



HAL
open science

Description d'itinéraire en milieu naturel : modèle intégré de description verbale et de représentation spatiale au sein des systèmes d'information géographique

David Brosset

► To cite this version:

David Brosset. Description d'itinéraire en milieu naturel : modèle intégré de description verbale et de représentation spatiale au sein des systèmes d'information géographique. domain_stic. Arts et Métiers ParisTech, 2008. Français. NNT : 2008ENAM0028 . pastel-00004345

HAL Id: pastel-00004345

<https://pastel.hal.science/pastel-00004345>

Submitted on 5 Dec 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Informatique"

*présentée et soutenue publiquement
par*

David BROSSET

le 14 novembre 2008

**DESCRIPTION D'ITINÉRAIRE EN MILIEU NATUREL :
MODÈLE INTÉGRÉ DE DESCRIPTION VERBALE ET DE
REPRÉSENTATION SPATIALE AU SEIN DES SIG**

Directeur de thèse : Christophe CLARAMUNT

Co-encadrement de la thèse : Eric SAUX

Jury :

Mlle Florence SÈDES , Professeur, IRIT, Toulouse.....	Présidente
M. Bernard ESPINASSE , Professeur, INCOD, Aix-Marseille.....	Rapporteur
M. Gérard LIGOZAT , Professeur, LIMSI, Orsay.....	Rapporteur
Mme Françoise GOURMELON , Directrice de Recherche, GEOMER, Brest.....	Examinatrice
M. Christophe CLARAMUNT , Professeur, IRENav, Ecole Navale, Lanvéoc.....	Examinateur
M. Eric SAUX , Maître de Conférences, IRENav, Ecole Navale, Lanvéoc.....	Examinateur

Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés
ENSAM, CER de Paris

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	ix
Introduction	1
Origine et rôle des itinéraires	2
L'étude des descriptions d'itinéraires : au carrefour de plusieurs sciences . . .	4
Objectif et motivation de la recherche	6
Organisation du manuscrit	6
I Principes de perception et de description d'itinéraire	9
I.1 Mécanismes de perception d'une description d'itinéraire	10
I.1.1 Les espaces mentaux	10
I.1.2 Navigation et cognition spatiale	12
I.2 Production de description d'itinéraire	15
I.3 Formes de description d'itinéraire	17
I.4 Description verbale d'itinéraire	20
I.4.1 Structure d'une description d'itinéraire	21
I.4.2 Repères : composantes statiques	24
I.4.3 Actions : composantes dynamiques	28

I.5	Discussion	30
II	Navigations en environnements naturels et urbains	33
II.1	Caractéristiques des environnements de navigation	34
II.2	Navigation en milieu naturel : exemple de la course d'orientation . . .	35
II.2.1	Principes de la course d'orientation	35
II.2.2	Particularités de la carte de la course d'orientation	36
II.2.3	Contexte de l'expérimentation	37
II.2.4	Résultats	39
II.3	Comparaison de navigation en milieux urbains et naturels	42
II.3.1	Classifications cartographiques et ontologies	43
II.3.2	Actions et repères	45
II.4	Discussion	48
III	Modélisation de descriptions d'itinéraires : une approche basée sur les graphes	51
III.1	Itinéraires : représentations actuelles	52
III.1.1	TOUR	53
III.1.2	PLAN	56
III.1.3	Discussion	57
III.2	Modèle formel d'itinéraire	58
III.2.1	Principes du modèle	59
III.2.2	Qualification du modèle	63
III.3	Prototype	65
III.3.1	Implémentation	66
III.3.2	Analyse de descriptions d'itinéraire	68
III.4	Mesures et comparaison de description d'itinéraire	72
III.4.1	Diversité structurelle	72

III.4.2	Richesse structurelle	73
III.4.3	Résultats	74
III.5	Discussion	76
IV	De la modélisation à la géolocalisation	79
IV.1	Optimisation	81
IV.1.1	Catégories de problèmes d'optimisation	82
IV.1.2	Méthodes de résolution	83
IV.2	Algorithmes de colonies de fourmis	89
IV.2.1	Inspiration du monde des fourmis	89
IV.2.2	Métaheuristique pour l'optimisation par colonies de fourmis	91
IV.3	Principes de l'algorithme développé	95
IV.3.1	Initialisation	95
IV.3.2	Exécution	97
IV.3.3	Implémentation	101
IV.3.4	Analyse des résultats	105
IV.4	Évaluation des paramètres de l'algorithme	105
IV.4.1	Performance globale	106
IV.4.2	Influence du nombre de fourmis	107
IV.4.3	Influence du taux d'évaporation	107
IV.4.4	Influence de la distance de visibilité	110
IV.4.5	Influence de la longueur de la description	111
IV.4.6	Evaluation du temps de calcul	111
IV.5	Discussion	112
	Conclusion	115
	Annexes	121

A	Symboles de la course d'orientation	123
B	Descriptions verbales d'itinéraire recueillies lors de l'expérimentation	127
C	Descriptions formelles d'itinéraire recueillies lors de l'expérimentation	131
D	Diagrammes UML	135
D.1	Prototype de modélisation de descriptions d'itinéraires	136
D.2	Prototype de géolocalisation de descriptions d'itinéraires	137
	Bibliographie	139

Liste des figures

1	Symboles aborigènes	2
2	Guerre des Gaules	3
3	Itinéraire de randonnée	4
4	Principaux domaines d'études des descriptions d'itinéraires	5
5	Organisation du manuscrit par chapitre et domaine d'étude	7
I.1	Espaces perçus	12
I.2	Exemples d'image-schemata	14
I.3	Image schema : exemple	15
I.4	Modèles de production de description	16
I.5	Interprétations graphiques possibles	18
I.6	Chorèmes et dynamique de l'espace (Brunet, 1980)	20
I.7	Description graphique et textuelle d'un itinéraire par le site http ://www.mappy.fr	21
I.8	Opération de formulation de Przytula-Machrouh (2004)	24
I.9	Repères : Exemples	25
I.10	Représentations possibles du repère allocentrique	29
I.11	Représentations possibles du repère égocentrique	30
I.12	Modélisations possibles du concept de distance qualitative d'après Hernández <i>et al.</i> (1995)	31

II.1	Végétation et degré de pénétrabilité	37
II.2	Différentes représentations cartographiques	38
II.3	Environnement de l'expérience de navigation	39
II.4	Diversité géométrique dans les descriptions en environnement naturel . .	40
II.5	Catégories contenues dans les descriptions	41
II.6	Termes 2D et 3D	43
II.7	Représentation d'un l'environnement urbain (Maya, 2001)	44
II.8	Diversité géométrique en navigations urbaine et naturelle	46
II.9	Analyse des expériences selon la catégorisation de Denis (1997)	47
II.10	Distribution des repères et des informations métriques le long des descriptions d'itinéraire	49
III.1	Itinéraire : une séquence de points ordonnée	53
III.2	Exemple d'environnement modélisé par TOUR	54
III.3	Du verbal à une description formelle et graphique	67
III.4	Choix du type du repère ou de l'entité spatiale	67
III.5	Analyse de descriptions d'itinéraire	70
III.6	Distance logique et entropie	76
III.7	Mesure de richesse et longueur logique de description d'itinéraire	77
IV.1	Principe général de la recherche d'itinéraire	81
IV.2	Classification des méthodes d'optimisation	84
IV.3	Classification des métaheuristiques (Source : Wikipédia, auteur : Johann Dréo)	85
IV.4	Expériences des doubles ponts	91
IV.5	Processus de sélection des nœuds	96
IV.6	Ensemble des nœuds candidats organisé en couches	98
IV.7	Évaluation de la correspondance d'un arc avec la description	100
IV.8	Solution logicielle	102

IV.9	Environnement modélisé par le prototype	103
IV.10	Interface du prototype : phase d'initialisation	104
IV.11	Exemple de solutions données par l'algorithme	106
IV.12	Valeurs maximales de phéromone δ en fonction du nombre de fourmis Q	108
IV.13	Valeurs maximales de phéromone δ en fonction du taux d'évaporation ρ	109
IV.14	Valeurs moyennes de phéromone δ en fonction du taux d'évaporation ρ .	109
IV.15	Valeurs maximales de phéromone δ en fonction de la distance de visibilité α	110
IV.16	Valeurs maximales de phéromone δ en fonction de la longueur l de la description	111
IV.17	Valeurs maximales de phéromone δ en fonction de la longueur de la des- cription l et du nombre de fourmis Q	112

Liste des tableaux

II.1	Caractéristiques des expérimentations	46
III.1	Modélisation des connaissances initiales	55
III.2	Modélisation d'une description d'itinéraire avec le modèle TOUR	56
III.3	Comparatif des différents modèles	58
III.4	Représentations graphiques des positions ou des actions	61
III.5	Ensemble des segments d'itinéraire élémentaires	62
III.6	Symboles d'orientation et d'élévation	65
III.7	Descriptions verbales et formelles : différences structurelles	69
III.8	Descriptions verbales et formelles : différences d'orientation et d'élévation	71
III.9	Résultats expérimentaux	75
A.1	Classification des symboles par l'IOF	125

Introduction

*L*a notion d'itinéraire est omniprésente au sein de nos activités humaines, à commencer par la vie elle-même qui contient de nombreux déplacements. En effet, que ce soit un parcours scolaire ou professionnel voire sentimental, nous pouvons décrire notre vie comme un itinéraire aux multiples facettes. Une vie commence par un point de départ, notre lieu de naissance, et elle est composée de lieux qui reflètent nos déplacements à différents niveaux de granularité. Un parcours professionnel est un autre exemple d'itinéraire retraçant les différentes institutions et entreprises dans lesquelles nous avons travaillé tout au long de notre vie. Un itinéraire peut s'étaler sur un moment relativement court, sur une journée ou une vie. Une journée de travail peut être représentée par un itinéraire commençant et se terminant au domicile et décrivant l'ensemble des tâches réalisées. Un itinéraire peut également représenter l'ensemble des déplacements professionnels effectués au cours d'une année.

Décrire un itinéraire ou bien le comprendre font partie des tâches humaines quotidiennes qu'il s'agisse de son exécution ou de son analyse à un niveau plus global. Que l'objectif soit d'expliquer ou de comprendre comment se rendre à tel magasin dans une ville, ou bien comment se rendre au bureau d'une personne dans une entreprise par exemple, il s'agit toujours d'un itinéraire. Cette action de déplacement, dont le but est de se rendre dans un lieu précis, est une tâche complexe même si elle semble naturelle, intuitive, et si sa réalisation fait partie des processus où les humains sont relativement performants.

Origine et rôle des itinéraires

Une des plus anciennes représentations d'itinéraires est contenue dans l'art rupestre des aborigènes. Les animaux apparaissent en premier dans leurs peintures, puis les hommes et enfin des cartes vues du ciel. Ces cartes dessinées sont à l'origine l'interprétation d'un itinéraire suivi au cours d'un rêve. La figure 1 identifie quelques exemples d'interprétations possibles de symboles représentant l'espace et retrouvés dans l'art aborigène. Ces derniers offrent une symbolique, simplifiée à l'extrême, de description graphique d'un déplacement, proche d'ailleurs d'une représentation logique.

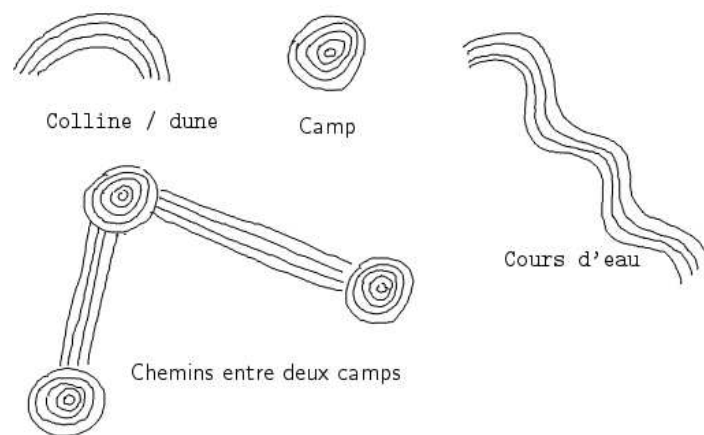


Figure 1 — Symboles aborigènes

Un autre besoin vital où les descriptions d'itinéraires tenaient une place importante, est celui de se défendre et de conquérir de nouveaux territoires. L'ouvrage d'histoire, en sept livres de Jules César, intitulé *Commentarii de Bello Gallico*, commentaires sur la guerre des Gaules, relate les opérations militaires lors de la guerre des Gaules qui se déroula de 58 à 52 avant Jésus-Christ (cf. figure 2). Ces textes contiennent de nombreux itinéraires décrivant les différents mouvements de troupes ainsi que des descriptions de l'environnement : « Une colline toute en pente douce descendait vers la Sambre, cours d'eau mentionné plus haut ; en face, de l'autre côté de la rivière, naissait une pente semblable, dont le bas, sur deux cents pas environ, était découvert, tandis que la partie supérieure de la colline était garnie de bois assez épais pour que le regard y pût difficilement pénétrer. » Livre II paragraphe 18.

