
ESPACE ET TEMPS : Un nouveau domaine en Sciences Cognitives ?

Gérard LIGOZAT

Professeur, Université Paris-Sud
LIMSI - Groupe Langage et Cognition
B.P. 133, 91403 ORSAY Cedex, France

NOUVEAU, VRAIMENT ?

Un nouveau domaine ? Voilà bien longtemps que la réflexion sur le temps et l'espace occupe la philosophie, les mathématiques, la physique, et bien d'autres disciplines. Alors où est la nouveauté ?

La nouveauté, c'est une convergence somme toute récente de travaux et de recherches pluridisciplinaires autour de la représentation des connaissances sur l'espace et du temps, et des raisonnements qu'elles permettent :

— En psychologie, on s'intéresse à la façon dont les sujets perçoivent l'espace et le temps, et à la façon dont les représentations qu'ils en font sont utilisées dans des tâches telles que la recherche de chemins, la communication, le déplacement.

— La biologie explore les bases biologiques des représentations spatio-temporelles.

— La linguistique tente de comprendre et d'expliquer comment les langues représentent le temps et l'espace, tandis que le développement de systèmes de traitement automatique de la langue implique une modélisation informatique de ces processus.

— La logique a développé des outils formels pour raisonner sur le temps (les logiques temporelles), et le développement de logiques spatiales est à l'ordre du jour.

— L'intelligence artificielle essaie de modéliser et de reproduire divers comportements faisant appel à des connaissances sur l'espace et le temps, et applique ses résultats dans l'interaction homme-machine, la robotique, et divers domaines où apparaît une composante spatio-temporelle.

— Plus récemment, la géographie a commencé à s'intéresser à l'explicitation de l'usage qu'elle fait elle-même de notions spatiales et temporelles, à l'occasion en particulier de l'apparition de systèmes d'information géographique plus puissants et plus tournés vers les besoins de l'utilisateur.

Notre intention n'est pas ici de décrire l'ensemble de ces évolutions, et la façon dont elles commencent à interagir. Nous nous contenterons d'esquisser quelques traits de ce que, de notre point de vue, qui est lié en priorité aux aspects informatiques, logiques, et linguistique, nous percevons comme des composantes dignes d'intérêt de ce domaine en émergence, pour inciter le lecteur à aller y voir de plus près.

L'ESPACE DANS LA LANGUE

Ce n'est que relativement récemment que la représentation des données spatiales dans la langue a été abordée en linguistique. De nombreuses applications du traitement informatique des langues (systèmes d'orientation, de guidage, interfaces avec des bases de données géographiques, communication en langue naturelle avec des robots) supposent que l'on sache modéliser l'espace et sa représentation dans la langue. Trois thèmes centraux ont été abordés dans le domaine :

— Etude des prépositions spatiales. Il s'agit de prépositions ou de syntagmes prépositionnels tels que *dans*, *sur*, *à travers*, *en face de*, etc. Les pionniers de cette étude sont Herskovits [Herskovits, 1986], pour l'anglais, et Vandeloise [Vandeloise, 1986] pour le français. Au centre de leur approche se trouve l'idée de modéliser pour chaque préposition une ou plusieurs valeurs de base, et de développer des mécanismes généraux pour expliquer les valeurs dérivées. Dans la lignée de ces premiers travaux se situent des recherches du groupe de Toulouse [Vieu, 1991], et d'Orsay [Briffault, 1992].

— Etude des verbes de mouvement. Il s'agit de verbes tels que *entrer*, *traverser*, *quitter*, etc. Des travaux récents s'intéressent à l'étude détaillée de leurs emplois, et tentent de formaliser les phénomènes observés [Laur & Sablayrolles, 1992].

— Modèles formels de la sémantique des expressions spatiales. La description formelle de l'emploi des expressions spatiales est beaucoup plus complexe qu'on ne pourrait le penser de prime abord. Par exemple, on ne peut pas modéliser l'emploi de la proposition *dans* en français en termes d'inclusion et d'appartenance ensembliste, car la relation en question n'est pas transitive en général : de "*l'abeille est dans la fleur*" et "*la fleur est dans le vase*" on ne peut pas déduire en général "*l'abeille est dans le vase*". En fait, de nombreux paramètres pragmatiques et fonctionnels entrent en jeu.

