

---

# MODELE COMPUTATIONNEL POUR LA SIMULATION DU RAISONNEMENT SPATIAL DE L'ETRE HUMAIN

Driss Kettani, Bernard Moulin

Université Laval, Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4, Canada  
Département d'Informatique et Centre de recherche en Géomatique  
Email: Kettani / Moulin @ift.ulaval.ca

---

## RÉSUMÉ

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles computationnels qui définissent qualitativement les opérations et les structures spatiales. Ces modèles visent généralement à résoudre un certain nombre des problèmes posés par les modèles quantitatifs notamment ceux relatifs à l'expression de la topologie et à la sémantique des opérations spatiales. La plupart de ces modèles ne considère que l'aspect qualitatif du raisonnement spatial et ignore totalement son aspect cognitif. Les solutions proposées sont ainsi plus logiques et mathématiques que cognitives et intuitives. D'où la question de recherche que nous abordons dans cet article: peut-on élaborer un modèle computationnel à la fois qualitatif, intuitif et cognitivement plausible? Nous pensons que OUI. Nous présentons dans cet article un modèle spatial qui s'inspire des processus cognitifs de l'être humain et permet ainsi de simuler computationnellement son raisonnement spatial. Pour cela, nous avons redéfini les différents éléments nécessaires à l'élaboration d'un modèle de raisonnement spatial, à savoir, le voisinage, la distance et l'orientation. Nous proposons des définitions intuitives et cognitivement plausibles à ces différents éléments en nous servant de la notion de zone de voisinage qu'il faut construire autour des objets spatiaux. Cette zone de voisinage découle en fait de celle de zone d'influence que l'être humain établit spontanément autour des objets qu'il perçoit pour pouvoir raisonner selon le contexte.

## 1. Introduction

La compréhension du Raisonnement Spatial Humain (RSH) est une tâche cognitive très complexe [Edwards, Moulin 1995]. Plusieurs chercheurs s'y sont penchés et ont proposé des points de vue différents. Aucun consensus scientifique à ce propos n'a été établi jusqu'à maintenant, la nature du RSH et ses structures demeurant imprécises et obscures [Computational Intelligence 1993]. Cependant, plusieurs études confirment la prédominance de l'approche qualitative dans les processus cognitifs qui forment le raisonnement spatial de l'être humain [Golledge, Zannaras 1973], [Hernández 1994]. En effet, l'esprit humain se prête bien au raisonnement qualitatif qui est, par définition, imprécis et ambigu [Kuipers 1984]. Cela ne veut pas dire pour autant que ce raisonnement est maladroit ou biaisé. Bien au contraire, l'être humain s'est toujours "bien débrouillé" et il arrive généralement à bien résoudre les problèmes "usuels" relatifs à l'espace. La question qui surgit dès lors est "comment l'être humain arrive-t-il par un raisonnement qualitatif, ambigu et imprécis, à réaliser des tâches aussi complexes que la description d'itinéraire, l'orientation, le changement de directions, etc. ?".

Dans cet article, nous présentons un modèle computationnel qui simule le RSH et qui s'inspire des processus cognitifs de l'être humain. Il se base sur la manipulation d'un certain nombre de règles qualitatives

similaires à celles utilisées par l'être humain pour comprendre et raisonner à propos de l'espace. Ces règles (que nous appelons primitives spatiales) seront intégrées dans l'architecture générale du modèle computationnel que nous proposons. Elles peuvent être, par la suite, assumées par des agents logiciels spécialisés d'un système multiagent qui simule le raisonnement spatial de l'être humain.

Dans la section 2 de cet article, nous passons en revue les principaux travaux de recherche relatifs à la modélisation qualitative de l'espace. Nous montrerons que la plupart de ces travaux n'accorde pas une attention particulière à l'aspect cognitif et qu'elle privilégie l'aspect fonctionnel au détriment de l'intuitivité et de la plausibilité cognitive des solutions proposées.

Dans la section 3, nous présentons notre modèle et les définitions que nous proposons pour topologie, la distance et l'orientation. Nous décrivons brièvement, par la suite, l'architecture conceptuelle du système proposé. L'annexe A, jointe à la fin de cet article, décrit plus en détail cette architecture.

Dans la section 4, nous présentons une application expérimentale de notre modèle qui vise le développement d'un Agent Artificiel Intelligent pour la

Génération de Description d'Itinéraire (GRAAD<sup>1</sup>). Cet agent traite des connaissances spatio-temporelles et utilise un raisonnement qualitatif et intuitif pour simuler le comportement et l'avancement d'un piéton dans un réseau routier.

Dans la section 5, nous décrivons le plan de validation de notre modèle. Ce plan comprend deux phases: la première concerne la validation des descriptions d'itinéraires produites par GRAAD et la deuxième porte sur la validation du modèle théorique général et du concept de zone d'influence.

## 2. Revue de littérature

Avant d'aller plus loin dans cette section, voyons d'abord ce qu'est un modèle spatial qualitatif.

Freksa [Freksa 1991] pense qu'une représentation qualitative de l'espace doit, entre autres, posséder les caractéristiques suivantes: elle est indépendante de toute échelle numérique; elle ne considère que le nombre nécessaire de distinctions permettant d'identifier les objets et les événements d'une scène; la connaissance spatiale qu'elle représente est basée sur l'importance (magnitude) relative des objets dans la scène et non sur leur importance absolue mesurée quantitativement; et la connaissance qu'elle représente est vague et non précise.

Hernández [Hernández 1994] donne plus de précisions à ce propos. Il considère qu'un modèle spatial qualitatif doit permettre de comparer les magnitudes des objets spatiaux tels que perçus par l'œil (ou tout autre périphérique de vision) et non pas les valeurs numériques qui représentent ces magnitudes. Cela signifie que le raisonnement spatial doit se baser sur la comparaison directe entre les objets spatiaux eux-mêmes et non sur les mesures quantitatives de leur grandeur. Or, *la comparaison des objets spatiaux entre eux fait intervenir trois éléments principaux: la topologie, l'orientation et la distance* [Clementini et al. 1997].

Nous pensons que la définition de ces éléments est fondamentale pour la conception de tout modèle spatial qualitatif. Dans cette revue de littérature, nous présenterons un ensemble de travaux relatifs à ces trois éléments. Nous verrons que la plupart des modèles spatiaux proposés ne se basent pas sur une démarche cognitive et ne se préoccupent pas de l'intuitivité et de la plausibilité cognitive des solutions proposées. Ainsi, si généralement le caractère qualitatif ressort bien dans ces modèles, il ne va pas de même pour le caractère cognitif.

<sup>1</sup> GRAAD est obtenu par le mélange des premières lettres du titre en Anglais de notre système: Artificial Agent for Generation and Description of Routes

## 2.1. Approches qualitatives pour la topologie

Allen [Allen 1983] a proposé une *logique d'intervalles* qui représente qualitativement la connaissance temporelle sous forme de relations entre les intervalles. Ces relations permettent de comparer qualitativement les intervalles. Il a prouvé qu'avec un ensemble de treize relations (avant, rencontre, chevauche, durant, débute, fini, ainsi que l'inverse de ces relations), il est possible de définir toutes les configurations possibles entre deux intervalles situés sur l'axe temporel. Les relations entre les intervalles sont structurées sous forme d'un réseau de contraintes. La structure de ce réseau se construit sur la base des intervalles de référence et selon la décomposition hiérarchique du domaine [Hernández 1994].

Mukerjee et Joe [Mukerjee, Joe 1990] utilisent un système de référence où chaque objet est considéré dans son orientation intrinsèque. Partant du devant de chaque objet, ils définissent quatre quadrants délimités par l'axe vertical et l'axe horizontal qui coupent l'objet au milieu. À chacun de ces quadrants est associé un numéro de direction. *Les relations de directions entre deux objets sont déduites par le biais de la comparaison des numéros des quadrants où ils se trouvent.*

Güting [Güting 1988] s'est inspiré des travaux d'Allen et a, en plus, *utilisé la théorie des ensembles pour représenter des relations topologiques:*

Tableau 1 — Relations topologiques définies par Güting

Représentation correspondante	Relations topologiques
$\text{Points}(X) = \text{Points}(Y)$	$X = Y$
$\text{Points}(X) \neq \text{Points}(Y)$	$X \neq Y$
$\text{Points}(X) \subseteq \text{Points}(Y)$	X contient Y
$\text{Points}(X) \cap \text{Points}(Y) = \emptyset$	X est à l'extérieur de Y
$\text{Points}(X) \cap \text{Points}(Y) \neq \emptyset$	X a une intersection avec Y

Les relations définies par Güting ne sont ni complètes ni exclusives. Par exemple, les relations d'égalité et de contenance ne sont que des cas particuliers de la relation d'intersection et il n'y a pas moyen de distinguer la relation de contiguïté (X touche Y) de celle d'intersection. Cela a amené Egenhofer et Franzosa [Egenhofer, Franzosa 1991] à introduire les notions de *bordure* d'un objet et de son *intérieur* dans la définition de la topologie. Ils s'en sont servis pour représenter *seize relations topologiques spatiales.*

Hernández [Hernández 1994], a utilisé les relations définies par Egenhofer et Franzosa et les a redéfinies pour distinguer entre les relations "*contient*", "*est inclus*" et "*est à la frontière*".

Nous remarquons, à travers ces différents travaux relatifs à la topologie, qu'il n'y a aucune référence aux processus cognitifs de l'être humain et à sa perception de la topologie. Les solutions proposées sont effectivement qualitatives et elles permettent d'élaborer un expression qualitative de l'espace. Mais, il est clair que les fondements des ces solutions sont beaucoup plus logiques et mathématiques que cognitives. Nous ne pensons pas que notre esprit manipule intuitivement et systématiquement des intervalles temporels ou des ensembles de points pour pouvoir percevoir la topologie des objets dans l'espace. L'intuitivité de ces modèles ne nous paraît pas évidente.

