudDebut*. Le second trigger vérifie la contrainte d'égalité topologique pour un instant pour un point mobile (le point de *Déplacement* se déplace) : le premier point de *DpltPoint* qui référence ce tuple de *Déplacement* doit être identique au point du tuple de *Nœud* référencé par *NœudDébut*.

À titre d'exemple, nous donnons deux requêtes SQL qui peuvent être posées à la base de données. La requête "Combien de fois la cigogne Max s'est-elle arrêtée durant chacune de ses trajectoires ?" peut être exprimée comme suit :

```
SELECT t.N°Traj, t.Debut, COUNT(n.N°Noeud)
FROM Trajectoire AS t, Noeud AS n
WHERE t.N°Traj=n.N°Traj AND t.nomCigogne="Max"
GROUP BY t.N°Traj, t.Debut
```

Quant à la requête : "Quelles activités a eu la cigogne pendant chaque arrêt de la trajectoire 133 ?", elle s'écrit très simplement :

```
SELECT N°Noeud, activité
FROM NoeudActivité
WHERE N°Traj=133
```

8 Conclusion

Dans les applications qui s'intéressent à des objets mobiles, une connaissance approfondie des trajectoires spatio-temporelles de ces objets est très souvent indispensable à la réalisation des objectifs de l'application. Par exemple, l'optimisation d'un réseau de transport demande que l'on recueille les données sur les déplacements de la population concernée et que l'on modélise ces déplacements. Le plus souvent la connaissance recherchée ne se limite pas au tracé spatio-temporel des déplacements. Elle peut inclure d'autres informations, par exemple le moyen de transport utilisé, la classe d'âge de la personne ou sa capacité de mouvement (invalides, handicapés), ou encore des informations sur les lieux visités. La description des informations pertinentes relatives à une trajectoire peut donc conduire à des constructions complexes qui combinent des caractéristiques relatives au mouvement brut (où est l'objet et quand) avec une variété d'annotations sémantiques décrivant les connaissances spécifiques nécessaires à chaque application.

La contribution de cet article est essentiellement de définir précisément ce concept de trajectoire et d'en donner une caractérisation qui, tout en s'appuyant sur une étude des besoins, est indépendante de toute application particulière. En particulier, nous proposons de structurer les trajectoires grâce aux concepts complémentaires d'arrêt et de déplacement, ce qui permet d'enrichir le contenu sémantique d'une trajectoire. Ensuite, l'article propose une approche de modélisation des trajectoires à l'aide d'un patron de conception (design pattern), autrement dit une construction standard (ici exprimée dans les termes d'un modèle entité-relation) que les concepteurs peuvent réutiliser quelle que soit la nature de leur application.

L'article détaille les composantes du patron proposé et la manière de l'intégrer dans le schéma de la base de données de l'application. Enfin, l'implémentation du patron sur un SGBD relationnel-objet est montrée.

À notre connaissance, ce travail est le premier à proposer une approche conceptuelle pour modéliser la sémantique des objets mobiles. Il ajoute ainsi une couche sémantique par rapport aux approches habituelles de modélisation qui représentent uniquement les déplacements bruts des objets mobiles.

Le travail présenté peut être étendu dans plusieurs directions. Par exemple, il conviendrait d'explorer les contraintes particulières des trajectoires liées à un réseau (par exemple, les voitures circulant sur un réseau routier) afin de déterminer l'influence de ces contraintes en termes de modélisation. Dans le cadre du projet GeoPKDD (<http://geopkdd.it>) nous explorons une stratégie similaire de modélisation pour un entrepôt de trajectoires, première étape pour réaliser des fouilles de données destinées à extraire des trajectoires des connaissances plus synthétiques pour les décideurs du domaine étudié (voir, par exemple, Alvarez et al. 2007 et Giannotti et Nanni 2006).

Le travail pour le développement d'un entrepôt de trajectoires doit notamment conduire à la spécification d'opérateurs d'agrégation de trajectoires (voir Braz et al. 2007). Différents types d'agrégation sont possibles et peuvent être réalisés à différents niveaux en distinguant par exemple les opérateurs appliqués aux composants d'une trajectoire des opérateurs appliqués sur la trajectoire entière. Un exemple d'opération sur les composants est l'agrégation qui remplace un ensemble d'arrêts dans une région par un arrêt unique représentant l'intégralité du temps passé dans cette région. Un exemple d'opération réalisée sur la trajectoire entière est l'agrégation qui remplace un ensemble de trajectoires par la trajectoire moyenne calculée à partir de l'ensemble.