Le groupe de Toulouse tente de mettre au point des modèles prenant en compte tous ces facteurs, voir par exemple [Vieu, 1993].

GEOGRAPHIE ET CARTOGRAPHIE

La géographie et la cartographie constituent d'importants domaines qui manipulent des connaissances spatiales. Toutefois, elles le font dans un contexte qui diffère notablement de celui du langage :

— La géographie traite des représentations de grandes quantités de connaissances spatialement indexées. En général, elle utilise pour ce faire des techniques de bases de données, augmentées par des opérations spatiales.

— Plutôt que la représentation et la modélisation, les problèmes principaux auxquels fait face la géographie relèvent du stockage, de l'accès aux données, et des techniques d'interrogation (requêtes).

— Plusieurs types de représentation sont couramment utilisés, de façon exclusive ou en conjonction ; une opposition de base est celle qui existe entre modèles *vectoriels* et modèles *rasteurs*.

— Les connaissances géographiques font intervenir plusieurs niveaux de représentation.

— L'intégration de sources de connaissances multiples (représentées dans des formats différents) est souvent nécessaire.

— En cartographie, la représentation de mêmes données à des échelles différentes (problème de la *généralisation*) pose des problèmes conceptuels et techniques difficiles.

— Les connaissances géographiques sont en général seulement partielles, imprécises, et parfois incertaines.

PSYCHOLOGIE DE L'ESPACE

La psychologie cognitive est une des disciplines dans lesquelles l'intérêt pour l'étude des représentations spatiales a été particulièrement actif dans la période récente. Parmi les questions abordées, citons les suivantes :

— Comment les êtres humains perçoivent-ils l'espace, comment utilisent-ils les représentations qu'ils en font ? Des exemples particuliers sont l'orientation en terrain inconnu, la recherche de chemins, la planification d'itinéraires, l'apprentissage et la communication d'itinéraires.

— Sous quelle forme les êtres humains stockent-ils leurs connaissances sur l'espace ? La question de l'imagerie (*imagery debate*) continue d'opposer les tenants et les adversaires des représentations analogiques [Pylyshyn, 1981], [Kosslyn, 1981] : il s'agit de déterminer dans quelle mesure les représentations utilisées par les humains ont des propriétés de représentations analogiques. Une question apparentée est celle de la nature des "cartes cognitives" dont de nombreux chercheurs postulent l'existence en tant que représentation de son environnement spatial chez un sujet.

— Comment se font l'acquisition et l'apprentissage de connaissances spatiales ? La distinction introduite par Piaget entre connaissances de nature *topologique*, *projective*, et *euclidienne* a beaucoup marqué le sujet.

— Quelle est la relation entre cognition spatiale et perception ? La façon dont les humains utilisent les notions spatiales a son origine dans la perception que chaque individu a de son environnement. Par la suite, des facteurs tels que la proprioception et la verticalité jouent un rôle dans la constitution de ces notions.

Comment expliquer les distorsions des cartes cognitives ? On a constaté que les êtres humains font des erreurs systématiques dans certaines évaluations de distances ou de latitude (par exemple, l'Amérique du Sud est systématiquement représentée beaucoup plus à l'ouest qu'elle ne l'est en réalité). Les travaux concernant ces phénomènes essaient de les expliquer à partir des propriétés structurelles des cartes cognitives [Tversky, 1981].

— Quelle est la nature de l'espace cognitif ? De nombreux auteurs proposent des modèles de l'espace cognitif qui intègrent des représentations de divers types et de divers niveaux. Tel est le cas des *atlas cognitifs* de Golledge [Golledge et al., 1993], ou des *collages* de Tversky [Tversky, 1993].

LE RAISONNEMENT SPATIAL EN INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'objectif de l'Intelligence Artificielle est la modélisation des comportements "intelligents". A ce titre, elle s'intéresse à de nombreux comportements mettant en œuvre des connaissances sur l'espace, comme par exemple :

— La compréhension du langage naturel. Nous avons déjà mentionné les aspects linguistiques. Un certain nombre de travaux visent l'exploitation des modèles de l'espace dans des systèmes (interfaces, générateurs de plans de déplacement, etc.)