## 2.2. Approches qualitatives pour l'orientation

Les relations d'orientation représentent le deuxième élément indispensable pour pouvoir comparer et qualifier les positions des objets dans l'espace. Elles décrivent l'emplacement relatif d'un objet donné par rapport à un autre [Gryl 1995].

Evans [Evans 1968] et Haar [Haar 1976] ont proposé une approche qualitative pour la détermination de l'orientation entre deux objets. Cette approche est appelée "*approche du modèle triangulaire*" Pour chaque objet de la scène, il faut construire un "*triangle d'orientation*" dont le point de départ est le centre de cet objet selon une orientation explicitement définie. Les dimensions de ce triangle sont proportionnelles à la taille de l'objet en question. Les relations d'orientation entre deux objets se basent sur le test d'inclusion du centre du premier objet dans "*le triangle d'orientation*" du second.

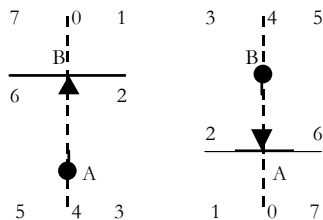


Figure 1 — Modèle de Freksa et Zimmermann

Freksa et Zimmermann [Freksa, Zimmermann 1992] présentent une approche qualitative de l'orientation basée sur l'*information d'orientation directionnelle* (directional orientation information). Freksa et Zimmermann introduisent le concept de "*grille d'orientation*" et l'utilisent pour définir quinze orientations de bas comme l'illustre la figure 1. Cette grille est alignée avec une orientation déterminée par deux points A et B formant une ligne (AB). La grille permet d'obtenir trois orientations possibles (à gauche de la ligne, à droite de ligne, sur la ligne). En introduisant un vecteur d'orientation ( $\rightarrow AB$ ), décrivant les orientations (devant, neutre, derrière) et délimité de chaque côté d'une ligne

orthogonale, on obtient une matrice d'orientations. Freksa et Zimmermann proposent aussi des opérations pour changer le vecteur de référence d'une relation. Il s'agit des opérations d'inversion, de retour (homing) et de raccourci (Shortcut).

Hernández [Hernández 1994], [Clementini et al. 1997] pense que l'ensemble de référence de toute orientation est celui composé au premier niveau des directions: {Gauche, Droite, devant, derrière}. Ces directions de référence sont obtenues en traversant le référentiel par un axe vertical (on obtient ainsi la gauche et la droite) et par un autre axe horizontal (on obtient ainsi le devant et le derrière). Avec ces quatre niveaux d'orientation de base, nous pouvons obtenir une infinité de niveaux intermédiaires. Il suffit d'ajouter d'autres axes obliques qui traversent le référentiel au centre. Hernández introduit ainsi le concept de niveau de granularité des relations d'orientation. Mais, avant de pouvoir tracer ces axes d'orientation sur un objet quelconque, nous devons d'abord connaître son début et sa fin, ou en termes plus usuels, nous devons connaître son "devant" et son "derrière". Cela est très important puisque c'est ce qui nous sert de référence dans toutes les inférences sur l'orientation de l'objet en question, autrement, on ne saurait distinguer sa gauche de sa droite ou son devant de son derrière. Hernández pense que l'orientation d'un objet ne peut être déduite qu'en se basant sur un cadre de référence. Il présente trois cadres de référence possibles en se basant sur les travaux de [Retz-Schmidt 1988]: le cadre intrinsèque, le cadre extrinsèque et le cadre déictique.

Nous pouvons ainsi constater, au terme de cette présentation des travaux relatifs à l'expression qualitative de l'orientation, que l'aspect cognitif est absent dans la démarche de ces chercheurs et dans les fondements des solutions qu'ils proposent.

## 2.3. Approches qualitatives pour la distance

Zimmermann [Zimmermann 1995] a développé une méthode appelée " *$\Delta$  calculus*". Cette méthode est basée sur des considérations cognitives relatives à la perception de la distance par l'être humain et son intégration dans le RSH en général. Son idée principale consiste à représenter, d'une façon plausible cognitivement, la différence entre deux points ayant des positions différentes sur la scène spatiale observée. Ainsi pour représenter le fait que: "a est plus grand que b par une certaine valeur x", Zimmermann utilise d'abord la relation: "a ( $>$ , x) b" Par la suite, il fait abstraction de la valeur x et la remplace par le symbole générique  $\Delta$ . La relation "a ( $>$ ,  $\Delta$ ) b" permet ainsi de déduire que "a est plus grand que b" sans autres présuppositions sur la valeur quantitative de la différence entre a et b. Finalement, pour enrichir cette relation, Zimmermann propose de manipuler le  $\Delta$  afin qu'il puisse refléter analogiquement le résultat de la comparaison entre les

objets comparés. Par exemple, pour indiquer que A est deux fois plus grand que b, il utilise la relation: "a (>, "b, b") b" Pour indiquer que la différence entre a et b est plus petite que b, il utilise la relation: "a (>, x) b ET x (>, Δ) b" Cette représentation permet d'exprimer qualitativement la distance (et la comparaison des dimensions) entre les objets d'un plan spatial. Le raisonnement par la méthode "Δ calculus" s'effectue par compositions des relations de distance. Cette composition se base sur les principes mathématiques généraux de manipulation des distances. Par exemple, de la relation "a (>, x) b ET b (>, y) c" on peut déduire la relation "a (>, "x, y") c". Zimmermann propose aussi un attribut pour exprimer les tailles négatives (la profondeur par exemple) des objets ainsi qu'une méthode pour éviter l'explosion combinatoire pouvant avoir lieu suite aux différentes compositions des relations de distance.

Nous reconnaissons que les travaux de Zimmermann partent effectivement de considérations cognitives. Cependant, nous pensons qu'il serait plus intéressant d'élaborer un modèle spatial global qui intègre, à la fois, les expressions de la topologie de l'orientation et de la distance.

### 3. Caractéristiques du modèle proposé

*La caractéristique principale de notre modèle est son approche cognitive.* En effet, comme nous l'avons vu, les travaux qui portent sur l'élaboration d'une définition qualitative de la topologie ne font pas généralement de liens avec le processus cognitif de l'être humain. Cela veut dire, qu'ils partent des définitions courantes de la topologie et essayent de trouver des méthodes pour les implanter en ordinateur. Ces méthodes ne découlent pas nécessairement du raisonnement spatial humain puisque leur but principal est d'aboutir à une définition qualitative de la topologie et non pas à une définition intuitive et cognitivement plausible.

Notre approche est différente du fait que nous privilégions le processus cognitif qui mène l'être humain à raisonner à propos de l'espace. Nous nous en inspirons pour guider notre démarche et arriver à nos conclusions. Le modèle que nous proposons nous semble, pour ainsi dire, plus intuitif, spontané et facile à comprendre puisqu'il se base sur un processus cognitif qui nous est familier.

#### 3.1. Définition de la topologie dans le modèle proposé

En plus de n'être ni cognitivement plausibles ni intuitives pour notre esprit, la plupart des approches qualitatives que nous avons présentées, ne permettent pas de définir les relations de proximité et d'éloignement entre les objets. Elles ne permettent pas non plus de définir ou de déduire le degré de proximité / éloignement entre ces objets. Or, ce type de relations est

fréquemment utilisé par l'être humain pour raisonner et discuter à propos de l'espace. On ne peut bâtir un modèle de raisonnement spatial cognitivement plausible sans couvrir ces relations dans la définition formelle de la topologie. Il faut donc trouver un moyen pour les représenter.

Nous proposons une solution simple et intuitive: *construire une zone de voisinage autour de chaque objet du plan spatial et redéfinir les relations topologiques en tenant compte, cette fois-ci, de la zone de voisinage des objets.* Avant de rentrer dans les détails de la mise en œuvre de cette solution, comprenons d'abord la signification conceptuelle des zones de voisinage et pourquoi elles sont cognitivement plausibles.

En effet, la notion de zone de voisinage que nous proposons découle directement de celle de *zone d'influence* que l'être humain construit autour des objets qu'il perçoit dans l'espace [Moulin, Gryl, Kettani 1997]. Ces zones d'influence lui servent à évaluer approximativement les distances et les grandeurs sans avoir recours à une mesure quantitative. Par exemple, si on aperçoit deux grandes montagnes distantes d'environ 1km, on aurait tendance à dire qu'elles sont assez rapprochées. Maintenant, si on place deux vélos séparés aussi d'environ 1km, on aurait tendance, cette fois-ci, à dire qu'ils sont éloignés. La distance absolue (environ 1km) est la même dans les deux cas, c'est plutôt *la zone d'influence que possède chaque objet autour de lui qui influence la qualification de la distance.*

Pour marquer la différence entre le niveau cognitif et le niveau computationnel dans notre modèle nous avons opté pour la dénomination zone de voisinage plutôt que zone d'influence.

Il est à noter, que dans ses travaux récents [Clementini et al. 1997], [Hernández 1994], Hernández utilise la notion de zone d'acceptation (acceptance area) dans la définition des relations de topologie et d'orientation. Cette zone d'acceptation peut être comparée, du point de vue fonctionnel, à la zone de voisinage que nous proposons. Hernández s'en sert seulement comme moyen pour arriver à définir qualitativement les liens topologiques. Curieusement, il n'est pas conscient de la valeur cognitive du moyen qu'il utilise. D'ailleurs, il se contente de la définir comme étant "la zone avoisinante d'un objet dont il est acceptable de qualifier l'espace qu'elle contient de proche". Aucune allusion n'est faite, dans ses travaux, à la validité cognitive de cette zone ou à son lien avec le raisonnement spatial de l'être humain en tant que tel.