Les textes religieux constituent également des recueils d'itinéraires. La bible contient ainsi de multiples itinéraires. L'extrait du Deutéronome, chapitre 1, en est



Figure 2 — Guerre des Gaules

un bon exemple : « Ils partirent, traversèrent la montagne, et arrivèrent jusqu'à la vallée d'Eschol, qu'ils explorèrent. »

Les descriptions d'itinéraires ont de multiples fonctions et utilisations. De nombreux ouvrages décrivent des itinéraires de randonnées pédestres. Les descriptions de milliers de sentiers de randonnée en France sont recensées dans plus de 270 topos-guides (cf. figure 3). Il existe également un nombre important de sites internet dédiés à la randonnée pédestre. L'extrait suivant, provenant du site bretagne-rando.com, illustre l'une de ces descriptions d'itinéraires : « Passez derrière l'église en prenant en face et à gauche. Marchez jusqu'à la plage de la petite côte et la longer ». Ces descriptions sont largement utilisées pour la planification de randonnées.

Les itinéraires sont donc des concepts communément admis et utilisés dans nos vies quotidiennes. Ces quelques exemples pris dans les origines ou dans le contemporain nous rappellent leur rôle et nous permettent d'introduire le propos de notre recherche. Nous allons aborder les difficultés liées à la compréhension des mécanismes et des propriétés des raisonnements humains impliqués dans une navigation afin d'en déduire une représentation logique et structurée.

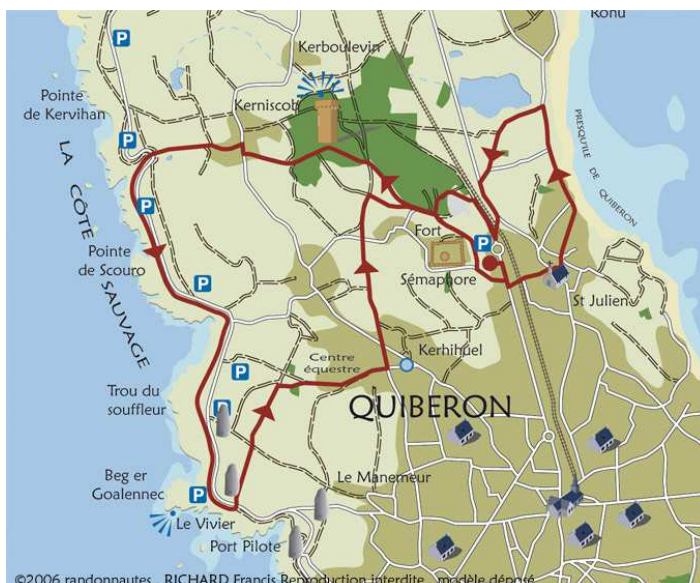


Figure 3 — Itinéraire de randonnée

L'étude des descriptions d'itinéraires : au carrefour de plusieurs sciences

Plusieurs domaines scientifiques s'intéressent aux descriptions d'itinéraires, sans être exhaustif, et en nous limitant dans notre étude aux domaines qui seront utiles à notre recherche, nous pouvons citer l'informatique, les sciences cognitives, la linguistique et la recherche opérationnelle. La figure 4 illustre ces domaines et leur rôle dans notre étude des descriptions d'itinéraires, en partant des concepts vers l'implémentation de solutions de représentation automatisées. Abordons comment chacune de ces disciplines appréhende l'étude de cette notion d'itinéraire.

Les sciences cognitives étudient les différents mécanismes de perception mis en œuvre au cours d'une interaction entre l'homme et son environnement. Le fonctionnement de la mémoire est en particulier au cœur des préoccupations des sciences cognitives en ce qui concerne la perception de l'espace. Elle s'attache notamment à caractériser les différents concepts mentaux utilisés dans les processus d'acquisition et de transmission d'information d'itinéraires (Denis, 1997).

Une description d'itinéraire pouvant être verbale, elle constitue un sujet d'étude pour les chercheurs en linguistique. Leurs études portent sur l'analyse des expressions

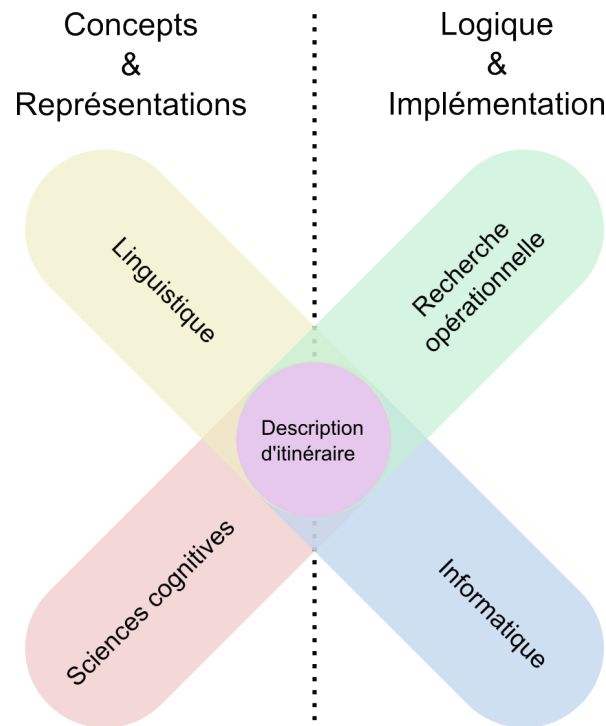


Figure 4 — Principaux domaines d'études des descriptions d'itinéraires

utilisées lors de descriptions d'itinéraires par différentes formes de langage (Talmy, 1983 ; Vandeloise, 1986 ; Mathet, 2000). Ces études abordent également les mécanismes d'extraction d'informations spatio-temporelles à partir de descriptions en langage naturel.

En prolongement des recherches précédentes en cognition spatiale et en linguistique, la recherche en informatique, quant à elle, s'intéresse au codage et au décodage des informations logiques, structurales, et spatio-temporelles contenues dans une description d'itinéraire. Le domaine du traitement automatique du langage naturel est particulièrement impliqué dans l'interprétation de ces données en langage formel utilisable par des programmes informatiques. Les recherches en intelligence artificielle et en robotique s'intéressent également aux descriptions d'itinéraires. Un des objectifs de ces recherches est la navigation automatisée d'agents artificiels en interaction avec un environnement ou un agent humain.

Objectif et motivation de la recherche

L'objectif de la recherche présentée dans ce manuscrit concerne la problématique de la modélisation d'une description d'itinéraire à partir d'une représentation verbale. À partir d'une telle modélisation, nous introduirons une approche logique et algorithmique de géolocalisation d'itinéraires orientée vers une intégration au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG). Les domaines d'étude associés à cette recherche sont multiples : l'informatique pour la modélisation de processus de navigation, l'intelligence artificielle pour la géolocalisation et enfin les systèmes d'information géographique pour le traitement d'informations spatio-temporelles.

Nous développerons notre proposition de recherche dans le contexte particulier de la navigation en milieu naturel. La démarche proposée se décompose en plusieurs parties : une étude de la perception de navigations et de descriptions d'itinéraires, une comparaison entre des descriptions d'itinéraires en environnements naturel et urbain, une phase de modélisation et finalement la conception d'un algorithme de géolocalisation. Nous motiverons progressivement notre démarche à partir d'une analyse des connaissances actuelles des processus de cognition impliqués, en remarquant en particulier que la modélisation de processus de navigation en milieu naturel est à notre connaissance peu étudiée. À fortiori, nous montrerons que la géolocalisation automatique d'itinéraires décrits est toujours un sujet ouvert en recherche, et qu'elle se caractérise par une démarche d'interprétation de données principalement qualitatives vers un ensemble de données quantitatives.

Organisation du manuscrit

Après cette introduction décrivant le contexte et le propos de la recherche, le document s'articule en quatre chapitres illustrés pour chacun au sein de leur domaine d'étude (cf. figure 5).

Le premier chapitre détaille les mécanismes de perception d'une navigation et pose le contexte des descriptions d'itinéraires en définissant et en décrivant leurs différents constituants. Il repose sur un état de l'art des recherches effectuées autour de la compréhension des processus cognitifs impliqués dans une navigation et les différents langages de description associés.

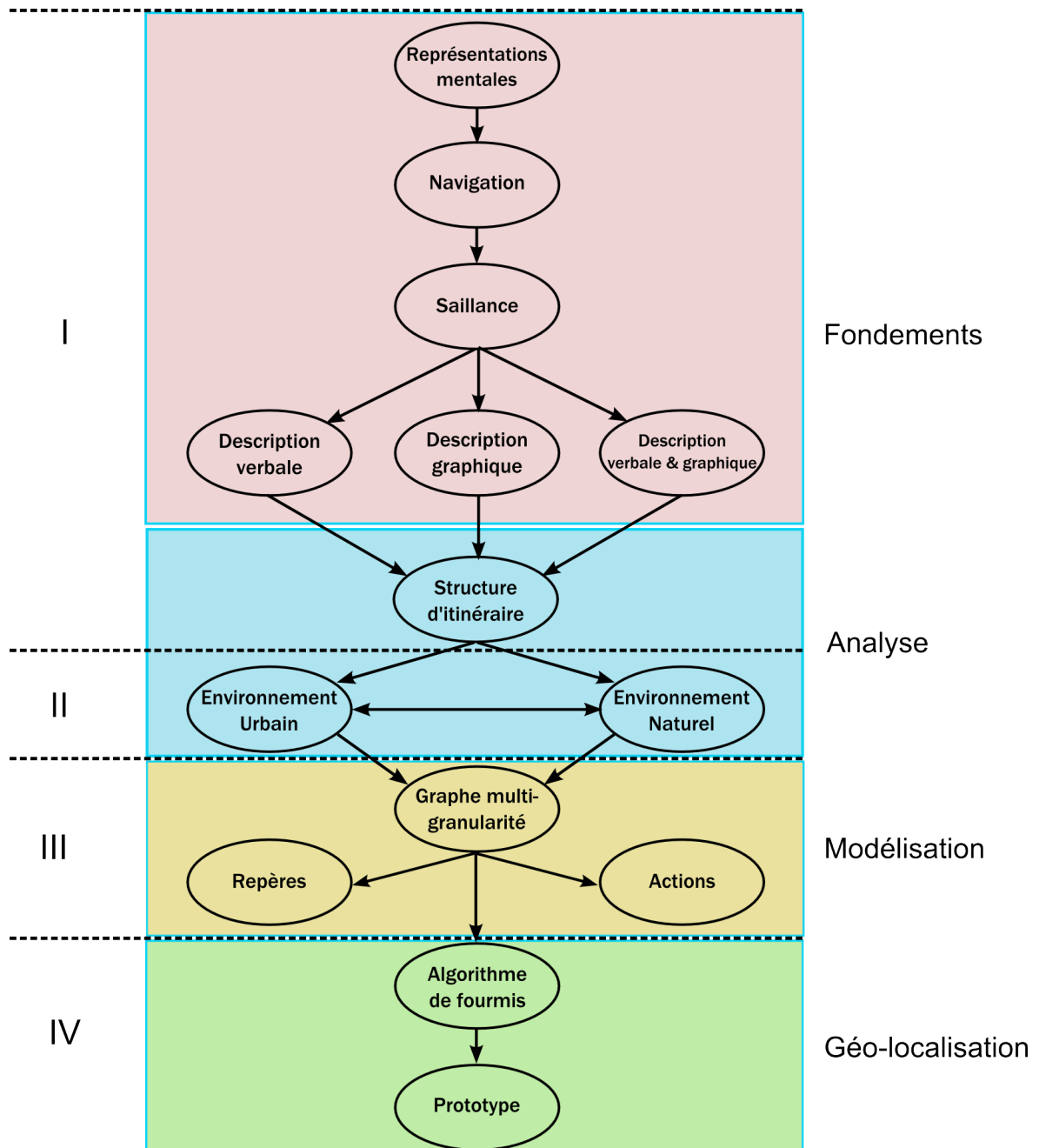


Figure 5 — Organisation du manuscrit par chapitre et domaine d'étude

Le deuxième chapitre développe une comparaison entre les descriptions d'itinéraires en environnements naturel et urbain, du point de vue de la perception et de la représentation. Cette comparaison s'appuie sur une expérience réalisée dans le contexte des courses d'orientation. L'objectif de cette partie est de caractériser la

navigation pédestre en milieu naturel et d'identifier les points communs existants avec les déplacements effectués en milieu urbain.