— L'acquisition et la représentation des connaissances sur les itinéraires. Des travaux précurseurs dans le domaine sont ceux de Kuipers (le modèle TOUR) [Kuipers, 1978], [Pierce & Kuipers, 1994], [Kuipers & Levitt, 1988]. Plus récemment, on a tenté de modéliser des situations plus complexes [Chown et al., 1995].

— Physique qualitative et physique naïve. La physique qualitative se propose de construire des modèles qualitatifs, plutôt que quantitatifs, des phénomènes physiques. Par exemple, on ne tiendra compte que du fait qu'un certain paramètre croisse ou décroisse, et non des valeurs précises qu'il prendra. La physique naïve, elle, s'intéresse aux modèles physiques "naïfs", par opposition à ceux que développent les physiciens. La question de savoir dans quelle mesure des modèles purement qualitatifs sont utiles, et, dans le cas contraire, quelle quantité de "quantitatifs" ils doivent incorporer pour l'être est également d'actualité [Williams, 1991 #178].

En tout état de cause, la construction effective de systèmes suppose non seulement que l'on dispose de modèles adéquats, mais aussi que ces modèles possèdent des propriétés de complexité qui rendent concevable leur implémentation. Cette contrainte, à son tour donne naissance à d'intéressants problèmes théoriques : le problème envisagé est-il algorithmisable (décidabilité) ? S'il l'est, peut-on, trouver des algorithmes qui résolvent le problème en un temps raisonnable (traitabilité) ?

Pour illustrer le type de problèmes rencontrés en Intelligence Artificielle, nous allons considérer plus en détail le cas du raisonnement temporel. La raison de ce choix est que ce domaine est plus développé que celui du raisonnement spatial, et que de nombreuses techniques qui y sont employées se transposent au cadre spatial.

LE TEMPS DANS LA LANGUE

Dans les langues, les notions temporelles disposent en général de nombreux marqueurs, dont les principaux sont, en français en tout cas, les temps grammaticaux (présent, imparfait, passé composé, etc.), les adverbes ou syntagmes adverbiaux temporels (*hier, la veille, ensuite*), et les subordonnées temporelles (la *veille de son arrivée*). Outre la temporalité, les temps grammaticaux marquent aussi ce que l'on appelle l'aspect (en français, opposition entre imparfait et passé simple, en anglais, entre présent simple et présent progressif, etc.). La sémantique des temps et aspects a donné lieu à de nombreuses tentatives de modélisation, tant en linguistique théorique qu'en linguistique informatique.

La compréhension des notions temporelles que véhicule la langue peut être cruciale dans les applications. Penser par exemple, dans une interaction avec un système informatique, à la différence entre "*j'ai sauvegardé ce fichier puis l'ordinateur s'est arrêté*" et "*j'allais sauvegarder ce fichier lorsque l'ordinateur s'est arrêté*". Les nombreux domaines d'application où la question se pose incluent celui de la traduction automatique, et même celui de l'apprentissage des langues : par exemple, Ligozat et Zock [Ligozat & Zock, 1992] proposent un système qui permet à l'utilisateur de déterminer le temps grammatical correct à partir d'une représentation iconique de sa signification.

La plupart des approches pour la représentation du temps et de l'aspect (le numéro spécial de *Computational Linguistics*, 1988, donne une idée des diverses approches informatiques) utilisent des variantes de l'idée due à Reichenbach d'introduction d'un temps de parole, d'un temps de référence, et d'un temps d'événement. Par exemple, un énoncé comme "*il avait terminé son repas*" comporte un temps de parole (maintenant), un temps d'événement (le temps du repas), et un temps de référence, antérieur au temps de parole, mais postérieur au temps d'événement, qui justifie l'emploi du plus-que-parfait.

MODELISATION DU TEMPS : LES LOGIQUES TEMPORELLES

Les logiques temporelles ont été introduites par Prior, avec des motivations initiales de nature philosophique (préciser la notion de nécessité chez Diodore Chronos). Elles sont devenues un outil fondamental, autant pour la formalisation du temps en général que pour l'expression des propriétés des programmes en informatique.