Formellement, la Zone de Voisinage d'un objet O (ZV(O)), de forme graphique quelconque, est la portion d'espace qui entoure O et qui lui est contiguë, telle que:

- ZV a deux bords (bord intérieur et bord extérieur);

- les bords de ZV ont la même forme graphique (shape) que O;
- si on trace une ligne perpendiculaire d'un point quelconque  $O_i$  localisé sur le bord  $B_O$  de O, cette ligne coupera le bord intérieur de ZV au point  $ZVBI_i$  et le bord extérieur de ZV au point  $ZVBE_i$  tel que ( $\forall O_i \in B_O$ ) ( $\text{dist}(O_i, ZVBI_i) = c1$  et  $\text{dist}(O_i, ZVBE_i) = c2$  and  $c1 > c2$ ). La distance  $\text{dist}(ZVBI_i, ZVBE_i)$  est appelée la largeur de la zone de voisinage.



Figure 2 — Définition de la zone de voisinage

On peut maintenant redéfinir les relations de proximité en considérant que:

Un objet  $O_2$  est proche d'un objet  $O_1$  ssi  $O_2 \subset ZV(O_1)$

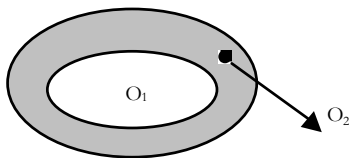


Figure 3 — Voisinage entre 2 objets

L'établissement des zones d'influence est un acte cognitif spontané qui nous permet de distinguer et de tenir compte de l'importance (dimensionnelle) des objets dans un environnement spatial. Il nous permet en fait de *prendre en compte implicitement le voisinage et de raisonner sur la taille, la distance et la proximité des objets spatiaux de façon contextuelle*. Les trois éléments nécessaires à l'élaboration d'un modèle qualitatif de l'espace (i.e., la topologie, la distance et l'orientation) se trouvent ainsi intégrés et pris en compte implicitement dans notre modèle. Nous verrons, dans les prochaines sections, comment cette intégration est réalisée par le biais d'une seule définition unifiée de ces trois éléments.

### 3.2. Prise en compte de la distance

La définition de voisinage telle que nous venons de la présenter, ne peut pas nous renseigner beaucoup sur le degré de proximité ou d'éloignement des objets, i.e., en termes quantitatifs, la distance les séparant. Or, les expressions langagières relatives à l'espace que nous utilisons fréquemment comportent beaucoup de nuance quant au degré de proximité ou d'éloignement des objets (par exemple les expressions très proche, assez loin, très loin, etc.). Ces degrés varient selon la distance qui

sépare les objets comparés mais aussi, en tenant compte de la configuration des objets présents dans le plan spatial observé. Ce lien cognitif entre la distance quantitative et la configuration spatiale du plan observé est très intime. À cet égard, l'exemple que nous avons déjà donné à propos de la distance séparant les deux montagnes ou les deux vélos est très révélateur. Il montre combien l'évaluation qualitative de la distance dépend de la configuration du plan. Cela permet d'ailleurs à l'être humain de raisonner en tenant compte du contexte, ce qui est l'une des caractéristiques principales du RSH [Freksa 1991].

Il faut donc trouver un moyen d'étendre la portée de la zone de voisinage afin de tenir compte des distances entre les objets. Pour cela, nous proposons de définir plusieurs zones de voisinage pour chaque objet spatial. Chaque zone représentera un certain degré de proximité ou d'éloignement.

On peut, par exemple, définir trois zones de voisinage qui représentent respectivement les distances: "très proche, proche et relativement loin" (figure 4). Avec ces trois zones, nous couvrirons déjà un bon nombre d'expressions qualitatives usuelles relatives à la distance.

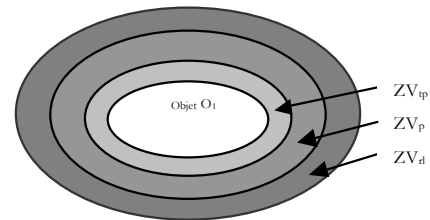


Figure 4 — zones de voisinage d'un objet spatial

Nous pouvons aussi utiliser des regroupements approximatifs pour englober d'autres expressions. Cela revient à faire correspondre la même zone de voisinage à un sous-ensemble d'expressions langagières désignant un degré de proximité relativement similaire.

Par exemple, on peut faire correspondre la première ZV à toutes les expressions qui indiquent que la distance entre deux objets est considérée comme proche (très proche, relativement proche, bien proche) et la deuxième à toutes les expressions qui désignent que cette distance peut être considérée comme loin (très loin, loin, relativement loin).

Les différentes ZV sont identifiées au degré de proximité qu'elles représentent. Pour notre exemple précédent, les trois zones de voisinages seront identifiées ainsi:  $ZV_{tp}(O_i)$  (zone de voisinage très proche de l'objet  $O_i$ ),  $ZV_p(O_i)$  (zone de voisinage proche de l'objet  $O_i$ ),  $ZV_{rl}(O_i)$  (zone de voisinage relativement loin de l'objet  $O_i$ ). On peut maintenant redéfinir les trois

relations de voisinage de l'exemple précédent de la façon suivante:

- O<sub>2</sub> est très proche de O<sub>1</sub>    ssi    O<sub>2</sub> ⊂ ZV<sub>tp</sub>(O<sub>1</sub>)
- O<sub>2</sub> est proche de O<sub>1</sub>        ssi    O<sub>2</sub> ⊂ ZV<sub>p</sub>(O<sub>1</sub>)
- O<sub>2</sub> est relativement loin O<sub>1</sub>   ssi    O<sub>2</sub> ⊂ ZV<sub>rl</sub>(O<sub>1</sub>)

Ou encore plus généralement :

$$X \text{ est à un certain degré de proximité (dp) de } Y \text{ ssi } X \subset ZV_{dp}(Y)$$

La détermination de la dimension de la ZV d'un objet dépend de plusieurs facteurs, notamment, sa dimension et son environnement (i.e., les objets qui l'entourent). Nous envisageons une méthode qui consiste à établir un rapport dynamique entre les objets et leur ZV qui tient compte de leur environnement. Ainsi, la dimension de la ZV des objets peut varier selon le contexte de raisonnement considéré: pour un même objet spatial, la dimension de la ZV peut changer selon les objets spatiaux présents dans son environnement.

### 3.3. Prise en compte de l'orientation

Pour exprimer la définition de l'orientation dans notre modèle, nous utilisons l'approche de décomposition des objets spatiaux en zones d'orientation de base proposée par Hernández (section 2.2). La désignation d'une zone d'orientation ZO d'un objet quelconque O se fera de la façon suivante: O<sub>zo</sub>. Par exemple, le devant gauche d'un objet O sera désigné par: O<sub>devant-gauche</sub>. L'intégration des expressions d'orientation et de topologie d'un objet Y nous permet d'obtenir une seule expression de la forme ZV<sub>dp</sub>(Y<sub>Ort</sub>) qui désigne: *la zone de voisinage de l'objet Y au degré de proximité dp, vu de son orientation Ort*.

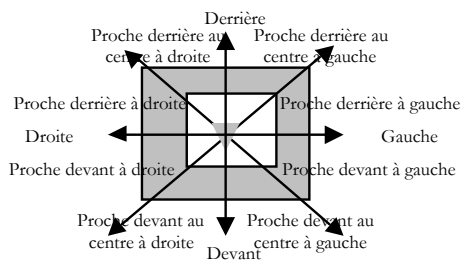


Figure 5 — Intégration de l'orientation et la topologie

On obtient ainsi la définition formelle suivante intégrant à la fois l'orientation et le voisinage d'un objet:

$$X \text{ est à un certain Degré de Proximité (dp) de } Y \text{ vu de l'Orientation(Ort) ssi } X \subset ZV_{dp}(Y_{Ort})$$

On dira alors qu'un objet X est *proche devant* l'objet Y ssi:  $(X \subset ZV_p(Y_{\text{devant-à-droite}}) \vee (X \subset ZV_p(Y_{\text{devant-à-gauche}}))) \vee$

$$(X \subset ZV_p(Y_{\text{devant-au-centre-à-gauche}})) \vee (X \subset ZV_p(Y_{\text{devant-au-centre-à-droite}}))$$

### 3.4. Des images mentales vers les images conceptuelles

Dans la démarche qui a guidé Hernández, Freksa et bien d'autres chercheurs dans l'établissement des critères d'élaboration d'un modèle spatial qualitatif, un point très important est à noter: *ces chercheurs insistent sur l'analogie qu'il faut conserver entre les structures de l'espace (objets spatiaux) et les entités conceptuelles qui les représentent dans le modèle spatial*. Cela permet de garder systématiquement une similitude structurale entre la représentation conceptuelle de l'espace et ses caractéristiques physiques. Or, les chercheurs en psychologie cognitive proposent la *notion d'Image Mentale* (IM) pour définir les entités (structures) mentales mises en œuvre par l'être humain pour raisonner à propos de l'espace [Johnson-Laird 1983], [MacNamara 1986]. Cette notion est d'ailleurs utilisée par plusieurs chercheurs pour essayer de "simuler" par ordinateur le RSH, notamment, Kosslyn [Kosslyn 1980] et Glasgow [Glasgow 1993]. Personne ne semble nier l'existence du phénomène des IM mais il y a une divergence sur la structure et les fonctions des IM [Computational Intelligence 1993].

*Sur le plan cognitif, l'image mentale dispose de toutes les caractéristiques relatives à l'analogie avec les objets spatiaux modélisés: "les images mentales sont utilisables comme le sont les produits d'une perception directe et productrice d'effets comportementaux souvent similaires à ceux de la perception... Elles sont analogiques et entretiennent un isomorphisme structural avec les objets qu'elles représentent"* [Denis 1989].

Cette propriété de similitude structurale donne à l'image mentale une grande valeur fonctionnelle lorsqu'elle est utilisée comme support pour des tâches cognitives telles que la planification, la résolution de problèmes, la compréhension du langage, etc..