Après une étude des différentes modélisations de navigation présentes dans la littérature, le chapitre 3 élabore notre proposition de modélisation de description d'itinéraire. Cette approche de modélisation d'une navigation en milieu naturel a pour cadre formel la théorie des graphes. Elle aboutit à une proposition logique de caractérisation d'un itinéraire, orientée essentiellement vers la prise en compte des notions de repères et d'actions, et de constructeurs spatiaux issus de relations spatiales. Un prototype vient illustrer la démarche, et introduit des opérateurs de manipulation des propriétés de notre modèle.

Le chapitre 4 propose l'adaptation d'un algorithme par colonies de fourmis pour la résolution de la problématique de géolocalisation d'un itinéraire décrit. Ce chapitre présente un état de l'art sur les algorithmes de colonies de fourmis dont est inspirée l'approche utilisée. L'algorithme développé adapte la métaheuristique des algorithmes par colonies de fourmis en ajoutant des paramètres spatiaux et la génération dynamique d'un réseau modélisant l'espace de recherche. L'implémentation de la méthode a permis un ensemble de tests sur des cas d'étude qui valident et caractérisent notre approche.

La conclusion de ce manuscrit résume la contribution et discute les perspectives de notre travail du point de vue de la recherche et des applications potentielles.

I Principes de perception et de description d'itinéraire

Sommaire

I.1 Mécanismes de perception d'une description d'itinéraire .	10
I.1.1 Les espaces mentaux	10
I.1.2 Navigation et cognition spatiale	12
I.2 Production de description d'itinéraire	15
I.3 Formes de description d'itinéraire	17
I.4 Description verbale d'itinéraire	20
I.4.1 Structure d'une description d'itinéraire	21
I.4.2 Repères : composantes statiques	24
I.4.3 Actions : composantes dynamiques	28
I.5 Discussion	30

UN itinéraire est constitué d'étapes et de déplacements entre ces étapes. Une description d'itinéraire contient un ensemble de données spatiales et temporelles de type dynamique et statique. Elle n'est pas une représentation objective de l'espace parcouru, mais l'interprétation d'une expérience de navigation associée à la perception d'un environnement. La manière dont une personne matérialise et communique la représentation d'un espace parcouru est révélatrice des mécanismes qui concourent à la perception mentale de son environnement (Couclelis, 1996). La réalisation d'un itinéraire à travers un processus que nous qualifions de navigation dans un environnement génère une représentation mentale qui va être utilisée pour la description de cet itinéraire. Une description d'itinéraire peut être verbale, graphique

ou bien multi-modale. Chaque modalité permet l'expression d'une certaine structure de l'itinéraire, ainsi que la relation de celui-ci avec son environnement.

Ce premier chapitre est divisé en cinq sections. La première section présente les différents mécanismes de perception d'un itinéraire qui permettent la production d'une description d'itinéraire abordée dans la deuxième section. Les différentes formes de descriptions d'itinéraires sont exposées et illustrées dans la troisième section de ce chapitre. La quatrième section a pour sujet la description verbale d'itinéraire. Une discussion conclut ce chapitre.

I.1 Mécanismes de perception d'une description d'itinéraire

L'objectif d'une description d'itinéraire est de conduire une personne à un endroit précis dans l'espace, en évitant que cette personne ne s'égare. Il s'agit d'un acte de communication de type procédural répondant à un besoin clairement défini, se rendre d'un point d'origine à un point d'arrivée. Ce discours étant une interprétation de l'environnement, il est dépendant de l'auteur mais aussi de la personne qui le reçoit. En effet, l'auteur va adapter son discours en fonction de sa familiarité avec l'environnement, de sa culture et de ses capacités (Lowe et Moryadas, 1975). Cette interprétation se ressent d'une part sur les éléments décrits, mais également sur les relations entre ces éléments. Une telle interprétation dépend tout d'abord du type d'environnement dans lequel s'effectue la navigation. La perception d'un environnement est en effet fortement dépendante de l'échelle spatiale et des limites de cet espace. Cette perception crée une représentation de l'environnement permettant la mémorisation des caractéristiques d'un itinéraire, et la production de descriptions. Nous aborderons dans cette section les différents types d'espaces utilisés dans la perception des processus de navigation.

I.1.1 Les espaces mentaux

Un caractère important de l'environnement qui influence les mécanismes de perception résulte de l'échelle et des limites spatiales de l'espace représenté lors de l'interaction de l'observateur avec son milieu. Cette influence est illustrée par les différences d'échelles induites par exemple lors de représentations mentales utilisées pour modéliser

un bâtiment, un parc, une forêt ou un département. Les entités présentes ainsi que les déplacements possibles sont fonction de la taille de l'environnement. Plusieurs classifications ont été proposées afin de qualifier l'étendue d'un environnement.

Garling et Golledge (1989) font la distinction entre trois types d'espace. Le premier, « small-scale space », est l'espace dont la taille est comparable à celle de la pièce d'un bâtiment. Il peut être perçu sans effectuer de déplacement. L'intérieur d'une maison est considéré comme un « medium-scale space » tandis que les espaces plus importants dont la taille ne permet pas de naviguer à vue, sont nommés « large-scale space ».

Trois principaux espaces sont identifiés par Tversky (1991). Le premier est celui que nous pouvons ressentir directement : l'espace du corps. L'espace autour de nous fait référence à l'environnement que nous sommes capables de toucher ou de voir sans effectuer de déplacement. Enfin l'espace dans lequel nous pouvons nous déplacer constitue l'espace de navigation.

Montello (1993) propose une catégorisation proche dans la démarche et les objectifs de celle de Tversky (1991). Il fait une distinction entre quatre classes d'espaces cognitifs. Ces espaces sont définis relativement au corps de la personne qui se déplace. Le premier de ces espaces, l'espace « Figural », est défini comme plus petit que le corps de la personne (*e.g.*, les petits objets). Il peut être appréhendé physiquement, tactilement et sans aucun déplacement. L'espace « Vista » est plus grand que le corps de la personne et peut être également perçu sans déplacement, mais il englobe l'ensemble de l'environnement pouvant être vu (une pièce d'un bâtiment par exemple). L'environnement perçu à l'aide de déplacements plus importants est nommé l'espace « environmental ». Dans cet espace on retrouve les quartiers ou encore les villes. Enfin, l'espace « geographical » nécessite l'utilisation d'une représentation externe telle qu'une carte et ne peut être appréhendé seulement par déplacement. Par exemple, un département, une région et un pays font partie d'un espace « geographical ».

Freundschuh et Egenhofer (1997) établissent une comparaison des différentes classifications de la littérature. Deux espaces viennent se rajouter à ceux définis par Montello (1993) : l'espace des entités non manipulables et l'espace des cartes géographiques. L'espace des entités non manipulables se situe entre l'espace « Figural » et l'espace « Vista » et contient des entités telles que des maisons et des arbres par exemple. L'espace des cartes géographiques est défini par les données représentées par les cartes.

La figure I.1 illustre ces différents espaces et montre quelques convergences entre ces différentes classifications.

Notre recherche est orientée vers la navigation pédestre en milieu naturel, elle se place dans un cadre de navigation dans un espace « medium-large scale » selon Garling et Golledge (1989). Cet espace correspond au « navigation space » de Tversky (1991) et également de l'« environmental space » de Montello (1993) et de Friendschuh et Egenhofer (1997).

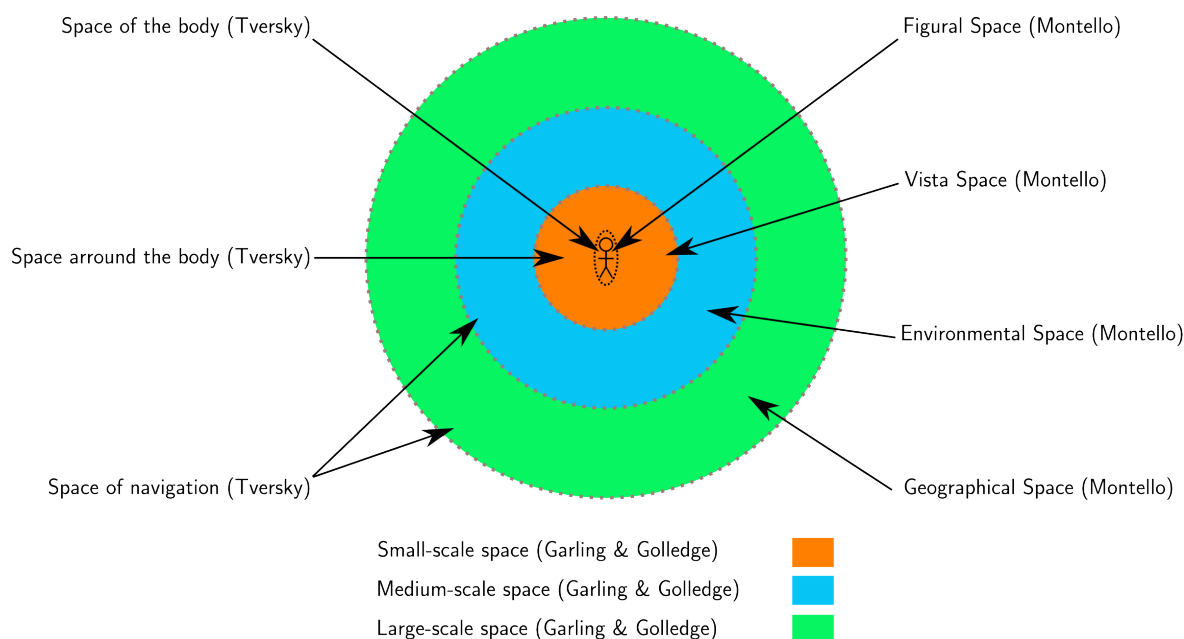


Figure I.1 — Espaces perçus

I.1.2 Navigation et cognition spatiale

Afin de décrire un itinéraire à un tiers, une personne doit d'abord interpréter cet itinéraire. Une telle interprétation se réalise à partir d'une représentation mentale de l'environnement, ainsi que des déplacements à effectuer pour atteindre une destination finale. Après avoir construit sa représentation de l'espace ainsi que de l'ensemble des actions de déplacement, cette personne peut alors transcrire sa conception de l'itinéraire en langage naturel ou en langage graphique, ou une combinaison des deux.

Plusieurs théories sur les modes de représentation de l'espace par l'homme ont été

avancées pour expliquer comment une expérience de navigation, ainsi que son environnement, sont modélisés mentalement. L'idée des « cartes cognitives » est probablement la plus répandue (Tolman, 1948 ; Kaplan, 1973). Le principe associé à la notion de carte cognitive consiste à considérer le fonctionnement des connaissances de navigation par similitude à l'utilisation des cartes au sens géographique du terme. Cette carte cognitive est utilisée pour une « navigation mentale » permettant à l'être humain de s'orienter et d'évoluer dans un environnement. Contenant essentiellement des informations de type qualitatif, elle est multi-dimensionnelle ce qui permet, par exemple, le passage d'une perspective « vue du ciel » à une perspective de « navigation » (Taylor et Tversky, 1992).

Si l'analogie d'une carte cognitive avec une carte géographique permet d'expliquer certaines interprétations et compétences de l'humain pour évoluer dans son environnement, elle n'est pas suffisante pour justifier les erreurs d'appréciation d'alignement ou de distance. Certains éléments de l'espace mémorisés par une personne n'ont pas de relations avec les autres entités et peuvent donc être difficilement représentés sur une « carte cognitive » (Lynch, 1960 ; Kosslyn *et al.*, 1974). Les expériences menées montrent aussi que les connaissances spatiales ne sont pas symétriques, il est en effet difficile de restituer un itinéraire en sens inverse de parcours (Piaget *et al.*, 1960 ; Kosslyn *et al.*, 1974). Plusieurs études mettent en avant la séparation des connaissances de l'espace selon le type de connaissance représenté. Dans le cas des itinéraires, la connaissance extraite de type procédural, est séparée de la représentation de l'ensemble d'un environnement (Kuipers, 1982).