La logique de base utilise les opérateurs **F**, **G**, **P**, **H**. Si p représente un contenu propositionnel (p : "*il pleut*"), alors Fp correspond à : "*il pleuvra*", et Pp à "*il a plu*". Les opérateurs **G** et **H** représentent des versions "universelles" : Gp signifie : "*il pleuvra toujours*" et Hp : "*il a toujours plu*".

La logique de Prior permet d'exprimer de nombreux principes temporels sous forme d'axiomes. Par exemple, le fait que le temps soit infini dans l'avenir (pas de fin du monde) s'écrit $G \Rightarrow Fp$. Certains axiomes, tels que $p \Rightarrow GPp$, sont valides indépendamment de toute hypothèse sur le temps.

MODELISATION DU TEMPS : LE FORMALISME D'ALLEN

Le formalisme d'Allen [Allen, 1983] est devenu une référence obligée dans le domaine du raisonnement temporel qualitatif en Intelligence Artificielle. Dans ce formalisme, on s'intéresse aux relations qualitatives (la durée n'est pas prise en compte) entre des intervalles de temps définis par leur début et leur fin. Ces relations sont au nombre de treize : par exemple, si l'intervalle i_1 se termine avant que i_2 ne commence, on dit que i_1 précède i_2 , ou que i_2 est précédé par i_1 (dénote par $i_1 p i_2$, ou $i_2 pi_1$) ; si i_1 se termine à l'instant même où commence i_2 , on dit que i_1 rencontre i_2 ($i_1 m i_2$, ou $i_2 mi_1$) ; on définit de façon analogue i_1 débute i_2 ($i_1 s i_2$, ou $i_2 si_1$), i_1 termine i_2 ($i_1 f i_2$, ou $i_2 fi_1$), i_1 durant i_2 ($i_1 d i_2$, ou $i_2 di_1$).

On peut ainsi exprimer la connaissance que l'on possède sur deux intervalles particuliers en terme de l'ensemble des relations d'Allen possibles (si cette connaissance est nulle, on a l'ensemble des treize relations comme possibilité). On parle aussi pour ces ensembles de relations (disjonctives).

L'aspect déductif du formalisme apparaît lorsque l'on compose les connaissances relatives à plusieurs couples d'intervalles : supposons que l'on sache que $i_1 s i_2$, et que i_2 chevauche i_3 ($i_2 o i_3$) ; on peut alors en déduire que i_1 précède, rencontre, ou chevauche i_3 .

Le plus souvent, on raisonne dans le cadre des réseaux de contraintes : on considère un graphe fini, dont les sommets désignent des intervalles, et dont les arcs sont étiquetés par des relations disjonctives. Les problèmes fondamentaux auxquels on s'intéresse sont les suivants :

— Le réseau est-il consistant ? En d'autres termes, existe-t-il une interprétation des intervalles en tant qu'intervalles (de la droite réelle, par exemple), telle que les relations d'Allen pour chaque couple soient l'une des relations prescrite par le réseau ?

— Si le réseau est cohérent, quels sont les modèles qualitativement différents qui l'interprètent ?

Les résultats de complexité de base affirment que, dans le cas général, les problèmes ci-dessus sont NP-complets [Vilain et al., 1989] (ce qui implique qu'ils sont selon toute vraisemblance résolubles uniquement en un temps qui croît de façon exponentielle avec la taille du réseau).

Ce résultat négatif a constitué une motivation pour la recherche de sous-classes des relations disjonctives pour lesquelles les problèmes considérés peuvent être résolus en temps polynomial. Un résultat déterminant dans cette direction a été obtenu par Nebel et Bürckert [Nebel & Bürckert, 1994], qui ont montré qu'il existe une classe maximale possédant cette propriété (relations dites de ORD-Horn), et que cette sous-classe est en fait unique.

Les propriétés des relations d'Allen peuvent être abordées d'une façon géométrique plutôt que logique. Utilisant la structure topologique naturelle des relations d'Allen, Ligozat [Ligozat, 1994], [Ligozat, 1996] montre que les propriétés des relations de ORD-Horn sont en fait celle d'une classe appelée relations pré-convexes qui possède une

caractérisation géométrique très simple. Cette caractérisation permet de montrer la traitabilité par des méthodes géométriques, et fournit un algorithme simple pour construire une interprétation d'un réseau cohérent.