Une image mentale est une représentation interne (dans l'esprit de l'humain) des données relatives à une image ou à un objet quelconque dans l'espace. C'est un concept abstrait qui ne peut être défini d'une manière formelle puisqu'il est basé sur la perception (relativement subjective) des individus. La question qui se pose donc est comment mettre en œuvre le modèle des images mentales dans la pratique? Nous proposons, comme réponse à cette question, de construire une librairie d'images graphiques ayant les mêmes caractéristiques fonctionnelles et structurelles que les images mentales. Nous appelons ces images des *"images conceptuelles"* en référence à leur caractère computationnel et pour les démarquer des images mentales qui ont une connotation cognitive dominante. En tant que structure de données, les Images Conceptuelles (IC) possèdent deux composantes:

- < une *composante spatiale* qui regroupe toutes les caractéristiques spatiales de l'IC telles que la position, la topologie, l'orientation, etc.;
- < une *composante descriptive* qui regroupe toutes les caractéristiques descriptives de l'IC telles que la couleur, l'identifiant, etc..

Les IC seront stockées dans la mémoire de masse de l'ordinateur et seront récupérées selon les besoins de l'utilisateur. Elles seront regroupées en thèmes selon la spécificité (catégorie) du problème spatial à résoudre. Chaque thème comportera plusieurs IC représentant, chacune, un objet spatial du monde réel généralement impliqué dans la résolution des problèmes de cette catégorie. On peut par exemple penser à un thème pour la recherche d'itinéraire, à un autre thème pour l'analyse spatiale des sols, etc..

Evidemment, au départ la librairie des IC risque d'être incomplète étant donné la multitude d'objets spatiaux qui peuvent être impliqués dans la résolution d'un problème particulier. Cela n'est pas vraiment une défaillance de notre approche puisque l'être humain lui-même construit et enrichit graduellement sa propre "librairie" d'images mentales.

### 3.5. Architecture proposée

Le modèle de raisonnement spatial que nous proposons dans cet article *n'est pas uniquement dédié à une tâche spatiale en particulier*. Il est assez général pour s'appliquer à plusieurs situations dans lesquelles il faut résoudre un problème spatial similaire à ceux que nous rencontrons usuellement. Nous ne prétendons pas qu'il puisse s'adapter à tous les problèmes spatiaux, cela exigerait des validations beaucoup plus longues, rigoureuses et coûteuses. Néanmoins, les orientations que nous avons adoptées se basent sur le RSH en tant que tel et non sur une de ses tâches en particulier. Cela confère au modèle proposé un caractère général qui s'exprime clairement à travers l'architecture sur laquelle il est bâti. L'annexe 1 jointe en fin de cet article présente en détail l'architecture proposée et définit les tâches assumées par chacun des agents qui la composent.

## 4. Application du modèle proposé

En dépit de l'importance du processus de Description d'itinéraire (DI) effectué régulièrement par les êtres humains pour communiquer, les recherches scientifiques dans ce domaine restent peu nombreuses et ne reflètent pas cet état de fait [Fraczak 1994]. Autant pour la science cognitive que pour la linguistique, la DI représente un grand défi puisqu'elle nécessite une forme de représentation bien spécifique reflétant sa structure à la fois spatio-temporelle et descriptive. Afin de contribuer à la compréhension de cet important processus de communication, nous avons choisi de l'utiliser comme

cadre expérimental pour valider notre modèle théorique. Nous présentons dans cette section *une application expérimentale de notre travail qui vise le développement d'un Agent Artificiel Intelligent pour la Génération de Description d'itinéraire (GRAAD)*. Cet agent traite des connaissances spatio-temporelles et utilise un raisonnement qualitatif pour simuler le comportement et l'avancement d'un piéton virtuel.

### 4.1. Éléments conceptuels

Pour générer une DI, des études ont montré que la plupart des personnes utilise un modèle mental de la région ou de la ville concernée: elles visualisent mentalement les éléments saillants de l'itinéraire qu'elles veulent décrire [Lynch 1960], [Tversky 1993].

Pour illustrer ce processus de visualisation, nous présentons ici le texte d'une description d'itinéraire pour aller de la gare de la Place St André des Arts à la rue Mignon et, dans la figure 7, la portion concernée de la carte de la ville de Paris.

*"Quand tu sors du métro Place St André des Arts, tu as à ta droite la Fontaine St Michel. En face de toi, il y a un magasin Gibert et, à ta gauche, il y a la rue Danton. Continue sur la rue Danton. Tu croieras à ta gauche la rue des Poitevins, puis la rue Serpente. Tu te trouveras alors devant le centre Henri Piéron. Prends la rue Mignon"* [Gryl 1995].

Comme nous pouvons le constater, cette DI est principalement composée de deux dimensions fortement reliées: *la dimension temporelle et la dimension spatiale*. La dimension temporelle reflète l'ordre anticipé dans lequel les actions doivent être réalisées par le destinataire. Elle reflète aussi l'avancement de ce dernier dans le chemin décrit. La dimension spatiale englobe les principales caractéristiques spatiales des objets de l'environnement, elle dépend de la localisation et de l'orientation du destinataire par rapport au chemin décrit.

Pour déterminer les éléments conceptuels nécessaires à l'élaboration de cartes conceptuelles cognitivement plausibles pour le système GRAAD, nous allons nous baser sur l'étude effectuée par Gryl [Gryl 1995] concernant les descriptions d'itinéraire dans un environnement urbain. Cette étude, a révélé en fait que les expressions composant une DI sont principalement de deux catégories: des expressions verbales qui expriment le mouvement (continuer tout droit, tourner à gauche, avancer un peu, etc.) et des expressions nominales, souvent des repères ou des éléments saillants, (jusqu'au rond-point, à côté du parc, pas loin de l'église, etc.) pour aider le destinataire à se repérer dans l'environnement. Sur le plan structurel ces deux catégories correspondent à deux composantes:

**Les descriptions locales** qui peuvent être soit des endroits où le destinataire doit changer son orientation, soit des endroits jugés pertinents par l'émetteur pour aider le destinataire à se repérer. Les descriptions locales réfèrent souvent à des repères ou à des objets saillants (remarquables) dans l'environnement ainsi qu'à leur position par rapport au Piéton Virtuel (PV).

**Les chemins** qui sont des portions de l'itinéraire décrit, renfermant des indications pour relier deux descriptions locales.

Pour respecter le cadre conceptuel proposé par Gryl, GRAAD doit disposer d'un ensemble de fonctions et de données pour représenter des collections d'objets-repères (descriptions locales) et d'objets-supports (chemins). Cette représentation doit tenir compte de l'orientation des objets et de leur position relative dans la scène spatiale. L'utilisation des cartes conceptuelles dans ce contexte nous paraît bien justifiée, la section qui suit en présente les détails.

#### 4.2. Utilisation des cartes conceptuelles

Le système GRAAD manipule des *Cartes Conceptuelles* (CC) que les usagers construisent par le biais de son éditeur graphique. Chaque CC est composée de l'ensemble des images conceptuelles de la scène spatiale que l'utilisateur imagine et veut reconstruire. On peut donc dire la CC est une *représentation analogique des objets de la scène spatiale considérée*.

Les cartes conceptuelles utilisées par GRAAD renferment des connaissances spatio-temporelles similaires à celles utilisées par l'être humain pour décrire un itinéraire, i.e., des descriptions locales et des chemins [Gryl 1995]. Les descriptions locales sont représentées dans la base de connaissance de GRAAD par des objets-repères (des immeubles, des parcs, etc.) tandis que les chemins sont représentés par des objets-supports (des routes, des ruelles, etc.).

L'éditeur graphique de GRAAD permet à l'utilisateur de dessiner sur l'écran une scène spatiale contenant des objets-repères et des objets-supports. La scène ainsi construite représentera la CC sur laquelle le raisonnement qualitatif va s'effectuer. Cette CC comporte les éléments nécessaires et suffisants pour décrire un itinéraire. Les positions relatives des objets spatiaux dans une CC respectent la disposition spatiale de la scène originale imaginée par l'utilisateur, tandis que les distances entre les objets peuvent être sensiblement différentes (pour les mesures quantitatives, rappelons-nous que le RSH est principalement approximatif).

La CC comprend toutes les informations spatiales (orientation et position) relatives aux différents objets qui la constituent (objets-supports et objets-repères). Elle

comprend aussi l'information nécessaire à l'établissement et à la manipulation des zones de voisinage de ces différents objets. Une base de données descriptive est associée à cette CC pour représenter les informations descriptives nécessaires telles que la couleur des objets, leur nom, leur usage social, etc..

Les objets-supports que contient la CC représentent les endroits où le PV peut se déplacer. Nous distinguons dans notre application deux sortes d'objets-supports :

**Les Chemins Intermédiaires (CI)** qui représentent les principaux endroits où le PV peut se déplacer (autoroutes, routes, allées, ruelles, etc.), et,

**Les Objets Traversables (OT)** (ronds-points, parcs, etc.) qui représentent des endroits où le PV peut aussi se déplacer mais qui ont plusieurs particularités, notamment, ils peuvent prendre n'importe quelle forme graphique (à l'opposé des chemins), ils sont souvent à l'intersection de chemins et peuvent aussi être utilisés comme repères pour le PV.

Nous pensons que la représentation de l'environnement urbain d'un piéton virtuel par le biais de CC, respecte les éléments structurels mentionnés dans l'étude de Gryl [Gryl 1995]. Nous pouvons donc conclure que ce type de représentation est cognitivement plausible et est en concordance avec le processus de description d'itinéraire de l'être humain.

#### 4.3. Caractéristiques de l'application développée

GRAAD permet la génération automatique des zones de voisinage et d'orientation des différents objets spatiaux de la CC. Une de ses fonctions de base est celle qui consiste à tester si un point Q se trouve dans une zone quelconque de la CC. Nous avons profité de la capacité *analogique* qu'offre cette fonction pour implanter diverses relations spatiales telles que le voisinage et l'orientation. Nous avons, par la suite, utilisé les techniques de transformation des relations de voisinage et d'orientation que nous avons déjà présentées pour implanter les relations topologiques. Finalement, nous avons exploité ces relations topologiques afin de pouvoir disposer, en tout moment, des spécifications nécessaires à la description d'itinéraire.