Un progrès dans la représentation des connaissances de navigation vient du concept de « collage cognitif » proposé par Tversky (1993). Pour des environnements peu familiers, les connaissances ne sont pas suffisantes pour construire une représentation mentale semblable à une carte. Les erreurs d'alignement, de direction et de distance expérimentées lors de navigation montrent qu'il y a incompatibilité avec la cohérence d'une carte. Néanmoins les images sont présentes dans les « collages cognitifs ». Tversky définit ces collages comme des couches multimédia thématiques associées explicitement à un point de vue. Ce sont des fragments d'informations faiblement reliés les uns aux autres et qui peuvent avoir des contenus contradictoires. Cette approche est cohérente avec les résultats des différentes expériences menées, au cours desquelles des erreurs d'alignement, d'estimation de distance ainsi que certains manques d'informations, ne pouvaient pas être expliqués auparavant.

CONTAINER	BALANCE	COMPULSION
BLOCKAGE	COUNTERFORCE	RESTRAINT REMOVAL
ENABLEMENT	ATTRACTION	MASS-COUNT
PATH	LINK	CENTER-PERIPHERY
CYCLE	NEAR-FAR	SCALE
ITERATION	CONTACT	PROCESS
SURFACE	OBJECT	COLLECTION

Figure I.2 — Exemples d'image-schemata

La construction de représentations spatiales repose sur un ensemble de structures de base permettant de caractériser les entités perçues dans l'environnement. [Johnson \(1987\)](#) définit les « image-schemata » comme des constructeurs originaux permettant de comprendre et structurer nos expériences de navigation. PATH, SURFACE, CONTAINER sont des exemples de ces constructeurs permettant respectivement de reconnaître un chemin dans une navigation, une étendue et une entité pouvant contenir d'autres entités. Ce sont des structures génériques et abstraites qui permettent aux personnes de dégager des similarités à partir de différentes expériences ([Raubal, 1997](#)). Les entités du monde sont reconnues et modélisées par des « image-schemata » en fonction de leurs invariants. Ces invariants constituent les caractéristiques intrinsèques des entités perçues (cf. figure I.2). La théorie de l'affordance suggère que certaines propriétés fonctionnelles des entités sont portées par les entités elles-mêmes ([Gibson, 1977; 1979](#)). L'affordance est la capacité d'une entité à suggérer sa propre utilisation à un observateur. Les exemples fréquemment rencontrés dans la littérature pour illustrer ce principe sont la chaise qui « afforde » la possibilité de s'asseoir ou bien le clignotant d'une automobile qui « afforde » un changement de direction. Plus l'affordance d'une entité est grande plus son utilisabilité est importante.

Dans le cadre d'une navigation, nous retenons l'exemple de l'affordance d'une limite de végétation pouvant être interprétée par l'image schema PATH qui va permettre la mémorisation de cette entité dans la représentation mentale de la personne (cf. figure I.3).



Figure I.3 — Image schema : exemple

I.2 Production de description d'itinéraire

La production d'une description verbale d'itinéraire est constituée d'étapes bien distinctes. Wunderlich et Reinelt (1982) distinguent quatre phases : l'initiation, la description, la sécurisation et la clôture. La première étape permet d'initier le dialogue ainsi que d'énoncer le but visé par le demandeur. Cette première étape permet déjà la mise en place de la stratégie du descripteur. La deuxième étape correspond à la description d'itinéraire proprement dite. La sécurisation est un contrôle de la compréhension du receveur par le descripteur. La dernière étape met fin au dialogue. À partir de principes relativement proches, Couclelis (1996) propose un modèle plus cognitif dans la mesure où après la phase initiale elle distingue les trois étapes suivantes : la représentation, la transformation et la symbolisation. La représentation correspond à la recherche des primitives contenues en mémoire et permettant la planification du trajet. La segmentation et la linéarisation de l'itinéraire s'effectuent dans une phase de transformation, tandis que la symbolisation produit les directives verbales. Une dernière étape vient clore le processus tout comme le modèle présenté précédemment.

Denis (1997) donne un modèle plus proche du descripteur à partir d'un point de vue cognitif. Il est composé des trois phases suivantes : activation de la représentation interne de l'environnement, planification de l'itinéraire, formulation de la procédure de navigation. La phase initiale active la représentation cognitive dont les différentes hypothèses sur la structure ont été étudiées dans la section I.1 de ce manuscrit. Cette représentation contient l'ensemble des données du descripteur qui lui permet la planification de l'itinéraire dans une deuxième phase. Finalement, la planification est transformée en langage naturel pour le demandeur.

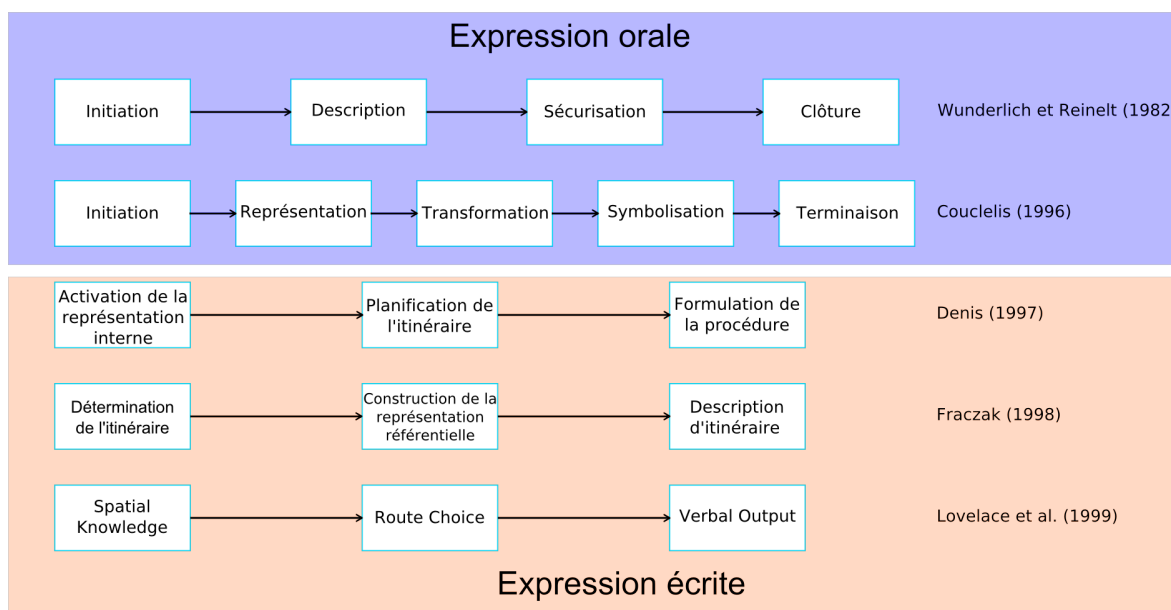


Figure I.4 — Modèles de production de description

Lovelace *et al.* (1999) introduisent un modèle constitué de trois phases : « Spatial Knowledge », « Route Choice », « Verbal Output ». La première étape active les connaissances spatiales du descripteur sur la zone concernée ainsi qu'à l'échelle correspondant au mode de transport du demandeur. Le deuxième temps concerne la planification de l'itinéraire avec le choix des différents points de passage en fonction de la stratégie adoptée (plus court chemin, itinéraire le plus facile, etc.). Enfin la dernière étape produit la description verbale. Fraczak (1998) identifie trois étapes : la détermination de l'itinéraire, la construction d'une représentation référentielle, la description d'itinéraire.

Les modèles introduits par Wunderlich et Reinelt (1982) et par Couclelis (1996) se distinguent par la présence d'une phase finale mettant fin au processus de production. Cette différence s'explique par le mode d'expression auquel ces deux modèles s'intéressent. En effet ils conviennent tous deux au mode de description oral qui permet un véritable dialogue entre le descripteur et le receveur contrairement au mode textuel considéré comme un monologue. Ceci est encore plus remarquable avec la phase de sécurisation, véritable interaction entre deux personnes impliquées pour vérifier la bonne compréhension de la description. La figure I.4 résume les différentes modélisations en les regroupant par mode d'expression.

I.3 Formes de description d'itinéraire

Un itinéraire peut être décrit par différents moyens. Il s'agit de retranscrire une expérience de navigation à une autre personne. Le langage naturel permet d'exprimer un itinéraire en évoquant comment cet itinéraire a été et peut être réalisé. Le mode graphique est également utilisé pour représenter l'environnement ainsi que les différents déplacements. Ces deux modes sont fréquemment associés afin de profiter de leurs avantages respectifs et permettre une meilleure compréhension de l'itinéraire. Les descriptions verbales sont la forme la plus fréquente pour représenter un itinéraire. Elles sont utilisées à l'oral ou bien à l'écrit. La parole peut être utilisée pour donner des directives permettant de trouver un lieu précis en utilisant un téléphone. Se rendre à un entretien professionnel ou bien rejoindre des amis, les occasions sont nombreuses de produire ou bien de recevoir une description d'itinéraire au téléphone. Ce genre de directives se réalise également de visu.

Le mode verbal est bien adapté à la description d'itinéraire dans le sens où la linéarité et la chronologie d'un itinéraire se retrouve dans le texte et le discours. La notion de prédécesseur/successeur pour les étapes de l'itinéraire est naturellement conservée en lisant la description du début à la fin correspondant respectivement au point de départ et d'arrivée du parcours.

Il est important de distinguer les descriptions verbales orales et les descriptions textuelles d'itinéraire. Les descriptions textuelles sont plus riches et contiennent plus de descriptions d'entités que le mode oral plus simple. Les constructions verbales sont naturellement plus élaborées dans les textes que dans le langage oral. Une autre distinction importante est de savoir si la communication est synchrone ou asynchrone. En effet, les descriptions d'itinéraires exprimées dans un dialogue entre deux personnes impliquent une interaction et une adaptation du discours afin que les instructions correspondent au mieux aux connaissances du receveur ainsi qu'à sa perception de l'environnement. La chronologie des déplacements peut ne pas être respectée par des retours en arrière pour préciser les étapes et déplacements importants.

[Przytula-Machrouh \(2004\)](#) a étudié les différences et les ressemblances entre descriptions verbales et descriptions graphiques. Elle a défini une ontologie transmodale de la description d'itinéraire en mettant en évidence la structure commune de ces deux types de représentation. Une description graphique d'itinéraire est un ensemble de symboles et de formes géométriques. La puissance d'expression des descriptions graphiques

est exprimée dans l'étude de [Larkin et Simon \(1987\)](#) dont le sujet peut se résumer à la question suivante : « Comment se fait-il qu'un modeste schéma nous en dise souvent plus qu'un long discours ? ». Pour les descriptions d'itinéraires l'avantage du mode graphique est de pouvoir représenter plus facilement les relations spatiales que le mode verbal ([Bieger et Glock, 1986](#)).

La spécificité des représentations graphiques de l'espace provient de son pouvoir d'inférence de relations spatiales. En effet la disposition des entités sur un graphique exprime des relations spatiales entre ces entités. Par exemple la description verbale : « longer le bâtiment puis tourner après le pont » ne donne pas de façon précise la position du bâtiment par rapport au pont, ni l'orientation de l'action. Au contraire la description graphique doit placer le bâtiment par rapport au pont ainsi que préciser l'action « tourner ». la figure [I.5](#) illustre les différentes représentations graphiques possibles correspondantes.

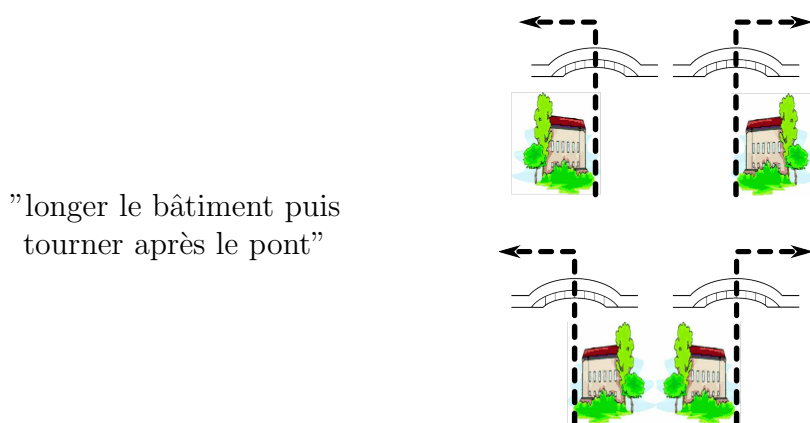


Figure I.5 — Interprétations graphiques possibles

Les descriptions graphiques possèdent un niveau d'abstraction moins élevé que les descriptions verbales qui ne permettent pas d'exprimer des concepts abstraits ([Tversky et Lee, 1999](#) ; [Tversky, 2001](#)). Les éléments dessinés sont les entités de l'environnement ainsi que les différents déplacements à effectuer.