La réinterprétation du formalisme d'Allen que fait Ligozat s'inscrit dans le contexte plus général du formalisme des intervalles généralisés [Ligozat, 1991], qui permet par exemple de considérer des suites d'intervalles plutôt que des intervalles isolés (on peut ainsi modéliser des processus avec interruptions et reprises). Dans ce contexte généralisé, les relations pré-convexes constituent là encore une classe traitable.

On peut faire du formalisme d'Allen une interprétation purement logique. On sait grâce à Ladkin [Ladkin, 1987] que la théorie du premier ordre correspondante est décidable. Ligozat [Ligozat, 1990] montre comment une interprétation algébrique de ce résultat s'étend aux intervalles généralisés.

MODELISATION DE L'ESPACE : APPROCHES LOGIQUES

A l'heure actuelle, il existe peu d'approches logiques du raisonnement spatial qui seraient l'analogue des logiques temporelles de Prior. On peut citer comme exemple précurseur celui de von Wright, qui examine les systèmes modaux obtenus lorsqu'on interprète par exemple la possibilité en termes de "vrai quelque part près d'ici". Dans le cadre du développement de systèmes dits RCC (voir plus bas), Cohn [Cohn, 1993] introduit des opérateurs modaux associés aux relations binaires entre régions.

MODELISATION DE L'ESPACE : RAISONNEMENT SPATIAL QUALITATIF

Sous la désignation de raisonnement spatial qualitatif, on a vu au cours des dernières années se développer un ensemble d'approches qui, par beaucoup de points, sont similaires au calcul d'Allen dans le domaine temporel.

Ces approches diffèrent par le type d'espace, par le type d'objets, et par le type de relations spatiales qu'elles considèrent : relations topologiques entre régions, relations directionnelles et relations d'alignement, distance qualitative etc.

Le groupe de Leeds, sous la direction d'A. Cohn, travaille sur les *relations topologiques* entre régions. Leur approche est en priorité logique : utilisant la relation primitive de connexité de Clarke, le groupe a développé un ensemble de formalismes, appelés RCC (region connectedness calculus) [Randell et al., 1992a], [Randell et al., 1992b]. Un des plus simples est RCC8, qui possède huit relations de base analogues pour les régions de l'espace des relations d'Allen.

Le formalisme RCC8, incidemment, est essentiellement celui défini par Egenhofer dans le contexte des systèmes d'information géographique [Egenhofer & Herring, 1990]. Chez Egenhofer, les relations de base sont définies en termes d'intersections des régions, de leurs intérieurs, et de leurs frontières.

Le raisonnement qualitatif topologique a été utilisé dans des domaines qui relèvent de la physique

qualitative, de la modélisation de processus biologiques [Cui et al., 1992], et du raisonnement diagrammatique [Glasgow et al., 1995].

Les formalismes directionnels s'intéressent au raisonnement sur les directions. Par exemple, dans un espace à deux dimensions muni d'un cadre de référence global (la direction du nord), on peut s'intéresser aux inférences possibles : si A est à l'est de B, et B au sud-est de C, que peut-on en déduire entre A et C ? Ligozat [Ligozat, 1988] montre que le calcul le plus simple que l'on peut définir ainsi (calcul introduit par [Frank, 1992]) possède des propriétés analogues à celles du formalisme d'Allen. Dans le même ordre d'idées, Gùsgen [Gùsgen, 1989] a introduit un "formalisme d'Allen à 2 ou 3 dimensions" qui permet de raisonner de façon qualitative pour des problèmes par exemple, d'aménagement de pièces.

Le raisonnement directionnel a été également considéré dans le cas où l'on ne dispose plus de cadre de référence absolu, mais seulement de directions relatives locales. C'est le cas des travaux de Mukerjee et Joe [Mukerjee & Joe, 1990], et de Freksa [Freksa, 1992]. Les travaux de ce derniers peuvent être considérés comme étant à granularité variable, comme le montre Ligozat.

Dans un ordre d'idées quelque peu différent, Schlieder [Schlieder, 1993] a étudié le "calcul d'alignements", qui est une abstraction de la situation où un objet mobile se repère en fonction des alignements d'un ensemble de points de repère (amers).