Pour mieux comprendre ces différentes étapes, il est nécessaire d'introduire quelques définitions formelles. Etant donnée une carte conceptuelle CC et un chemin intermédiaire Clx, considérons les trois ensembles<sup>2</sup> suivants:

---

<sup>2</sup> Les noms de ces ensembles signifient: ORP pour Objets Repères Proches, ICI pour Intersections avec Chemins Intermédiaires, IOT pour Intersection avec Objets Traversables.

1- **ORP(Clx, CC)** représentant les objets-repères  $O_i$  contenus dans CC dont la zone de voisinage a une intersection non vide avec Clx:

$$(\forall O_i \in \text{ORP}(\text{Clx}, \text{CC})) (ZV_p(O_i) \cap \text{Clx} \neq \emptyset).$$

2- **ICI(Clx, CC)** représentant les chemins intermédiaires  $Cly$  contenus dans CC ayant une intersection non vide avec Clx (cette intersection est notée  $\text{INT}(\text{Clx}, \text{Cly})$ ):

$$(\forall \text{Cly} \in \text{ICI}(\text{Clx}, \text{CC})) (\text{INT}(\text{Clx}, \text{Cly}) \neq \emptyset).$$

3- **IOT(Clx, CC)** représentant les objets traversables  $\text{OT}_y$  contenus dans CC ayant une intersection non vide avec Clx (cette intersection est notée  $\text{INT}(\text{Clx}, \text{OT}_y)$ ):

$$(\forall \text{OT}_y \in \text{IOT}(\text{Clx}, \text{CC})) (\text{INT}(\text{Clx}, \text{OT}_y) \neq \emptyset).$$

Avec ces trois ensembles, on peut diviser la portion du chemin intermédiaire Clx contenu dans CC en plusieurs segments  $\text{Cl}_{x[k]}$  (voir figure 7) tels que un et un seul des cas suivants est vrai:

**Cas 1** —  $\text{Cl}_{x[k]}$  contient au moins un objet repère:

$$(\exists O_i \in \text{ORP}(\text{Clx}, \text{CC})) (ZV_p(O_i) \cap \text{Clx} = \text{Cl}_{x[k]});$$

**Cas 2** —  $\text{Cl}_{x[k]}$  est un carrefour (intersection) de chemins:

$$(\exists \text{Cly} \in \text{ICI}(\text{Clx}, \text{CC})) (\text{Cly} \cap \text{Clx} = \text{Cl}_{x[k]});$$

**Cas 3** —  $\text{Cl}_{x[k]}$  a une intersection avec un objet traversable:

$$(\exists \text{OT}_z \in \text{IOT}(\text{Clx}, \text{CC})) (\text{OT}_z \cap \text{Clx} = \text{Cl}_{x[k]});$$

**Cas 4** —  $\text{Cl}_{x[k]}$  est une intersection entre des chemins qui traversent Cl et la ZV de l'un ou plusieurs objets-repères;

**Cas 5** —  $\text{Cl}_{x[k]}$  est une intersection entre Clx, un objet traversable et la ZV d'un ou plusieurs objets-repères;

**Cas 6** —  $\text{Cl}_{x[k]}$  est un segment non remarquable qui n'appartient à aucun des trois ensembles que nous avons définis:

$$(\forall O_i \in \text{ORP}(\text{Clx}, \text{CC})) (ZV_p(O_i) \cap \text{Cl}_{x[k]} = \emptyset) \text{ ET}$$

$$(\forall \text{Cly} \in \text{ICI}(\text{Clx}, \text{CC})) (\text{Cly} \cap \text{Cl}_{x[k]} = \emptyset) \text{ ET}$$

$$(\forall \text{OT}_z \in \text{IOT}(\text{Clx}, \text{CC})) (\text{OT}_z \cap \text{Cl}_{x[k]} = \emptyset).$$

Dans la figure 6a, nous présentons la portion de la carte de Paris autour de la rue Danton en mettant en relief les différents segments appartenant à l'une ou à l'autre de ces six catégories. Dans la figure 6b, nous identifions chacun de ces segments en lui accordant un nom significatif et distinctif.

Un itinéraire  $I_{A,B}$  joignant deux points A et B, situés dans un objet traversable  $\text{OT}_{u1}$  ou dans une portion de chemin intermédiaire  $\text{Cl}_{u1[m]}$ , sera donc formé d'une succession de portions de Cl et/ou d'OT contiguës. Nous dénotons  $\text{PCI}(I_{A,B}, \text{CC})$  l'ensemble des portions (segments) de chemins intermédiaires formant l'itinéraire

$I_{A,B}$  et,  $\text{OT}(I_{A,B}, \text{CC})$  l'ensemble de tous les objets traversables appartenant à ce même itinéraire.

L'itinéraire  $I_{A,B}$  peut maintenant être représenté par l'ensemble des segments  $I_{A,B[k]}$  ( $k=1$  à  $p$ ) tel que:

$$(\exists ux) (\exists q) (\text{Cl}_{ux[q]} \in \text{PCI}(I_{A,B}, \text{CC}) \text{ ET } I_{A,B[k]} = \text{Cl}_{ux[q]})$$

$$\text{OU } (\exists uy) (\text{OT}_{uy} \in \text{OT}(I_{A,B}, \text{CC}) \text{ ET } I_{A,B[k]} = \text{OT}_{uy})$$

Avec ces définitions, nous disposons de tous les éléments nécessaires et suffisants pour décrire chaque segment de l'itinéraire en langage naturel. La section qui suit expose les détails.

#### 4.4. Utilisation du formalisme proposé pour la génération de DI

Pour modéliser les mouvements du PV, nous devons tenir compte des caractéristiques spatio-temporelles de sa trajectoire de mouvement. Cette trajectoire est formée des différents points de déplacement du PV dans la CC. Ces points de déplacement se produisent successivement et sont donc relatifs à différents instants dans le temps ( $t_1, t_2, \dots, t_n$ ). Nous dénotons  $\text{Pos}(\text{PV}, t_c)$  la position du PV à l'instant  $t_c$ .

À chaque position  $\text{Pos}(\text{PV}, t_c)$  est associée une orientation définie du piéton virtuel. Nous dénotons cette orientation  $\text{Orient}(\text{PV}, t_c)$ .

Étant donnée une séquence d'instantanés  $\{t_1, \dots, t_n\}$  utilisée pour décrire les portions d'un itinéraire  $I_{A,B}$ , nous pouvons, à l'aide notre formalisme, spécifier les mouvements du PV sous forme d'expressions verbales similaires à celles utilisées par les être humains pour produire des descriptions d'itinéraires. Le tableau<sup>3</sup> 2 présente quelques expressions fréquemment utilisées<sup>4</sup> :

<sup>3</sup> Dans ce tableau nous utilisons les conventions suivantes:

- ⟨ **Orient**( $\text{Cl}_{i[x]}$ ,  $k$ ) représente l'orientation de la portion  $\text{Cl}_{i[x]}$  de l'itinéraire décrit dans la direction  $k$  du chemin Cl. Étant donné qu'un chemin est intrinsèquement associé à deux direction opposées, nous considérons que la succession  $\text{Cl}_{i[x]}, \text{Cl}_{i[x+1]}, \dots, \text{Cl}_{i[x+n]}$  définit la direction ( $\text{Cl}_{i[x]}$ , 1) et que la succession  $\text{Cl}_{i[x]}, \text{Cl}_{i[x-1]}, \dots, \text{Cl}_{i[x-n]}$  définit la direction ( $\text{Cl}_{i[x]}$ , -1);
- ⟨ **Int**<sub>OT</sub> dénote la zone intérieure de l'objet traversable OT.

<sup>4</sup> Nous couvrons ici les quatre catégories d'expressions verbales utilisées par les êtres humains pour décrire une route [Gryl 1995], à savoir, les mouvements de progression, les changements d'orientation, les localisations individuelles et les localisation d'un référent.