Références

- V.T. de Almeida, R.H. Güting, and T. Behr (2006). Querying Moving Objects in SECONDO. *Proc. of the 7th International Conference on Mobile Data Management (MDM 2006)*, Nara, Japan, 47-51.
- S. Balley, C. Parent, S. Spaccapietra (2004). Modeling geographic data with multiple representations. *IJGIS, International Journal on GIS*, 18(4): 327-352. Taylor & Francis.
- Y. Bédard, S. Larrivée, M-J. Proulx, M. Nadeau (2004). Modeling geospatial databases with Plug-Ins for visual languages: a pragmatic approach and the impacts of 16 years of research and experimentations on Perceptory. In: *Conceptual Modeling for Advanced Applications Domains*, LNCS Vol. 3289, 17-30. Springer.
- T. Behr, V.T. de Almeida, R.H. Güting (2006). Representation of Periodic Moving Objects in Databases. *Proc. of the 14th ACM International Symposium on Advances in Geographical Information Systems (ACM GIS 2006)*, Arlington, Virginia, USA, 43-50.
- S. Brakatsoulas, D. Pfoser, N. Tryfona (2004). Modeling, Storing and Mining Moving Object Databases. *Proc. of the IEEE International Database Engineering and Applications Symposium (IDEAS'04)*, 68-77.

- F. Braz, S. Orlando, R. Orsini, A. Raffaeta, A. Roncato, C. Silvestri (2007). Approximate aggregations in trajectory data warehouses. *Proc. of the Workshop on Spatio-temporal Data Mining (STDM'07)* in conjunction with ICDE'07, Istanbul, Turkey, 536-545.
- E. Camossi, M. Bertolotto, E. Bertino, G. Guerrini (2003). A Multigranular Spatiotemporal Data Model. *Proc. of 11th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS 2003)*, New Orleans, Louisiana, USA, 94-101.
- V. P. Chakka, A. Everspaugh, J. M. Patel (2003). Indexing Large Trajectory Data Sets With SETI. *Proc. of the First Biennial Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR)*, Asilomar, CA, USA.
- M. Egenhofer, D. Mark (1995). Naive geography. In: *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS*, A. Frank, W. Kuhn (Eds.), LNCS Vol. 988, 1-15, Springer.
- A. Friis-Christensen, C. Jensen, J. Nytn, D. Skogan (2005). A Conceptual Schema Language for the Management of Multiple Representations of Geographic Entities. *Transactions in GIS*, 9(3): 345-380. Blackwell Publishing.
- E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides (1995). *Design Patterns: Elements of Reusable ObjectOriented Software*. Addison-Wesley Professional, 1995.
- F. Giannotti, M. Nanni, D. Pedreschi (2006). Efficient mining of temporally annotated sequences. *Proc. of SIAM Data Mining Conference (SDM06)*, Bethesda, Maryland, USA.
- R.H. Güting, M.H. Bohlen, M. Erwig, C.S. Jensen, N.A. Lorentzos, M. Schneider, M. Vazirgiannis (2000). A Foundation for Representing and Querying Moving Objects. *ACM Transactions on Database Systems*, 25(1):1-42.
- R.H. Güting, T. Behr, V.T. de Almeida, Z. Ding, F. Hoffmann, and M. Spiekermann (2004). *SECONDO: An Extensible DBMS – Architecture and Prototype*. Fernuniversität Hagen, Informatik Report 313.
- R. H. Güting and Markus Schneider (2005). *Moving Object Databases*. Morgan Kaufmann Publishers, 2005.
- R.H. Güting, V.T. de Almeida, and Z. Ding (2006). Modeling and Querying Moving Objects in Networks. *VLDB Journal* ,15(2): 165-190.
- K. Hornsby, M. Egenhofer (2002). Modeling Moving Objects over Multiple Granularities. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 36(1-2): 177 – 194.
- V. Khatri, S. Ram, R. Snodgrass (2004). Augmenting a conceptual model with geospatiotemporal annotations. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 16(11): 1324–1338.
- M.P Kwan and J. Lee (2003). Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3D GIS: A Time-Geographic Approach. In: *Spatially Integrated Social Science*, Michael F. Goodchild and Donald G. Janelle (Eds). 48-66. Oxford University Press.
- P. Laube, S. Imfeld, R. Weibel (2005). Discovering relative motion patterns in groups of moving point objects. *International Journal of Geographic Information Science*, 19(6): 639-668. Taylor & Francis.