L'ensemble des entités statiques décrites est composé uniquement des entités les plus remarquables de l'environnement pour deux raisons. Premièrement, ces entités ont été mémorisées par le dessinateur parce qu'elles possèdent des propriétés caractéristiques. Deuxièmement, le dessinateur choisit les entités les plus saillantes dans

l'environnement afin qu'elles soient remarquées par le destinataire de la description. Ces entités sont représentées par des formes géométriques élémentaires, le plus souvent des rectangles et des cercles. Dans leur expérience, visant à faire émerger des points communs entre descriptions graphiques et textuelles, Tversky et Lee (1999) ont considéré uniquement ces deux formes géométriques pour représenter les entités de l'environnement. Il est à noter que la forme utilisée pour décrire une entité n'est pas toujours en relation avec sa forme dans la réalité.

Quelques hypothèses peuvent être formulées sur la nature de l'entité décrite par rapport au dessin la représentant. Premièrement, si plusieurs formes sont utilisées pour définir les entités, il est possible d'en déduire une relation forte avec la forme réelle de l'entité. De même l'utilisation de formes particulières (*i.e.*, autres que cercles, rectangles et carrés) incite à penser que c'est la forme même de l'entité qui est dessinée. Le cercle peut être utilisé pour des entités de type ponctuel alors que le rectangle met en avant la superficie de l'entité. Tversky et Lee (1999) notèrent dans leurs expériences que le rectangle est utilisé par défaut alors que le cercle est employé uniquement dans les cas où l'entité est réellement de forme circulaire. Les entités peuvent être accompagnées de texte caractérisant plus précisément leur nature que le simple dessin.

La représentation graphique d'une dynamique de déplacement prend des formes relativement moins variées que celles des entités. Elle se fait essentiellement à l'aide de flèches. Une simple flèche permet de définir le sens, l'orientation et parfois la taille (durée, distance) d'une action de déplacement.

Les chorèmes sont une représentation schématique d'un espace et de ses transformations introduite par Brunet (1980) et repris par Cheylan *et al.* (1997). Le terme est un néologisme inventé par Brunet à partir du mot grec « chôra » signifiant étendue, espace, territoire. Plus qu'une représentation graphique spatiale quelconque elle est construite à l'aide d'un alphabet bien défini. La figure I.6 montre un sous-ensemble de cet alphabet correspondant à l'expression d'une dynamique de l'espace. La chorématique est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'analyse spatiale, l'apprentissage, ou bien le diagnostic de territoire (Piveteau et Lardon, 2002).

À l'image des systèmes GPS utilisés dans les automobiles, la combinaison du graphique et du texte pour décrire un itinéraire est courante. Les systèmes informatiques ont de plus en plus recours à la multi-modalité combinant l'oral et le visuel, la recherche en interaction homme-machine ayant montré que la communication est par

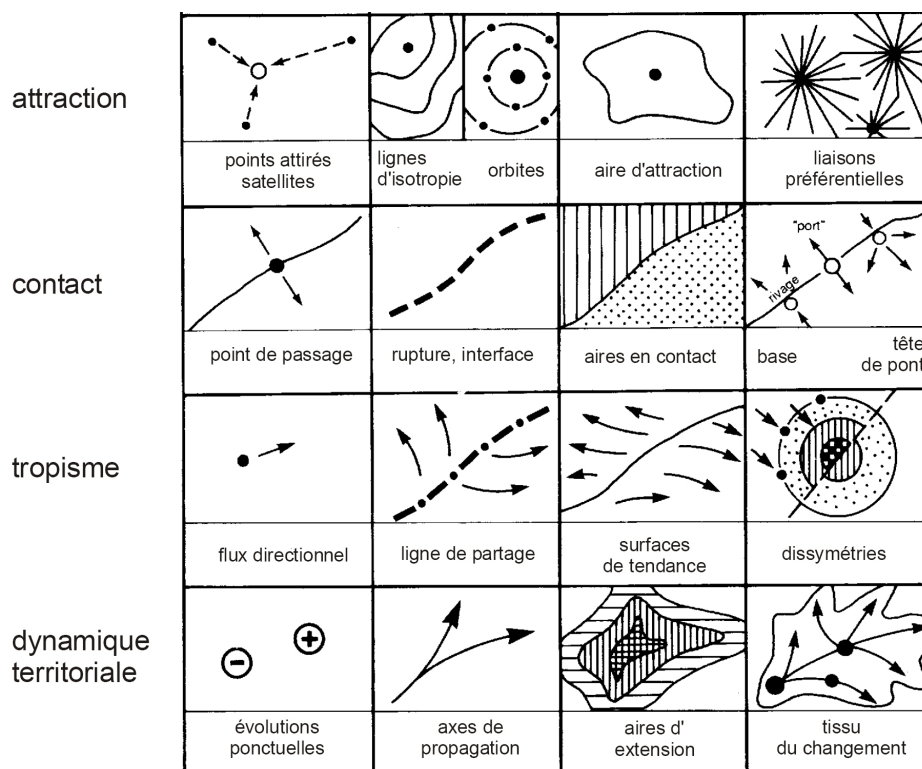


Figure I.6 — Chorèmes et dynamique de l'espace (Brunet, 1980)

nature multimodale (Landragin, 2004). Les sites de planification d'itinéraire telles que <http://www.mappy.fr> utilisent à la fois une description graphique de l'itinéraire mais également une description textuelle.

La figure I.7 présente un écran résultat obtenu pour un itinéraire allant de la place de la Liberté au pont de Recouvrance dans la ville de Brest. Cet écran est composé d'une carte sur laquelle l'itinéraire est tracé sur la partie droite, et d'une description textuelle sur la partie gauche. Cette description est composée d'étapes correspondant à un changement de direction, ou à un changement de nom de rue. À chaque étape une instruction permet de connaître la direction ainsi que le nom de la rue à suivre.

I.4 Description verbale d'itinéraire

La forme verbale est sans aucun doute la forme la plus étudiée et la plus utilisée pour décrire un itinéraire. Elle permet de situer un itinéraire dans son environnement

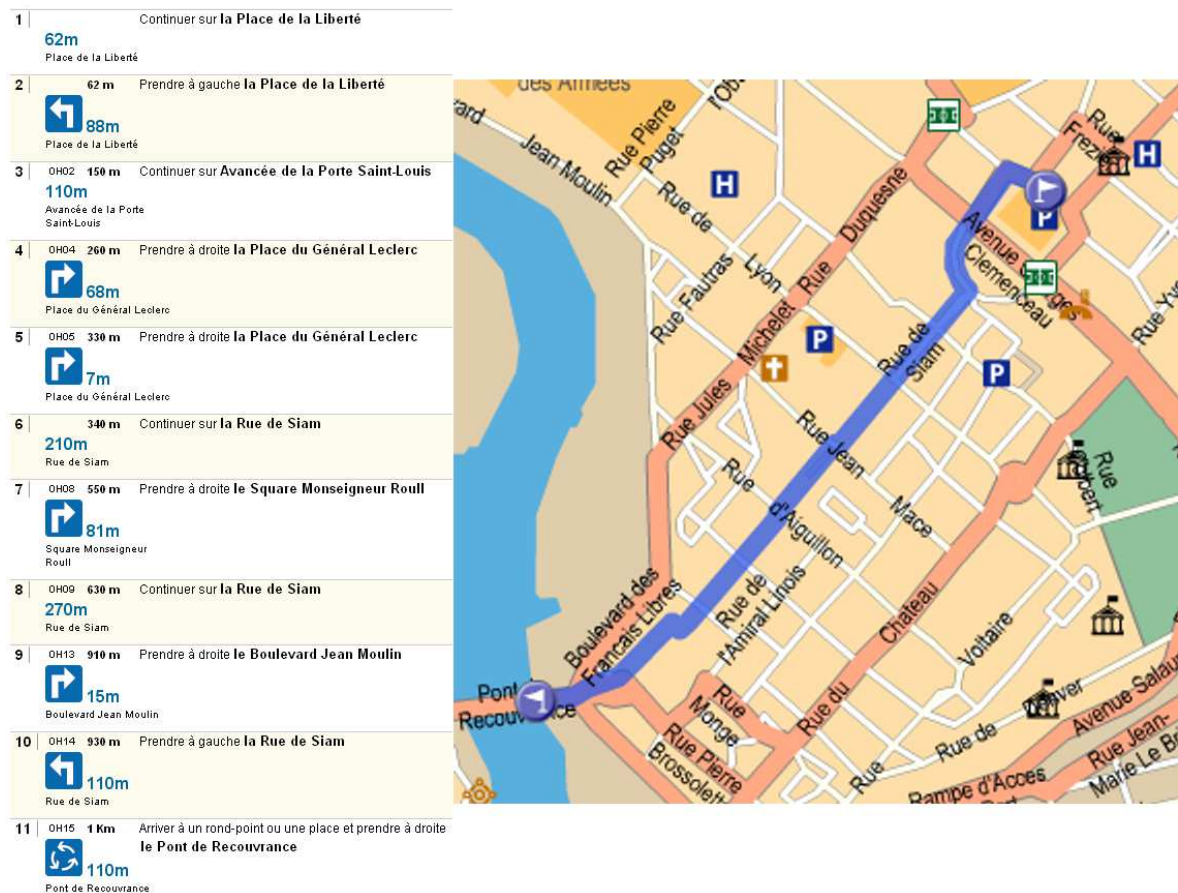


Figure I.7 — Description graphique et textuelle d'un itinéraire par le site <http://www.mappy.fr>

et d'exprimer les déplacements à effectuer. Nous nous intéressons tout d'abord à la structure d'une description verbale d'itinéraire, au niveau des unités grammaticales et des unités d'information, puis aux deux composants essentiels : les repères et les actions.

I.4.1 Structure d'une description d'itinéraire

Le but d'une description est de communiquer à une personne comment se rendre d'un point de départ jusqu'à un point d'arrivée sans qu'elle se perde. Pour y arriver la personne qui décrit l'itinéraire essaye d'exécuter plusieurs tâches. Wunderlich et Reinelt (1982) ont étudié les descriptions verbales d'itinéraire, et ils ont extrait quatre tâches

principales :

- identifier les entités de l’environnement,
- diriger la personne recevant les indications,
- situer les entités,
- exprimer l’action de déplacement à effectuer.

Deux notions émergent de cette liste : les entités de l’environnement et les actions à effectuer. Ces deux composants sont exprimés différemment. Les actions, portent la dynamique de la navigation, et se retrouvent dans les verbes. Les verbes les plus utilisés dans ce contexte sont notamment : aller, partir, sortir, traverser, continuer, tourner, contourner etc. Ces verbes permettent d’exprimer soit une action de progression, soit une action de changement de direction. Les entités sont présentes par les noms et les groupes nominaux. Chaque nom décrit un type d’entité particulier accompagné éventuellement par des adjectifs permettant de le définir de manière plus précise. Ces entités sont considérées comme des repères si elles possèdent des caractéristiques saillantes. Un repère peut être en relation avec une action. Ces notions d’entités et d’actions sont implicitement incluses dans la classification d’Allen (1997) qui classe les expressions contenues dans une description d’itinéraire en quatre classes :

- des expressions permettant de décrire l’environnement,
- des expressions décrivant les relations spatio-temporelles,
- des directives de déplacement,
- des expressions mettant en relation les entités entre elles.

Comme le souligne Przytula-Machrouh (2004) dans sa thèse, cette classification est centrée sur les catégories grammaticales des différents constituants de la description d’itinéraire. Au contraire, la classification de Denis (1997) met en avant le type d’information contenue dans chaque classe. Une caractéristique importante de cette classification est qu’elle est centrée sur la relation action/repère. Cinq classes sont ainsi définies :

- classe 1 : les actions exprimées sans repère,
- classe 2 : les actions exprimées avec références à un repère,
- classe 3 : les repères autres que ceux mentionnés avec une action,
- classe 4 : description d’un repère sans mentionner sa localisation,
- classe 5 : classe des commentaires, en d’autres termes tout ce qui ne rentre pas dans les autres classes.

À partir d'une étude sur les ressemblances et les différences entre descriptions graphiques et descriptions verbales d'itinéraire, et la passerelle entre ces deux types de représentations externes, Przytula-Machrouh (2004) a développé une ontologie transmodale de description d'itinéraire. Une expérience a été menée dans le but de constituer un corpus de descriptions d'itinéraires verbales et graphiques. Vingt-trois femmes et vingt-trois hommes ont été sollicités afin de décrire un itinéraire entre une gare et un bâtiment universitaire, sans aucune contrainte sur la forme de leur description. Au total, vingt descriptions verbales et vingt-deux descriptions graphiques ont été recueillies. L'analyse de ces données s'est déroulée en trois étapes :

- extraction des éléments composant les descriptions,
- mise en évidence des relations entre ces éléments,
- étude comparative entre les deux types de descriptions.