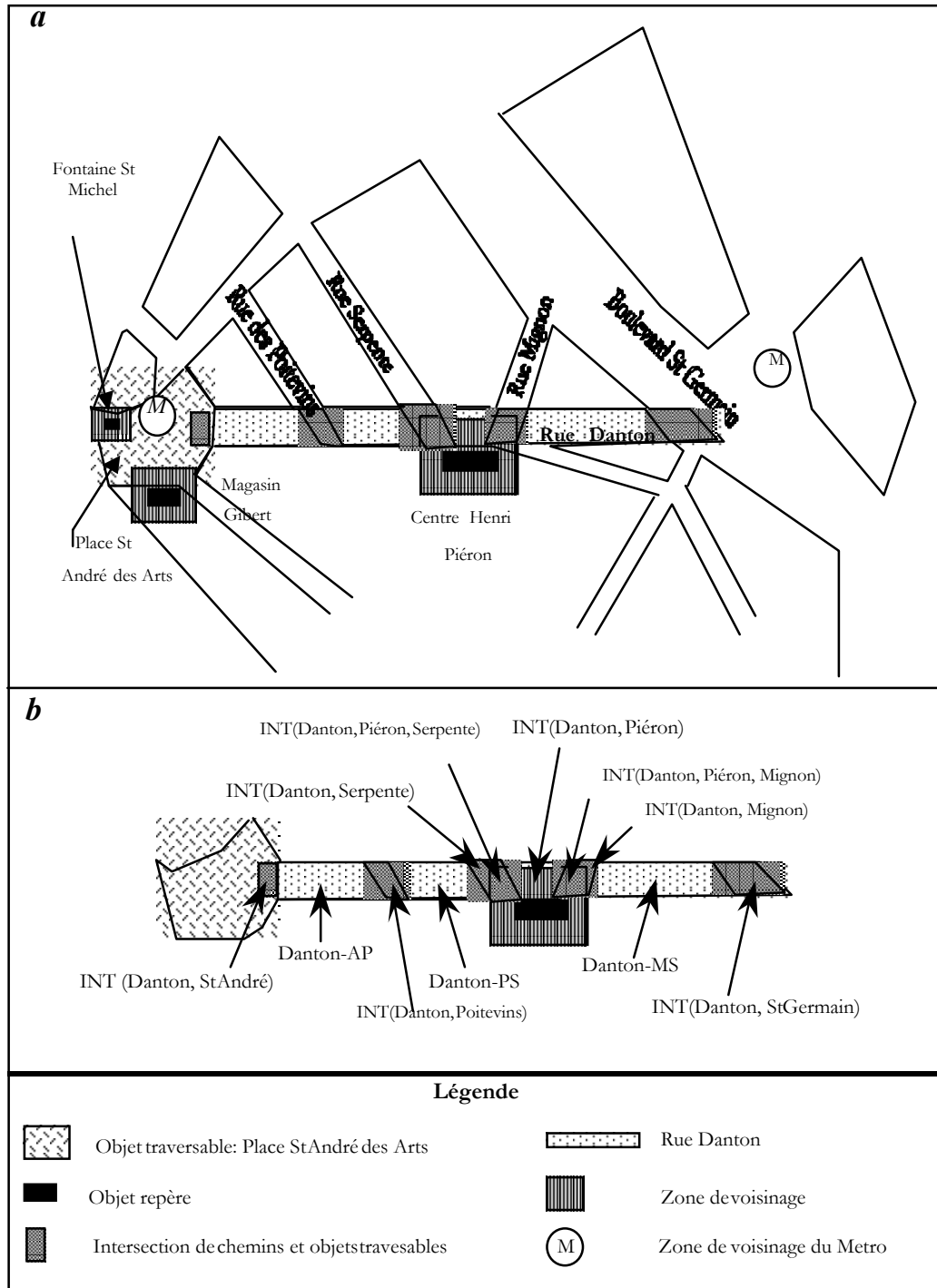


Figure 6 — Partition de la carte conceptuelle en différents segments pré définis

**Le cas 1** de ce tableau correspond à un mouvement d'avancement. À la position initiale (au temps  $t_{c-1}$ ), le PV est dans un segment de chemin intermédiaire  $Cl_{i[x]}$  avec l'orientation  $Orient(Cl_{i[x]}, k)$ . La position courante (au temps  $t_c$ ) du PV est le segment subséquent à  $Cl_i$  dans la même direction  $k$ . Si  $n=0$ , le PV est dans la même portion de chemin intermédiaire, si  $n>0$ , le PV est dans

le segment  $Cl_{i[x+n]}$  dans la direction  $k=+1$ , si  $n<0$ , le PV est dans le segment  $Cl_{i[x-n]}$  dans la direction  $k=-1$ .

**Le cas 2** correspond à un mouvement d'avancement avec le but de joindre l'objet repère  $O_c$ . Cela signifie qu'il y a une position future (au temps  $t_{c+n}$ ) où le PV sera à l'intersection de la portion  $Cl_{i[y]}$  et la zone de voisinage de l'objet  $O_c$   $ZV(O_c)$ .

**Le cas 3** correspond à un PV qui traverse l'intersection entre les chemins intermédiaires  $Cl_i$  et  $Cl_j$  sans changer d'orientation:  $Orient(VP, t_c) = Orient(Cl_{i[x]}, k)$ . La traversée de l'intersection est indiquée par le changement de position du PV de  $Cl_{i[x-e]}$  à  $Cl_{i[x]}$  et  $Cl_{i[x+e]}$ , avec  $e = +1$  ou  $e = -1$ .

**Le cas 4** correspond à un PV se trouvant à l'intersection des chemins intermédiaires  $Cl_i$  and  $Cl_j$  et qui change son orientation pour suivre  $Cl_j$  dans sa portion  $Cl_{j[y+e]}$ , avec  $e = +1$  ou  $e = -1$ .

**Le cas 5** correspond à une forme de localisation individuelle où la position courante du PV (au temps  $t_c$ ) est dans la zone de voisinage de l'objet repère  $O_c$ , avec la même orientation précédente (au temps  $t_{c-1}$ ).

**Le case 6** correspond à un PV dont la position courante (au temps  $t_c$ ) est en face de la sous zone d'influence "devant" de l'objet repère  $O_c$  avec la même orientation précédente (au temps  $t_{c-1}$ ).

**Le cas 7** correspond à un piéton virtuel qui se trouve à l'intérieur d'un OT.

Pour illustrer cette procédure de génération de description d'itinéraire par le biais de notre formalisme, nous présentons d'abord, dans la figure 7, les points saillants du déplacement d'un PV pour aller du carré St André à la rue Mignon ainsi que les différentes trajectoires qu'il a prises et, par la suite, nous donnons la correspondance en langage naturel dans le tableau 3.

Tableau 2 — Présentation de quelques expressions de DI en utilisant le formalisme proposé

Expressions verbales	Positions du PV	Orientations du PV
<b>Continuer comme ça</b>	Précédente: $Pos(PV, t_{c-1}) \in Cl_{i[x]}$ Courante : $Pos(PV, t_c) \in Cl_{i[x+n]}$ $n$ est un entier positif ou négatif ou nul	Précédente : $Orient(PV, t_{c-1}) = ORIENT(Cl_{i[x]}, k)$ Courante : $Orient(PV, t_c) = ORIENT(Cl_{i[x+n]}, k)$ $n$ est un entier positif ou négatif ou nul
<b>Aller à jusqu'à <math>O_c</math></b>	Courante: $Pos(PV, t_c) \in Cl_{i[x]}$ Future:( $\exists n$ ) ( $\exists j$ ) ( $\exists y$ ) ( $ZV_p O_c \cap Cl_{j[y]}$ )? $\emptyset$ ET $Pos(PV, t_{c+n}) \in (ZV_p O_c \cap Cl_{j[y]})$	Courante : $Orient(PV, t_c) = ORIENT(Cl_{i[x]}, k1)$ Future : $Orient(PV, t_{c+n}) = ORIENT(Cl_{j[y]}, k2)$
<b>Traverser <math>Cl_j</math></b>	Précédente: $Pos(PV, t_{c-1}) \in Cl_{i[x-e]}$ avec $e=+1$ ou $e=-1$ Courante: $Pos(PV, t_c) \in Cl_{i[x]} \cap Cl_{j[y]}$ Prochaine: $Pos(PV, t_{c+1}) \in Cl_{i[x+e]}$	Précédente: $Orient(PV, t_{c-1}) = ORIENT(Cl_{i[x-e]}, k)$ avec $e = +1$ ou $e = -1$ Courante: $Orient(PV, t_c) = ORIENT(Cl_{i[x]}, k)$ Prochaine: $Orient(PV, t_{c+1}) = ORIENT(Cl_{i[x+e]}, k)$
<b>Tourner sur <math>Cl_j</math></b>	courante: $Pos(PV, t_c) \in Cl_{i[x]} \cap Cl_{j[y]}$ Prochaine: $Pos(PV, t_{c+1}) \in Cl_{j[y+e]}$ avec $e = +1$ ou $e = -1$	Courante: $Orient(PV, t_c) = ORIENT(Cl_{i[x]}, k1)$ Suivante : $Orient(PV, t_{c+1}) = ORIENT(Cl_{j[y+e]}, k2)$ Avec $e = +1$ ou $e = -1$
<b>Arriver à <math>O_c</math></b>	courante: $Pos(PV, t_c) \in ZV_p O_c$	Courante: $Orient(PV, t_c) = Orient(PV, t_{c-1})$
<b>Être en face de <math>O_c</math></b>	courante: $Pos(PV, t_c) \in ZV_p O_{cDevant}$	Courante: $Orient(PV, t_c)$ non spécifiée
<b>Être dans OT</b>	courante: $Pos(PV, t_c) \in Int_{OT}$	Courante: $Orient(PV, t_c)$ non spécifiée

Tableau 3 — Expression en langage naturel de la position et de l'orientation du PV.

	Position du PV	Orientation du PV	Correspondance en langage naturel
$t_0$	$Pos(PV, t_0) \in Int_{Place-St-André}$	$Orient(PV, t_0)$	Vous êtes sur la place St André
$t_1$	$Pos(PV, t_1) \in Cl_{Danton [AP]}$	$Orient(PV, t_1) = ORIENT(Cl_{Danton [AP]}, 1)$	Continuer sur la rue Danton
$t_2$	$Pos(PV, t_2) \in Cl_{Danton [PO]} \cap Cl_{Poitevins [DA]}$	$Orient(PV, t_2) = ORIENT(Cl_{Danton [PO]}, 1)$	Traverser la rue Poitevins
$t_3$	$Pos(PV, t_3) \in Cl_{Danton [SE]} \cap Cl_{Serpente [DA]}$	$Orient(PV, t_3) = ORIENT(Cl_{Danton [SE]}, 1)$	Traverser la rue Serpente
$t_4$	$Pos(PV, t_4) \in CT_{Centre-Henri-Piéron, front}$	$Orient(PV, t_3) = ORIENT(Cl_{Danton [SE]}, 1)$	Vous êtes en face du Centre Piéron
$t_5$	$Pos(PV, t_5) \in Cl_{Danton [MI]} \cap Cl_{Mignon [DA]}$	$Orient(PV, t_5) = Orient(Cl_{Mignon [DA]}, 1)$	Tourner sur la rue Mignon
$t_6$	$Pos(PV, t_6) \in Cl_{Mignon [DS]}$	$Orient(PV, t_1) = ORIENT(Cl_{Mignon [DS]}, 1)$	Suivre la rue Mignon

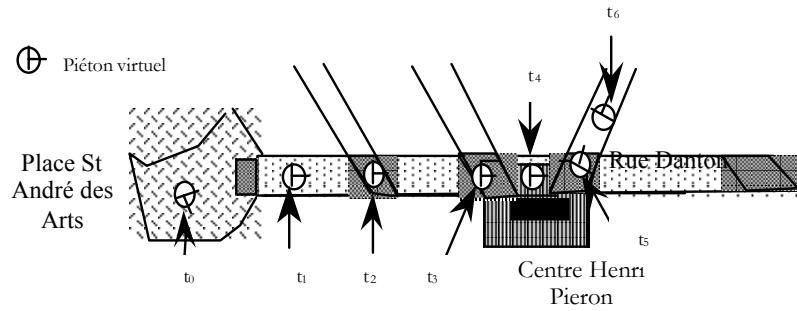


Figure 7 — points saillants du déplacement d'un piéton virtuel

L'application que nous venons de décrire est une validation de notre modèle au niveau cognitif et au niveau computationnel. Au niveau cognitif, elle démontre que le modèle que nous proposons peut s'adapter à plusieurs situations et simuler de façon plausible et fonctionnelle le raisonnement d'un être humain placé dans un environnement et dans des conditions similaires. Au niveau computationnel, et grâce au prototype réalisé, cette application montre la possibilité d'implanter le modèle conceptuel et de réaliser d'autres prototypes relatifs à d'autres domaines tels que le dessin assisté par ordinateur, les SIG, etc..