- D. Mark, M. Egenhofer, L. Bian, P. Rogerson, J. Vena (1999). Spatio-temporal GIS Analysis for Environmental Health. *Proc. of the 2nd International Workshop on Geography and Medicine (GEOMED'99)*, Paris, France.
- V. Noyon, T. Devogele, C. Claramunt (2005). A Formal Model for Representing Point Trajectories in Two-Dimensional Spaces. *Proc. of the Workshop on Conceptual Modelling and GIS (COMOGIS'05)*, LNCS Vol. 3770, 208-217. Springer.
- Oracle database 10g (2007). <http://www.oracle.com/database/index.html>, April 2007.
- C. Parent, S. Spaccapietra, E. Zimanyi (2006a). *Conceptual Modeling for Traditional and Spatio-Temporal Applications – The MADS Approach*. Springer, 2006.
- C. Parent, S. Spaccapietra, E. Zimanyi (2006b). The MurMur project: Modeling and querying multi-representation spatio-temporal databases. *Information Systems*, 31(8):733–769, Elsevier.
- M. Pelanis, S. Simonas, C.S. Jensen (2006). Indexing the Past, Present and Anticipated Future Positions of Moving Objects. *ACM Transactions on Database Systems*, 31(1):255-298.
- N. Pelekis, Y. Theodoridis, S. Vosinakis, T. Panayiotopoulos (2006). Hermes - a framework for location-based data management. In: *Advances in Database Technology (EDBT 2006)*, LNCS Vol. 3896, 1130–1134. Springer.
- N. Pelekis, B. Theodoulidis (2002). *TAU TLL Data Cartridge*. Technical Report TR-02-3, CRIM, UMIST, Manchester, UK.
- S. Spaccapietra, C. Parent, M.L. Damiani, J.A. de Macedo, F. Porto, C. Vangenot (2008). A Conceptual View on Trajectories. *Knowledge and Data Engineering*, 65(1):126-146. Elsevier.
- L. Speicys, C.S. Jensen, A. Kligys (2003). Computational data modeling for network-constrained moving objects. *Proc. of the 11th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS 2003)*, New Orleans, Louisiana, USA, 118-125.
- M. Theriault, C. Claramunt, A. Seguin, P. Villeneuve (2002). Temporal GIS and Statistical Modeling of Personal lifelines. In: *Advances in Spatial Data Handling*, D. Richardson & P. van Oosterom (eds.), 433-449. Springer.
- N. Tryfona, R. Price, C. Price (2003). Conceptual Models for Spatio-temporal Applications. In: *Spatio-Temporal Databases – The CHOROCHRONOS Approach*, M. Kubarakis et al. (Eds.), LNCS Vol. 2520, 79-116. Springer.
- O. Wolfson, B. Xu, S. Chamberlain, L. Jiang (1998). Moving objects databases: Issues and solutions. *Proc. of the 10th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDBM'98)*, Washington, DC, USA, 111–122.
- O. Wolfson, A.P. Sistla, S. Chamberlain, Y. Yesha (1999). Updating and Querying Databases that Track Mobile Units. *Special issue of the Distributed and Parallel Databases Journal on Mobile Data Management and Applications*. 7(3) , 257-288, Kluwer Academic Publishers.

Summary

An intelligent perception of movement of mobile objects (people, cars, parcels, etc.) is a premise to many applications in different domains (e.g., control of worldwide parcel distribution, traffic management, fauna monitoring). Current database management systems (DBMS) do not provide the concepts and functions needed to support a semantic analysis of movement. At best they support the recoding and querying of spatial extents, with no explicitly attached temporal reference. Previous research introduced and developed the concept of mobile objects as objects whose spatio-temporal location is defined by a function from time to space. This paper reaches beyond object's location to focus on the concept of trajectory as the semantic unit of movement that underlines the application view of mobility. We propose a trajectory description approach at the conceptual level that covers the geometric, temporal and semantic aspects of trajectories, as well as their structural components: departure point, arrival point, and intermediate stops and moves. Each element, trajectory, stop, move and part of move, can be semantically annotated either via attribute values or links to objects in the application database. The proposed modeling approach relies on the use of a design pattern as an easy way to capture both trajectories' standard features and application specific features. Finally, the paper discusses how conceptual trajectories can be implemented using object-relational DBMS.