À la suite de cette analyse le concept de « scène élémentaire » a été introduit. Une scène élémentaire est la conceptualisation des vues et des actions, composants essentiels du modèle (Przytula-Machrouh *et al.*, 2004). Une vue est liée à un endroit et peut contenir plusieurs entités. Huit types de scènes élémentaires sont définis :

- action dirigée,
- action délimitée,
- action intégrée,
- action localisée,
- introduction de repère,
- identification de repère,
- localisation de repère,
- description de repère.

Ces types de scène élémentaire servent à produire à la fois des descriptions verbales et des descriptions graphiques d'itinéraire (cf. figure I.8). Chaque mode d'expression est soumis à un ensemble de contraintes (*e.g.*, grammaire et vocabulaire pour les contraintes linguistiques, taille du support et nombre de couleurs pour les contraintes graphiques).

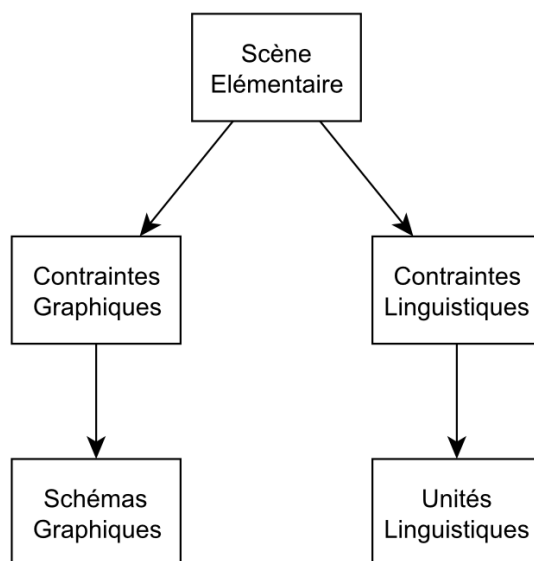


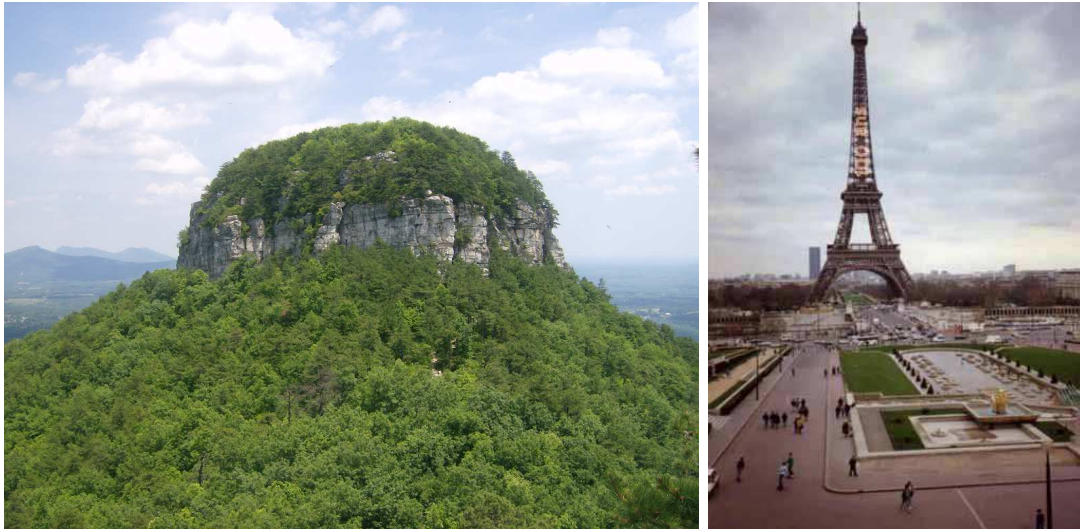
Figure I.8 — Opération de formulation de Przytula-Machrouh (2004)

I.4.2 Repères : composantes statiques

Lynch (1960) a étudié la structure de la ville et son influence sur sa perception par les habitants. L'auteur a choisi trois villes (Boston, Jersey-city et Los Angeles) et a mené une série d'expériences afin de faire émerger la structure perçue par les habitants. Les expressions « image spatiale » (spatial image) ou « image de la ville » sont employées pour désigner une représentation mentale de la ville. Cette image est construite, selon Lynch, par cinq constituants : des points de repère, des noeuds, des chemins, des quartiers et des barrières. Ces éléments permettent d'une part de structurer l'espace (points de repère, quartiers, barrières) et d'autre part de naviguer dans cet espace (noeuds et chemins). Les résultats ont permis de définir la notion de « lisibilité » d'une ville comme la facilité de percevoir la structure de la ville ainsi que la logique et les opportunités de navigation. Les repères sont des facteurs déterminants de la bonne compréhension d'un environnement, et permettent la conception et la réalisation d'une navigation.

Les repères sont des éléments primordiaux d'une description d'itinéraire. Ils permettent de relier et de positionner une description d'itinéraire à l'environnement dans lequel celui-ci est réalisé. Les études sur les descriptions d'itinéraires ont montré l'importance majeure des repères pour guider les personnes (Michon et Denis, 2001). La

figure I.9 présente deux photos d'entités pouvant être considérées comme des repères en milieu naturel et en milieu urbain.



(a) Repère en milieu naturel

(b) Repère en milieu urbain

Figure I.9 — Repères : Exemples

Les repères sont des points d'ancrage d'un itinéraire dans son environnement, et ils constituent des composants statiques de la description. Un repère est défini comme une marque qui sert à retrouver un emplacement, un endroit (signe, objet matériel) pour faire un travail avec précision, ajuster des pièces, localiser un phénomène [Petit Robert 2007]. Le terme repère est utilisé dans divers domaines comme un point de référence sans qu'il y est pour autant de composante spatiale. Pour la navigation, notre cas d'étude, il s'agit d'une position dans l'espace.

Plusieurs définitions du concept de repère existent dans la littérature. Le terme anglais « landmark » signifie littéralement point de repère, point décisif. D'après Michon et Denis (2001), les landmarks sont des entités ponctuelles ou des régions de petites tailles. Qu'ils aient deux ou trois dimensions, ils sont assimilables à des points pour la navigation. Golledge (1999) fait la distinction entre les repères qui servent à structurer l'espace de ceux qui aident la navigation en marquant une position. Lovelace *et al.* (1999) distinguent les repères aux points de décision (où un changement de direction est nécessaire), de ceux aux points de décision potentiels (où un changement de direction est possible mais ne doit pas être effectué), des marques de chemins (confirmant

que l'itinéraire suivi est le bon) et enfin des repères distants. [Fraczak \(1998\)](#) introduit quatre types de repères :

- le repère-chemin,
- le repère-simple,
- le repère-cadre,
- le repère-auxiliaire.

Deux principales différences émergent de cet ensemble de définitions. Premièrement la nature géométrique d'un repère n'est pas clarifiée. En effet si la plupart des recherches considèrent un repère comme ponctuel ou assimilable, d'autres font mention de repères de type « chemin ». Cette première contradiction entraîne une réflexion sur le positionnement des repères dans l'itinéraire ainsi que sur son rôle. Ces repères jouent plusieurs rôles :

- marquer un endroit pour une action « Tourner après le pont »,
- localiser d'autres repères « Le parc se trouve juste après le pont »,
- confirmer l'itinéraire « Vous devriez voir un pont ».

Les repères jouent également un rôle essentiel dans l'apprentissage et la communication d'itinéraires. La fréquence avec laquelle ils sont mentionnés dépend des différences entre les individus. Il a été clairement établi que les femmes font plus souvent référence à des repères que les hommes ([Galea et Kimura, 1993](#) ; [Denis, 1997](#)). Malgré ces différences, les repères sont pratiquement toujours cités dans les descriptions d'itinéraires ([Allen, 2000](#) ; [Denis *et al.*, 1999](#) ; [Fontaine et Denis, 1999](#) ; [Michon et Denis, 2001](#)). [Tom et Denis \(2003\)](#) ont comparé des instructions basées sur des noms de rues par rapport à des descriptions ne comportant uniquement des repères. Leur conclusion est que l'efficacité des repères est bien plus grande que celle des noms de rues pour guider des personnes dans un environnement urbain non familier. [Kalakoski et Saari-luoma \(2001\)](#) ont montré auparavant que les noms de rues sont difficiles à mémoriser même par des experts en navigation urbaines (leurs expériences ont été réalisées sur des chauffeurs de taxi). Leur rétention en mémoire à long terme est plus faible comparée à celle des repères ([Bahrick, 1983](#)).

Le lien entre description d'itinéraire et réalité physique est principalement dû aux références de repères. Ces repères sont des éléments remarquables de l'espace de navigation. Une entité peut être utilisée comme un repère si elle possède des caractéristiques saillantes ([Przytula-Machrouh *et al.*, 2004](#)). La saillance est la propriété permettant

à une entité d'être différenciée des autres entités l'entourant. La saillance est avant tout visuelle dans le contexte de navigation, mais elle est également structurelle et sémantique (Sorrrows et Hirtle, 1999).

Les repères dont la couleur se démarque par rapport aux autres ont une saillance visuelle importante. Une maison de couleur jaune dans une zone résidentielle composée majoritairement de maisons blanches, sera choisie préférentiellement comme repère. Les panneaux publicitaires le long des rues sont créés en suivant ce principe de différence visuelle par rapport aux entités autour afin d'attirer l'attention des personnes passant à proximité. La figure I.9(a) montre une entité, un pic rocheux, possédant une saillance visuelle dans un environnement naturel. La tour Eiffel peut être considérée comme un repère visuel (cf. figure I.9(b)) d'un environnement de type urbain. Les propriétés structurelles d'une entité sont également responsables de la saillance de celle-ci. Une maison semblable à celles l'entourant, mais située à la frontière entre une zone résidentielle et une zone commerciale possède une saillance importante. Claramunt et Winter (2007) ont étudié la saillance structurelle dans la ville en utilisant la théorie des graphes. Leur application à la petite ville française de Noyon a permis de montrer une correspondance entre les différentes mesures de graphes calculées et la structure historique de la ville. Enfin, une entité peut être porteuse de sens et être remarquable sémantiquement par la fonction qu'elle occupe. Le bâtiment d'une école est saillant même s'il est de forme et de couleur semblable aux autres bâtiments. Bien évidemment, une entité cumulant une saillance visuelle, structurelle et sémantique est un candidat idéal pour faire référence à un lieu.

Le calcul de la saillance d'entités dans un environnement fait partie des recherches en navigation. Le but est d'identifier les éléments les plus saillants pour les utiliser en tant que repères (Nothegger, 2003 ; Klippel et Winter, 2005). Ces repères peuvent alors enrichir une description d'itinéraire (Raubal et Winter, 2002). Les mesures de saillances proposées reposent sur la classification de Sorrows et Hirtle (Sorrrows et Hirtle, 1999).

Le calcul de saillance visuelle se base sur le contraste d'une entité dans son environnement. Il s'agit du contraste de couleur et également de forme. La forme de l'entité peut être ordinaire, mais si elle est différente des autres entités, alors c'est un repère potentiel. Le cas d'une tour située dans un quartier résidentiel constitué principalement de maisons de plein pied constitue une entité remarquable de premier ordre. À l'inverse si cette tour fait partie d'un ensemble d'immeubles de grande hauteur, son rôle en tant que repère sera contestable. Cet exemple fait apparaître une difficulté du calcul de

saillance visuelle. Il est nécessaire de prendre en compte la façade des bâtiments dans le cas d'une navigation urbaine (Raubal et Winter, 2002). Le travail avec des photos aériennes, disponibles plus facilement, n'est donc que peu utile.

En considérant le même exemple que précédemment, intéressons nous aux propriétés structurelles de la tour. Si l'édifice est placé au bout d'une impasse, certes sa singularité visuelle n'en est que plus grande, par contre son rôle structurel est nul. Il faut bien comprendre que par propriété structurelle d'une entité nous entendons la propriété de l'entité à structurer l'espace. La méthode utilisée pour faire émerger le rôle structurel des constructions en milieu urbain est de modéliser la ville sous forme d'un réseau composé de rues et d'intersections. Si la tour est située sur une place centrale de la ville, alors elle a de fortes propriétés structurelles. De même si elle est placée sur un axe majeur de la cité.

L'aspect sémantique des repères se prête plus difficilement à un calcul. En effet il est difficile d'établir un ensemble de critères pour évaluer combien une entité est porteuse de sens. Plusieurs paramètres peuvent être considérés dans l'évaluation sémantique d'une entité. Dans le cas des bâtiments en milieu urbain leur fonction administrative (mairie, école, préfecture, etc.) est un élément important. Leur rôle historique est un facteur pouvant également être déterminant. Néanmoins, classer ces différents critères rend compte de la difficulté de l'évaluation sémantique des entités afin de déterminer s'ils sont des repères potentiels. La raison en est qu'elle dépend de chaque personne, de sa culture, de sa catégorie socio-professionnelle, de sa familiarité avec le lieu décrit ainsi que de ses aptitudes.