### 5. Validation du modèle proposé

Pour la validation de notre modèle, nous procéderons en deux étapes: d'abord une validation des résultats (output) du système GRAAD et, par la suite, une validation générale du modèle spatial proposé.

La phase de validation des résultats du système (i.e. les descriptions d'itinéraire qu'il produit), consiste à réaliser une expérience à échelle réduite sur une population de douze (12) individus. Nous demanderons à ces individus de nous fournir une Description d'Itinéraire (DI) pour joindre deux points préétablis dans la carte conceptuelle. Nous ferons de même avec le système GRAAD. Il s'agira principalement, par la suite, de comparer les descriptions produites par le système et celles des individus. Les conclusions de l'expérience dépendront des résultats constatés lors de ces comparaisons. Ainsi, si les DI fournies par GRAAD sont non distinguables de celles des individus, cela voudrait dire que les deux types de DI sont semblables. On pourra alors conclure que le système génère des DI équivalentes à celles produites par des êtres humains. Ceci prouvera expérimentalement la validité des résultats du système GRAAD et nous permettra de poursuivre la phase suivante du plan de validation.

La deuxième phase de validation du modèle sera plus minutieuse et concernera le cadre théorique. Elle nous permettra en fait de valider la plausibilité cognitive de notre modèle et du concept de zone d'influence.

Nous allons ainsi soumettre le modèle à des experts en sciences cognitives et travaillerons avec eux à démontrer que la validité des DI produites par GRAAD est le résultat de la plausibilité cognitive du modèle conceptuel sur lequel il est bâti. À cet effet, nous reprendrons les travaux de certains chercheurs qui invoquent - de façon non explicite - la notion de zone d'influence et essayerons de la raffiner et de mieux la définir dans notre modèle. Pour cela, nous tiendrons compte de différents paramètres sous-jacents à l'utilisation de la zone d'influence dans le raisonnement spatial de l'être humain, notamment, sa dimension, son uniformité et son évolution selon les objets présents dans la scène spatiale.

Actuellement, l'implantation du système GRAAD est dans sa phase finale. Nous nous préparons à entamer la première phase de la validation. Nous travaillons en étroite collaboration avec des chercheurs en psychologie cognitive pour réaliser adéquatement notre expérience et pour valider et analyser les résultats obtenus.

### 6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un modèle qualitatif spatial qui s'inspire des processus cognitifs engagés par l'être humain pour raisonner à propos de l'espace. L'élément moteur du modèle proposé est la zone de voisinage qu'il faut construire autour de chaque objet du plan spatial. Cette notion permet de redéfinir de façon intuitive les différents éléments intervenant lors de l'élaboration d'un modèle spatial (i.e., la topologie, la distance et l'orientation). Elle permet donc de disposer des éléments nécessaires et suffisants pour effectuer un raisonnement spatial qualitatif.

Le modèle proposé respecte tous les critères élaborés par Freksa [Freksa 1991] et Hernández [Hernández 1994] pour l'établissement d'un modèle spatial qualitatif (voir section 2). Il se démarque, cependant, de la plupart des modèles existants par plusieurs caractéristiques, notamment, sa plausibilité cognitive, sa complétude, son homogénéité et son caractère computationnel.

D'abord, en ce qui a trait à la plausibilité cognitive, nous pouvons dire qu'elle est la conséquence des bases cognitives sur lesquelles le modèle est bâti. C'est aussi le résultat de la correspondance quasi naturelle qui existe entre le concept de zone d'influence (aspect cognitif) et celui de zone de voisinage (aspect computationnel). La plupart des modèles spatiaux qualitatifs existants accorde peu d'attention à l'aspect cognitif et visent principalement à faire ressortir l'aspect qualitatif. Pour cela, ils utilisent exclusivement la logique et les mathématiques. Nous pensons qu'en procédant ainsi, ces modèles ne reflètent pas réellement le raisonnement spatial de l'être humain qui, par définition, est intuitif et spontané. Par conséquent, malgré leur caractère qualitatif, ces modèles sont trop complexes et difficiles à comprendre en comparaison avec le modèle que nous proposons. Les fondements cognitifs et intuitifs de ce dernier rendent, en fait, son explication facile et presque évidente.

Concernant la complétude, nous pouvons affirmer que notre modèle est presque le seul<sup>5</sup> à considérer et à définir de façon qualitative et explicite le concept de voisinage. La plupart des modèles qualitatifs existants ignore ce concept et se base exclusivement sur la connexion des objets spatiaux pour simuler les relations de voisinage. Or, nous pensons que les relations de voisinage sont à la base du raisonnement spatial qualitatif. Il est donc nécessaire de les définir clairement, à défaut de quoi, la complétude du modèle peut être mise en cause.

Par ailleurs, nous constatons que le modèle proposé est homogène. Cela signifie, qu'il se base sur un seul concept, celui de la zone de voisinage, pour définir tous les éléments nécessaires à l'élaboration d'un modèle spatial (la topologie, l'orientation et la distance). Or, la plupart des recherches en modélisation spatiale que nous connaissons (voir section 2), ne s'intéresse qu'à l'un ou à l'autre de ces éléments. Ils sont donc spécifiques et ne sont pas nécessairement extensibles aux autres éléments. Dans ce cas, pour aboutir à un modèle spatial général, il est nécessaire de procéder à une fusion d'éléments pris de différents modèles.

Ceci peut créer, à notre avis, des modèles hétérogènes et non intégrés.

Finalement, nous pensons que l'un des points forts de notre modèle est son caractère computationnel. Nous avons implanté un prototype du modèle proposé afin de nous assurer de sa faisabilité et de son efficacité computationnelles. Les tests que nous menons actuellement sur une des applications du

modèle, le système GRAAD, prouvent son efficacité et sa capacité d'adaptation au contexte courant de raisonnement spatial. Nous envisageons ainsi d'implanter une version plus évoluée de GRAAD qui lui permettrait de réaliser plusieurs tâches telles que la recherche d'itinéraire, l'identification des objets et l'analyse spatiale.

## Bibliographie

[Allen 1983] J. F. Allen, *Maintaining knowledge about temporal intervals*, Communications of the ACM, volume 26, no. 11, 1983.

[Clementini et al. 1997] E. Clementini, O. Di Felice, D. Hernández, *Qualitative representation of positional information*, 1997.

[Computational Intelligence 1993] *Computational Intelligence*, volume 9, number 4, Blackwell Publishers, November 1993.

[Denis 1989] M. Denis, *Image et Cognition*, Presses Universitaires de France, Paris 1989.

[Edwards, Moulin 1995] G. Edwards, B. Moulin, *Towards the simulation of Spatial mental Images Using the Voronoï Model*, Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, Montréal 1995.

[Egenhofer, Franzosa 1991] M.J. Egenhofer, R. Franzosa, *Point-set topological spatial relations*, International Journal of Geographical Information systems, volume no. 2, pp.161-174, 1991.

[Evans 1968] T. G., *A heuristic program to solve geometric analogy problems*, In M. Minsky., editor, *Semantic Information Processing*, The MIT Press 1968.

[Fraczak 1994] : L. Fraczak, *De la description au croquis*, Mémoire de DEA, Université Paris 11, 1994.

[Freksa 1991] C. Freksa, *Qualitative spatial reasoning*, In *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space*, by D. M. Mark and A. U. Frank, pp. 361-372, NATO advanced Studies Institute, 1991.

[Freksa, Zimmermann 1992] C. Freksa, K. Zimmermann, *On the utilization of spatial structures for cognitively plausible and efficient reasoning*, In Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Chicago 1992.

[Glasgow 1993] J. Glasgow, *The Imagery Debate Revisited: A Computational Perspective*, In *Computational Intelligence*, pp. 309-333, volume 9, number 4, Blackwell Publishers, November 1993.

[Golledge, Zannaras 1973] R.G. Golledge and G. Zannaras, *Cognitive approaches to the analysis of human spatial behaviour*, In W. Ittelton (ed.), *Environmental Cognition*, Seminar Press, pp. 59-94, New York 1973.

---

<sup>5</sup> Le modèle Voronoï définit aussi explicitement le concept de voisinage mais il possède des inconvénients intrinsèques et inadaptés au RSH.

[Gryl 1995] A. Gryl, *Analyse et modélisation des processus discursifs mis en œuvre dans la description d'itinéraires*, Thèse de Doctorat d'Université en Sciences Cognitives, LIMSI-CNRS, Université Paris-XI, Orsay 1995.