CONVERGENCES

Nous avons commencé cet exposé en parlant de convergence, et essayé de montrer des communautés de thèmes d'intérêt. Mais la convergence s'est également faite en termes de communautés de recherche.

En 1990, à Las Navas (Espagne), une premier congrès organisé par D. Mark et A. Frank a permis de réunir des linguistes, des géographes, des chercheurs en Intelligence Artificielle, des anthropologues et des psychologues. La table des matières du recueil des actes [Mark & Frank, 1991] donne une idée de la diversité des thèmes abordés :

- Aspects cognitifs et linguistiques de l'espace géographique
- Espace géographique et influences culturelles
- Orientation et cognition spatiale
- Cartographie, approches formelles
- Communication homme-machine

Suivant l'impulsion représentée par cette première manifestation, une série de congrès désignés par le sigle COSIT (conference on spatial information theory) a eu lieu au cours des années : à Pise (1992), Marciana Marina (1993), Semmering (1995), Pittsburgh (1997).

Sur le plan national, les recherches consacrées à la représentation de l'espace ont fait l'objet de plusieurs projets nationaux. C'est le cas pour l'Allemagne (une série de Workshops a été organisée par le DFKI sur ce thème), et de la France (sous-

thème " Représentation de l'espace " dans le cadre du PIR cognisciences du CNRS).

Du côté de l'Intelligence Artificielle, la plupart des grandes manifestations internationales (IJCAI, AAAI, et ECAI sur le plan européen) ont comporté un Workshop consacré au raisonnement spatial et temporel : c'est le cas de ECAI-93 (Vienne), IJCAI-93 (Chambéry), AAAI-94 (Seattle), ECAI-94 (Amsterdam), IJCAI-95 (Montréal), AAAI-96 (Portland), AAAI-97 (Providence), IJCAI-97 (Nagoya), ECAI-98 (Brighton).

Sur le plan européen, enfin, existe un réseau de groupes de recherches sur le raisonnement spatial qualitatif : il s'agit du réseau SPACENET, financé par la Communauté Européenne.

PERSPECTIVES

Plutôt que sur des considérations générales, terminons par quatre exemples qui nous semblent bien illustrer ce qu'est en train de devenir le domaine qui nous intéresse.

— Aspects cognitifs du formalisme d'Allen

Le raisonnement que formalise le système d'Allen est purement géométrique. Par contraste, Schlieder et ses collaborateurs ont montré que les humains avaient tendance à privilégier certaines inférences et à en négliger d'autres. Il propose des modèles pour expliquer ce type de phénomène. Ce travail est représentatif d'une approche cognitive du raisonnement mis en œuvre par Allen.

— Représentation pivot

A la suite de leurs études de la description d'itinéraires, et le problème plus général de la gestion d'informations exprimées sous plusieurs modalités (langue, carte, schéma, etc.), Edwards, Ligozat et al. proposent la notion de représentation pivot [Edwards et al., 1996]. Cette représentation permet de gérer simultanément les divers types de connaissances, et les contraintes qui s'y appliquent, en particulier celles de nature cognitive.

— Géocognistique

G. Edwards propose une approche nouvelle, qu'il appelle géocognistique, pour décrire l'espace géographique [Edwards, 1997]. L'espace en tant que tel n'existe pas. Il est le résultat de processus cognitifs complexes, dans lesquels la notion de "vue" joue un rôle central. Les vues sont assemblées le long de "trajectoires". Une des conséquences de ce point de vue est le fait que les aspects spatiaux et temporels sont intrinsèquement liés dans la constitution de cet espace géocognitif.

— Géographie naïve

Nous avons vu plus haut l'idée de "physique naïve", qui est en quelque sorte la physique de "Monsieur Toutlemonde". De façon analogue, Mark et Egenhofer [Egenhofer & Mark, 1995] proposent le terme de géographie naïve pour désigner un projet dont le but est de modéliser la façon dont "Monsieur Toutlemonde" conçoit l'espace géographique. Un tel modèle devrait permettre d'expliquer un certain nombre de "principes" inattendus (pour le géographe) vérifiés par cette conception, comme par exemple : "l'espace géographique est bi-

dimensionnel", "la terre est plate", "la carte a toujours raison", etc.