I.4.3 Actions : composantes dynamiques

Les actions sont responsables de la dynamique d'une description d'itinéraire. Une action est définie comme ce que fait quelqu'un et ce par quoi il réalise une intention ou une impulsion [Petit Robert 2007]. Ces actions décrivent essentiellement des déplacements dans l'espace de la personne, c'est à dire un changement de position physique. Dans le contexte de notre recherche le terme « action » implique un changement de localisation. Ce déplacement est caractérisé par deux positions, un départ et une arrivée mais également par une trajectoire (Vandeloise, 1986). Denis (Denis, 1997) classe les actions en deux ensembles : les actions de progression (« Continuez tout droit ») et les actions de ré-orientation (« Tournez à droite »). Les actions peuvent

avoir plusieurs types d'interaction avec les repères. Elles peuvent être délimitées par des repères (« Après le pont tournez à droite ») ou bien être intégrées à un repère (« Traversez la forêt »).

À ces deux notions viennent se rajouter des termes permettant de caractériser les actions par des relations spatiales, comme les noms des points cardinaux ou des locutions adverbiales, par exemple : « à droite », « à gauche », « tout droit ». (Hernandez, 1991)

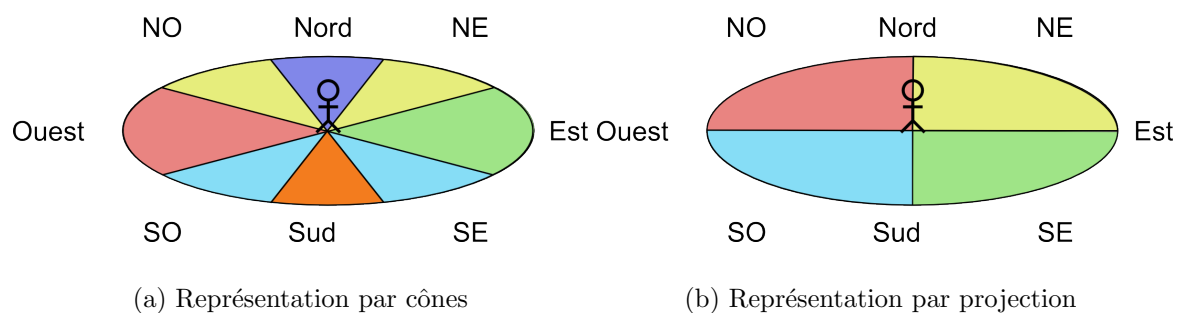


Figure I.10 — Représentations possibles du repère allocentrique

Dans le cadre des descriptions d'itinéraire, l'expression de l'orientation concerne essentiellement la direction des actions. Deux référentiels sont utilisés pour définir l'orientation des actions, le repère allocentrique et le repère égocentrique (Musto *et al.*, 1999). Le repère allocentrique est employé lorsque les points cardinaux sont utilisés. Quatre points cardinaux sont utilisés généralement mais parfois huit secteurs de la rose des vents sont retrouvés dans les descriptions les plus précises. Plus de huit termes pour l'orientation à l'aide des points cardinaux est rare, l'utilisation des degrés l'est encore plus (Freksa, 1992 ; Ligozat, 1998). Frank (1992) définit deux représentations différentes possibles pour l'interprétation des orientations cardinales (cf. figure I.10). La figure I.10(a) illustre une représentation composée de huit cônes d'angle identique tandis que la figure I.10(b) donne une interprétation linéaire pour les directions principales (nord, sud, est, ouest) et en quadrants pour les directions composées (nord-ouest, nord-est, sud-ouest, sud-est).

Si l'utilisation de la rose des vents définit de manière plus précise la direction, il en va tout autrement du repère égocentrique et de l'emploi de termes relatifs. Ces termes sont principalement les suivants : *devant*, *derrière*, *à droite*, *à gauche*. Le repère égocentrique peut être interprété de plusieurs façons sans qu'il soit possible

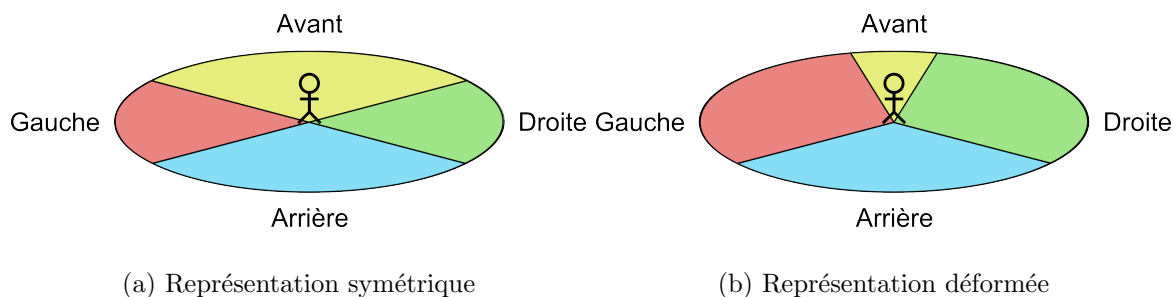


Figure I.11 — Représentations possibles du repère égocentrique

de déterminer la plus juste. La figure I.11 présente deux représentations du repère constitué des directions : *devant*, *derrière*, à *droite*, à *gauche*.

La distance peut être exprimée de deux façons ou plus exactement avec deux types de données, des données quantitatives ou bien des données qualitatives (Frank, 1992 ; Zimmermann, 1993 ; Zimmermann et Freksa, 1996). Le premier type concerne les mesures exprimées à l'aide des multiples du mètre. Précises et sans ambiguïté les données quantitatives décrivant une distance peuvent être associées à des adverbes (*e.g.*, approximativement) rendant la mesure de la distance plus subjective. Hernández *et al.* (1995) proposent un modèle qualitatif de représentation des distances. Leur étude porte sur l'interprétation des distances qualitatives telles que : *très près*, *près*, *loin*, *très loin*. Elle ne porte en aucun cas sur une analyse linguistique mais sur la comparaison des concepts exprimant une distance qualitative. La figure I.12 présente trois découpages possibles de l'espace en fonction de la distance à l'observateur. Ces découpages sont plus ou moins précis et distinguent de deux à cinq zones. Les limites de ces zones sont floues. Ces zones sont des séparations de l'espace d'un point de vue cognitif et sont donc très proches des espaces mentaux présentés dans la section I.1.

I.5 Discussion

Les environnements perçus à travers des processus de navigation se caractérisent à partir de différents types d'espaces géographiques qualifiés selon leurs distances cognitives telles qu'elles sont appréhendées par un observateur. Différentes formes de description d'itinéraire sont utilisées : textuelles et orales, graphiques, ou leur combinaison. Elles ont chacune leurs propres propriétés et pouvoir d'expression et leurs modes de

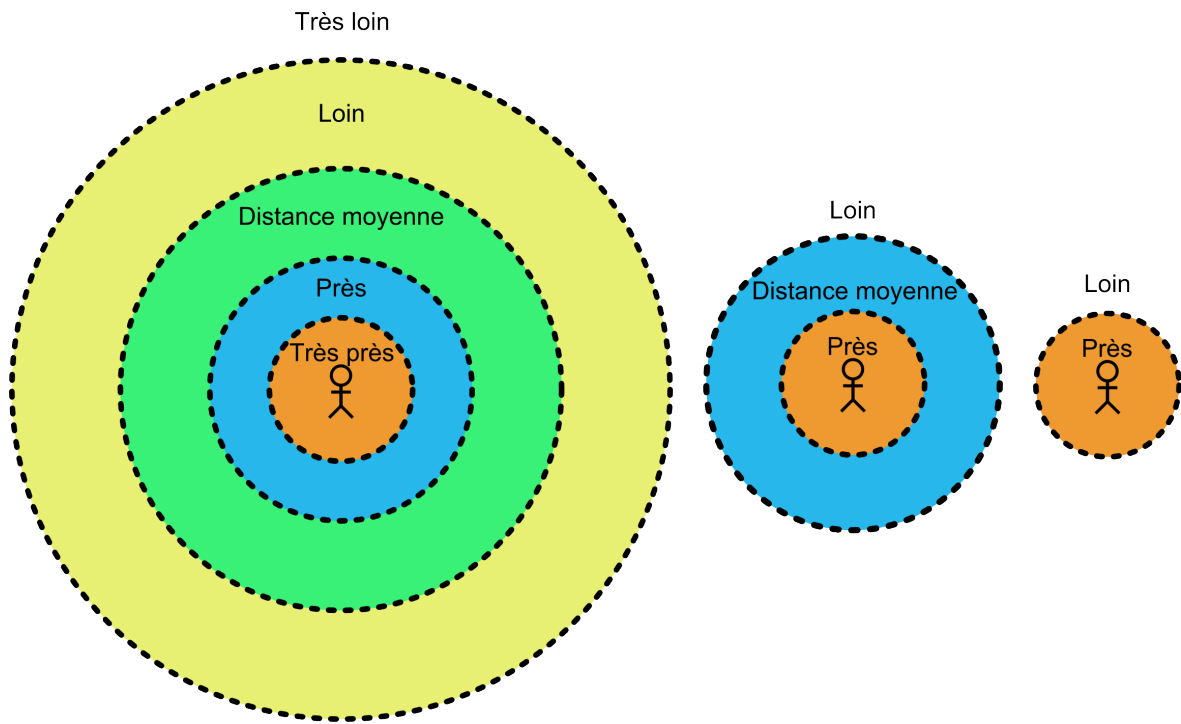


Figure I.12 — Modélisations possibles du concept de distance qualitative d'après *Hernández et al. (1995)*

communication.

Une analyse des formes verbales d'itinéraire telles qu'elles sont appréhendées dans la littérature montre clairement les rôles et les particularités respectifs des actions et des repères. Ces deux notions participent à une structuration relativement logique des itinéraires, elles sont intimement associées et sémantiquement qualifiées par leurs propriétés visuelles, spatiales et structurelles. Ce sont les saillances pour les repères et les termes associés aux actions. Le rôle de l'espace est prépondérant, les relations spatiales exprimant des critères d'orientation, de distance illustrent bien cet aspect.

Navigations en environnements naturels et urbains

Sommaire

II.1	Caractéristiques des environnements de navigation	34
II.2	Navigation en milieu naturel : exemple de la course d'orientation	35
II.2.1	Principes de la course d'orientation	35
II.2.2	Particularités de la carte de la course d'orientation	36
II.2.3	Contexte de l'expérimentation	37
II.2.4	Résultats	39
II.3	Comparaison de navigation en milieux urbains et naturels	42
II.3.1	Classifications cartographiques et ontologies	43
II.3.2	Actions et repères	45
II.4	Discussion	48

*L*a plupart des recherches et des études dans le domaine de la modélisation de processus de navigation concernent des environnements urbains. Plusieurs explications le plus souvent économiques et opérationnelles semblent expliquer cette tendance. Le développement d'applications géo-localisées favorise l'émergence de méthodes d'optimisation de parcours et de recherche de lieux d'intérêt comme des commerces. Le contrôle et la planification de la circulation automobile dans les villes est un enjeu important et contribue largement au développement d'applications et de solutions d'aide à la navigation. L'industrie du tourisme est aussi un domaine qui s'intéresse de près à la navigation dans les villes afin de faciliter l'accès à certains sites. Le type d'environnement et sa structure spatiale ont une forte influence sur la navigation. Il peut restreindre les moyens de déplacements utilisables et a un impact certain sur la façon

d'appréhender une navigation. Ce chapitre a pour objectif de distinguer les différences méthodologiques et conceptuelles d'appréhension des processus de déplacement en milieux urbains et naturels. Ces différences nous permettront ensuite de mieux construire un modèle de processus de navigation adapté au milieu naturel.

Ce chapitre est composé de quatre parties. Les caractéristiques génériques des processus de navigation sont étudiées dans la première partie. Les principes et les objectifs des courses d'orientation sont présentés et illustrent un contexte expérimental de navigation en milieu naturel qui constitue le cadre applicatif de notre recherche. Nous abordons ensuite une comparaison détaillée des navigations en milieu naturel et en milieu urbain. Une discussion reprenant les différentes conclusions établies dans chaque partie clôture ce chapitre.