[Güting 1988] R. Güting, *Geo-relational algebra: A model and query language for geometric database systems*, in EDBT-88 conference, pp. 506-527, Springer, Berlin 1988.

[Hernández 1994] D. Hernández, *Qualitative Representation of Spatial Knowledge*, Springer-Verlag 1994.

[Haar 1976] R. Haar, *Computational models of spatial relations*, Technical report TR-478 MCS-72-0361-10, Dept. Of Computer Science, University of Maryland 1976.

[Johnson-Laird 1983] P. N. Johnson-Laird, *Mental Models*, Harvard University Press 1983.

[Kosslyn 1980] S.M. Kosslyn, *Image and Mind*, Harvard University Press 1980.

[Kuipers 1984] B.J. Kuipers, *Commonsense reasoning about causality*, Artificial Intelligence, volume 24, pp. 169-204, 1984.

[Lynch 1960] K. Lynch, *The Image in the City*, The MIT Press 1960.

[MacNamara 1986] J. MacNamara, *Mental representation of spatial relations*, Cognitive Psychology, volume 18, pp. 87-118, 1986.

[Moulin, Gryl, Kettani 1997] B. Moulin, A. Gryl et D. Kettani, *Route Descriptions Based on the Notions of Spatial Conceptual Map and of Object's Influence Areas*, AAAI Workshop on Spatial and Temporal Reasoning, Rhode Island 1997.

[Mukerjee, Joe 1990] A. Mukerjee, G. Joe, A qualitative model for space. In proceedings of 8<sup>th</sup> National Conference on Artificial Intelligence, The AAAI Press/The MIT 1990.

[Retz-Schmidt 1988] S. Retz-Schmidt, Various views on spatial prepositions, AI Magazine, volume 9, no. 2, 1988.

[Tversky 1993] B. Tversky, Cognitive maps, cognitive collages and spatial mental models, in A. U. Frank and I. Campari (eds.), *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS*, pp. 14-24, Springer Verlag 1993.

[Zimmermann 1995] K. Zimmermann, Measuring without Measures. The  $\Delta$ -Calculus, Proceedings of the International Conference COSIT '95, Semmering, Austria, Springer 1995

## Annexe

L'architecture que nous proposons, comprend quatre agents qui interagissent entre eux en vue de résoudre une problématique spatiale spécifique (guidage, requête d'information, localisation, etc.) soumise par l'utilisateur.

L'agent AIA s'occupe de tous les aspects Interaction et Affichage des cartes conceptuelles. Il permet d'abord

à l'utilisateur de dessiner (construire) une carte à l'écran représentant la scène spatiale sur laquelle il veut travailler. Cette carte représente sous une forme computationnelle l'image mentale qu'a l'utilisateur du plan spatial observé. Nous l'appelons carte conceptuelle. L'AIA possède toutes les capacités d'un outil de dessin traditionnel et, de plus, il permet de manipuler (récupérer, modifier, mettre à jour, etc.) des IC plutôt que des objets spatiaux conventionnels (point, lignes, carré, etc.).

L'AIA gère principalement deux types de requêtes:

**Le premier type de requête** est relatif à la construction de la CCCA (Carte Conceptuelle du Contexte Actuel) en tant que telle. À cet effet, l'IAI se sert de l'accumulation<sup>6</sup> "Librairie des IC" qui comprend toutes les données relatives aux IC et met à jour l'accumulation CCCA afin qu'elle contienne, en tout moment, toutes les données décrivant la configuration actuelle de la carte conceptuelle telle que dessinée par l'utilisateur.

**Le deuxième type de requête** regroupe l'ensemble des fonctions mises à la disposition de l'utilisateur et qui concernent la résolution du problème proprement dite. Il utilise l'accumulation "RS" (Requêtes Spatiales) pour transférer les requêtes à l'agent ARTSS (Agent de Résolution d'une Tâche Spatiale Spécifique) et l'accumulation "RRS" (Réponses aux Requêtes Spatiales) pour recevoir les réponses à ces requêtes. L'agent AGPS (Agent de Gestion des primitives spatiales) travaille continuellement en arrière plan. Il gère les différentes primitives spatiales du modèle ( $P_1, P_2, \dots$ ) et les applique, s'il y a lieu, sur l'accumulation des données relatives à la CCCA (Carte Conceptuelle du Contexte Actuel) qui contient toutes les données (topologique et descriptives) décrivant la configuration actuelle de l'IC que l'utilisateur a construit. Par la suite, l'agent AGPS met à jour l'accumulation CCCA-T (CCCA Transformée) qui contient toutes les données relatives à la configuration actuelle de l'IC modifiée par l'application des primitives spatiales.

L'agent ARTSS (Agent de Résolution d'une Tâche Spatiale Spécifique) est responsable de la résolution des requêtes relatives à la tâche spatiale actuelle soumises par l'utilisateur. Il applique ses propres procédures de résolution (PSTC<sub>x</sub> dans l'architecture: Procédures Spécifiques à la Tâche Courante) sur l'accumulation des données décrivant la CCCA-T. Par exemple, l'ARTSS peut résoudre des requêtes spatiales relatives à l'optimisation de parcours, à la

---

<sup>6</sup> En Informatique, on utilise souvent le mot accumulation pour désigner le dépôt où seront stockées les données pour des traitements éventuels. Généralement, les accumulations correspondent à des fichiers ou à des bases de données.

recherche d'itinéraires ou à l'identification des objets spatiaux.

L'agent AMLIC "Agent de Maintenance de la Librairie des Images Conceptuelles" s'occupe d'enrichir la librairie des IC dont dispose le système. Il s'active à chaque fois où l'utilisateur construit un nouvel objet spatial par les mécanismes d'agrégation spatiale. Il utilise l'accumulation "Librairie des IC" pour mémoriser les spécifications du nouvel objet. Cette accumulation est aussi utilisée par l'opérateur du système pour construire des nouveaux objets spatiaux.

L'architecture proposée distingue clairement entre deux types de traitements: *le premier type est relatif à la tâche spécifique courante* (recherche d'itinéraire, recherche d'un objet, comparaisons entre objets, etc.). Il regroupe l'ensemble de traitements computationnels

normalement requis pour la réalisation de cette tâche.

*Le deuxième type de traitements regroupe l'ensemble de primitives spatiales* que nous développées dans notre modèle telles que l'établissement des zones de voisinage, l'évaluation des distance, la décomposition du plan en différents zones d'orientation, etc. Ce type de traitements permet de transformer les images graphiques traditionnelles sous forme d'images conceptuelles ayant une définition qualitative de la topologie, de l'orientation et de la distance. Nous pensons que cette distinction entre les traitements locaux de la tâche courante et ceux relatifs à notre modèle permet à l'architecture proposée d'être ouverte et adaptable à plusieurs situations de résolution de problèmes spatiaux.

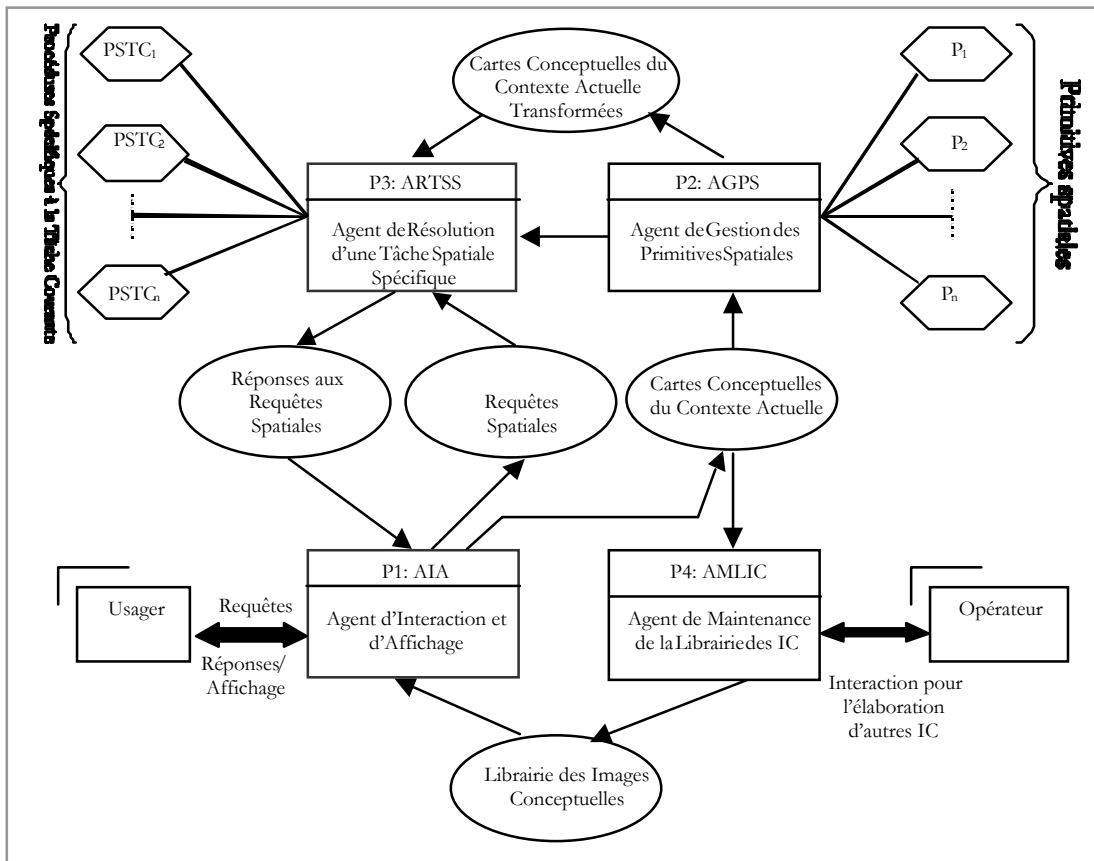


Figure 8 — Architecture du système GRAAD