On voit ainsi au terme de ce très rapide parcours que des thèmes trans-disciplinaires ont fait leur apparition à travers plusieurs communautés scientifiques ; le constat du fait que les propriétés de l'espace ou du temps manipulées par l'homme ne sont pas celles de la physique ou de la géographie pose un nouveau défi aux formalisateurs. Il nous semble clair, enfin, que seule la collaboration des diverses communautés de recherche pourra amener à prendre la mesure exacte des problèmes posés et à s'attaquer à leur solution.

BIBLIOGRAPHIE

[Allen, 1983] Allen, J. F. 1983, "Maintaining Knowledge about Temporal Intervals", *Communications of the ACM*, vol. 26, pp. 832-843.

[Briffault, 1992] Briffault, X. 1992, "Modélisation informatique de l'expression de la localisation spatiale", in *LIMSI*. Orsay: Université Paris-Sud.

[Chown et al., 1995] Chown, E., Kaplan, S. and Kortenkamp, D. 1995, "Prototypes, Location, and Associative Networks (PLAN): Towards a Unified Theory of Cognitive Mapping", *Cognitive Science*, vol. 19, pp. 1-51.

[Cohn, 1993] Cohn, A.G. 1993, "Modal and Non Modal Qualitative Spatial Logics", presented at IJCAI-93 Workshop on Spatial and Temporal Reasoning, Chambéry, France.

[Cui et al., 1992] Cui, Z., Cohn, A. G. and Randell, D. A. 1992, "Qualitative simulation based on a logical formalism of space and time", presented at Tenth National Conference on Artificial Intelligence.

[Edwards et al., 1996] Edwards, G., Ligozat, G., Gryl, A., Fraczak, L., Moulin, B. and Gold, C. M. 1996, "A Voronoi-based Pivot Representation of Spatial Concepts and Its Application to Route Descriptions Expressed in Natural Language", presented at 7th International Symposium on Spatial Data Handling, Delft, The Netherlands.

[Edwards, 1997] Edwards, G. 1997, "Geocognistics — A New Framework for Spatial Information Theory", presented at COSIT-97.

[Egenhofer & Herring, 1990] Egenhofer, M. J. and Herring, J. 1990, "A Mathematical Framework for the Definition of Topological relationships", presented at Fourth International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich, Switzerland.

[Egenhofer & Mark, 1995] Egenhofer, M. J. and Mark, D. M. 1995, "Naive Geography", presented at COSIT'95, Semmering, Austria.

[Frank, 1992] Frank, A. U. 1992, "Qualitative Spatial Reasoning about Distances and Directions in Geographic Space", *J. of Visual Languages and Computing*, vol. 3, pp. 343-371.

[Freksa, 1992] Freksa, C. 1992, "Using Orientation Information for Qualitative Spatial Reasoning", presented at Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space, Proceedings of the International Conference GIS-From Space to Territory, Pisa, Italy.

- [Glasgow et al., 1995] Glasgow, J., Narayanan, H. N. and Chandrasekaran, B. 1995, "Diagrammatic reasoning", Menlo Park, California /Cambridge, Massachusetts: AAAI Press / The MIT Press.
- [Golledge et al., 1993] Golledge, R. G., Ruggles, A. J., Pellegrino, J. W. and Gale, N. D. 1993, "Integrating Route Knowledge in an Unfamiliar Neighborhood: Along and Across Route Experiments", *Journal of Environmental Psychology*, vol. 13, pp. 293-307.
- [Gÿsgen, 1989] Gÿsgen, H. W. 1989, "Spatial reasoning based on Allen's temporal Logic", International Computer Science Institute, Berkeley, CA, Tech. Report ICSI TR-89-049.
- [Herskovits, 1986] Herskovits, A. 1986 *Language and spatial cognition*: Cambridge University Press.
- [Kosslyn, 1981] Kosslyn, S. M. 1981, "The Medium and the Message in Mental Imagery: A Theory", *Psychological Review*, vol. 88.
- [Kuipers, 1978] Kuipers, B. J. 1978, "Modelling spatial knowledge", *Cognitive Science*, vol. 2, pp. 129-153.
- [Kuipers & Levitt, 1988] Kuipers B. J. and Levitt, T. S. 1988, "Navigation and Mapping in Large-Scale Space", *AI Magazine*, vol. 9, pp. 25-43.
- [Ladkin, 1987] Ladkin, P. 1987, "Models of Axioms for Time Intervals", presented at AAAI-87, Seattle, WA.
- [Laur & Sablayrolles, 1992] Laur D. and Sablayrolles, P. 1992, "Linguistic Study and Formal Representation of the Spatio-Temporal Semantics of Motion in French".
- [Ligozat, 1988] Ligozat, G. 1988, "Reasoning about Cardinal Directions", *Journal of Visual Languages and Computing*, vol. 9.
- [Ligozat, 1990] Ligozat, G. 1990, "Weak Representations of Interval Algebras", presented at Eighth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-90), Boston, MA.
- [Ligozat, 1991] Ligozat, G. 1991, "On Generalized Interval Calculi", presented at Ninth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-91), Anaheim, CA.
- [Ligozat & Zock, 1992] Ligozat, G. and Zock, M. 1992, "How to visualize Time, Tense, and Aspect?", presented at COLING-92, Nantes.
- [Ligozat, 1994] Ligozat, G. 1994, "Tractable relations in temporal reasoning: pre-convex relations", presented at ECAI-94 Workshop W12 on Spatial and Temporal Reasoning, Amsterdam, The Netherlands.
- [Ligozat, 1996] Ligozat, G. 1996, "A New Proof of Tractability for ORD-Horn Relations", presented at National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96), Portland, Oregon.
- [Mark & Frank, 1991] Mark D. M. and Frank, A. U. 1991, "Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space", in *NATO ASI Series*. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers.
- [Mukerjee & Joe, 1990] Mukerjee, A. and Joe, G. 1990, "A Qualitative Model for Space", presented at AAAI-90, Boston, MA.
- [Nebel & Buerckert, 1994] Nebel, B. and Buerckert, H.-J. 1994, "Reasoning about Temporal Relations: A Maximal Tractable Subclass of Allen's Interval Algebra", presented at AAAI-94, Seattle, WA.
- [Pierce & Kuipers, 1994] Pierce D. and Kuipers, B. 1994, "Learning to Explore and Build Maps", presented at AAAI-94.
- [Pylyshyn, 1981] Pylyshyn, Z. W. 1981, "The Imagery Debate: Analogue Media Versus Tacit Knowledge", *Psychological Review*, vol. 88.
- [Randell et al., 1992a] Randell, A. D., Cui, Z. and Cohn, A. G. 1992, "An Interval Logic for Space based on 'Connection'", presented at ECAI-92, Vienna, Austria.
- [Randell et al., 1992b] Randell, A. D., Cui, Z. and Cohn, A. G. 1992, "An Spatial Logic based on Regions and Connection", presented at Third International Conference on Knowledge Representation (KR-92), Boston.
- [Schlieder, 1993] Schlieder, C. 1993, "Representing Visible Locations for Qualitative Navigation", presented at Qualitative Reasoning and Decision Technologies, Barcelona, Spain.
- [Tversky, 1981] Tversky, B. 1981, "Distortions in Memory for Maps", *Cognitive Psychology*, vol. 13, pp. 407-433.
- [Tversky, 1993] Tversky, B. 1993, "Cognitive maps, cognitive collages and spatial mental models", presented at European Conference on Spatial Information Theory (COSIT'93), Elba, Italy.
- [Vandeloise, 1986] Vandeloise, C. 1986, *L'espace en français: sémantique des prépositions spatiales*. Paris: Editions du Seuil.
- [Vieu, 1991] Vieu, L. 1991, "Sémantique des relations spatiales et inférences spatio-temporelles: une contribution à l'étude des structures formelles de l'espace en langage naturel". Toulouse, France: Université Paul Sabatier.
- [Vieu, 1993] Vieu, L. 1993, "A logical framework for reasoning about space", presented at European Conference on Spatial Information Theory (COSIT'93), Elba, Italy.
- [Vilain et al., 1989] Vilain, M., Kautz, H. A. and van Beek, P.G. 1989, "Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning: A Revised Report", in *Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems*, D. S. Weld and J. de Kleer, Eds. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.