II.1 Caractéristiques des environnements de navigation

Du point de vue de la modélisation, une caractéristique importante d'un environnement à prendre en compte pour la description d'une navigation est son envergure (*i.e.*, sa taille) et son échelle de perception. Nous avons abordé dans le chapitre I les différents espaces mentaux identifiés avec leurs propriétés. La taille de l'environnement va donc déterminer l'espace mental à considérer dans le processus de cognition. Certaines études ont, par exemple, considéré la navigation dans des bâtiments (Michon *et al.*, 2005) ou dans des aéroports (Raubal et Worboys, 1999). Ce sont également des environnements bien particuliers, et de relative petite taille si on les compare à des navigations en milieu urbain, rendant la navigation spécifique. Il en est de même des navigations en trois dimensions dans le métro de Paris (Fontaine et Denis, 1999 ; Fontaine, 2001). Ces cas peuvent être considérés comme des navigations dans des espaces fermés. Notre étude s'intéressant à la navigation pédestre, nous considérerons des environnements ouverts, de préférence en milieu naturel mais en comparant les navigations dans ce milieu avec celles en milieu urbain. Le cadre d'étude concerne les environnements ne pouvant pas être appréhendés d'un seul regard, qui permettent une navigation à vue, et assez petits pour pouvoir se déplacer uniquement à pied.

La nature de l'environnement a une grande influence sur les processus de déplacement humains. Dans le contexte d'un processus de navigation, la nature d'un

environnement comprend les éléments composant le milieu, sa **structure** et sa **diversité**. Les déplacements dans les villes peuvent être organisés en plusieurs catégories. Plus on s'éloigne du centre de la ville, plus la navigation sera différente du point de vue des déplacements possibles, des repères rencontrés et de la structure du milieu. Les déplacements en zone rurale ne s'appuient pas sur un réseau routier dense et un ensemble de repères manufacturés. Au contraire, la structure du réseau est plus diffuse et les repères sont plus souvent naturels qu'artificiels. Au final, une navigation en milieu naturel ne s'appuie pas sur une structure artificielle bien définie et les repères sont rarement artificiels. Plus qu'un manque de structure, c'est une plus grande liberté de déplacement qui différencie une navigation en milieu naturel d'une navigation en milieu urbain.

À notre connaissance, peu d'études concernent la navigation en milieu naturel. [Fontaine et al. \(2005\)](#) ont mené une série d'expériences dans un parc. Néanmoins, même si les repères rencontrés dans les parcs et autres jardins sont naturels, la navigation y est tout de même plus proche d'une navigation urbaine par la structure artificielle, créée par les allées et les chemins, contraignant de fait les déplacements.

II.2 Navigation en milieu naturel : exemple de la course d'orientation

II.2.1 Principes de la course d'orientation

La course d'orientation est née dans les pays scandinaves en 1857 dans le but de compléter l'entraînement militaire. Elle est devenue progressivement un sport à part entière jusqu'à devenir sport olympique en 1977. Elle se présente comme une course contre la montre avec pour objectif d'effectuer un trajet bien précis en repérant les points de passage obligatoire décrits. Ces points de passage, appelés balises, sont décrits dans une feuille de contrôle donnée à chaque coureur (orienteur) au début de la course (voir annexe A). Plusieurs types de courses d'orientation existent, se différenciant principalement par le moyen de locomotion. Si la course pédestre est l'activité originale, elle s'est vue complétée au fil des ans par la course d'orientation à ski, à vélo et à cheval. Nous nous concentrerons uniquement sur la course d'orientation pédestre. Le contexte de la course reste cependant le même à travers ces différentes activités, à savoir

un environnement majoritairement naturel et varié. Plusieurs pratiques sont également apparues. Par exemple, au lieu de rejoindre chaque balise dans l'ordre spécifié au départ, une variante consiste à laisser le choix du parcours aux coureurs. La seule contrainte reste de rallier toutes les balises. Ces balises sont constituées d'un drapeau de couleur.

L'équipement du coureur est composé d'une carte de la course et d'une boussole. Pour valider le passage des balises, deux équipements sont utilisés. Le premier consiste en une feuille cartonnée mentionnant chaque point de passage et devant recevoir le poinçon spécifique situé près de chaque balise. Le deuxième, le plus récent et à présent le seul utilisé en compétition, est un dispositif électronique qui permet l'identification du coureur au passage des balises, elles-même équipées d'un boîtier électronique relié à une centrale.

II.2.2 Particularités de la carte de la course d'orientation

La course d'orientation étant une activité bien particulière et nécessitant une navigation précise, les cartes géographiques classiques ne suffisent pas. L'Organisation Internationale de l'Orientation (I.O.F) a mis au point une carte spécifiquement adaptée à ce sport. Ses particularités sont une grande échelle, jusqu'au 1/5000^e, et une légende bien précise. Les échelles utilisées sont le 1/5000^e, 1 /10000^e, 1 /15000^e en fonction du niveau de difficulté de la course (initiation, compétition, etc.).

La légende est la raison pour laquelle les cartes de course d'orientation sont si bien adaptées à ce sport. Elle est composée d'un ensemble de symboles classés en cinq catégories. Elle est révisée régulièrement depuis sa création en fonction des remarques et des suggestions des différents acteurs de l'activité, la rendant toujours plus efficace. Conçue pour la course, elle inclut des informations sur l'interaction possible entre l'orienteur et l'environnement. L'exemple le plus remarquable est celui des symboles représentant la végétation. En effet, la végétation est divisée en catégories en fonction de sa pénétrabilité (cf. figure II.1). Ces catégories permettent à l'orienteur de choisir les zones les plus facilement franchissables car l'objectif premier est de perdre le moins de temps possible entre chaque balise.

L'échelle et la légende adaptées permettent un gain de précision important par rapport aux cartes usuelles. La figure II.2 montre la même zone géographique représentée par une carte IGN 1/25000^e (série bleue : la plus grande précision), par une carte




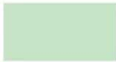




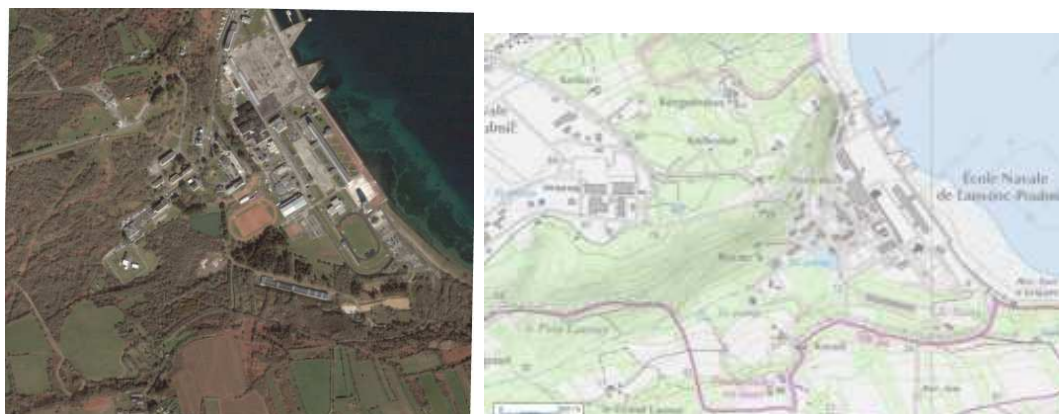
		Forêt : course facile
		Forêt : course ralentie
		Forêt : course difficile
		Forêt : course très difficile, impénétrable

Figure II.1 — Végétation et degré de pénétrabilité

de course d'orientation et par une photo aérienne extraite de Google Earth ©. Une première observation permet de remarquer que la carte de course d'orientation décrit plus d'objets différents que la carte IGN. Deuxièmement, la carte de course d'orientation donne plus d'informations rapidement accessibles qu'une photo aérienne. En effet, même si la photo aérienne permet de différencier autant de caractéristiques que la carte de course d'orientation, elle ne précise pas le niveau de pénétrabilité des différentes zones. Cette différence s'explique par le mode de production des cartes consistant en de nombreux relevés sur le terrain par des experts de la légende de course d'orientation. Un diplôme est d'ailleurs requis pour la production de telles cartes.

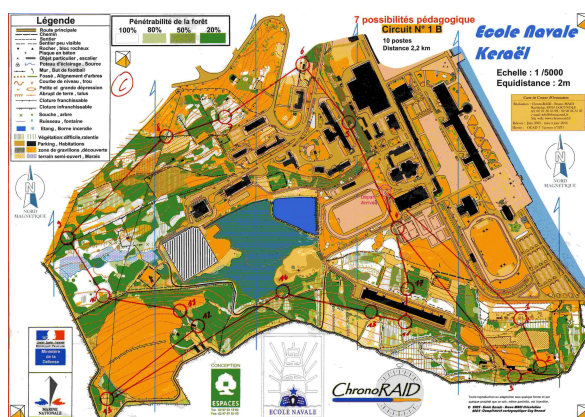
II.2.3 Contexte de l'expérimentation

La course d'orientation constitue notre cas d'étude, à savoir la navigation pédestre dans un environnement naturel. Une expérimentation a été conduite dans ce cadre.



(a) Photo satellite

(b) Carte IGN



(c) Carte de course d'orientation

Figure II.2 — Différentes représentations cartographiques

Quatorze coureurs expérimentés (11 hommes et 3 femmes, âgés de 20 à 35 ans) ont participé à une expérience consistant à décrire leur parcours après une course d'entraînement. Ils constituent le panel de notre expérimentation. Ce parcours correspond au trajet entre deux balises identifiées dans la figure II.3.

En vue d'obtenir des descriptions détaillées et pertinentes, il a été demandé aux membres de ce panel de décrire leur chemin comme ils le feraient à une personne non familière du lieu afin qu'elle puisse refaire le même parcours. Le but de cette description est important car il conditionne la description produite. En effet, le producteur de la description va orienter son discours pour s'adapter au besoin du receveur. Dans le cadre

de cette expérimentation le discours va être construit pour effectuer une navigation, il va comporter des informations dynamiques. Le mode de déplacement du receveur va également conditionner le discours. La familiarité présumée du receveur va permettre d'obtenir une description plus riche.

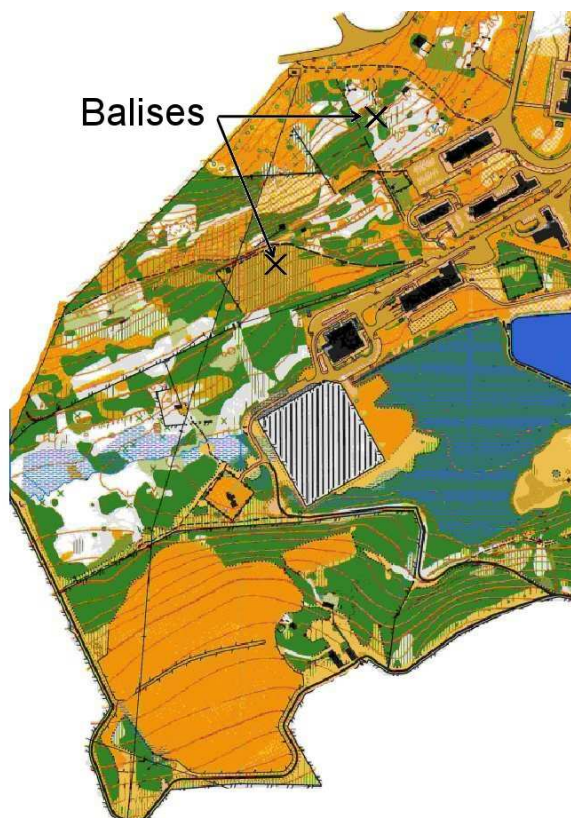


Figure II.3 — Environnement de l'expérience de navigation

II.2.4 Résultats

Les résultats obtenus par cette expérimentation font émerger un ensemble de caractéristiques de la navigation en milieu naturel. La première observation faite à partir des données recueillies porte sur le nombre important de références faites à des objets de type linéaire (cf. figure II.4). Ces références se font à l'aide de noms communs désignant les repères rencontrés lors de la navigation. Cette importance révèle le fait que la structure d'un environnement est largement influencée par le réseau spatial sous-jacent. Les objets linéaires agissent comme des formes structurantes et continues

dont le rôle est par conséquent différent des repères qui eux sont ponctuels ou assimilables à des points. Ces objets forment une sorte de réseau qui sert de support aux processus de navigation. Ce réseau est composé d'un ensemble de liens qui facilitent la construction d'une représentation mentale de l'environnement. De plus, ces objets linéaires peuvent être considérés du point de vue des affordances (Gibson, 1979) et des schémas d'image (Johnson, 1987 ; Raubal, 1997). Ils déclenchent des processus mentaux utiles à la représentation d'un environnement en structurant l'espace perçu et rendent ainsi plus facile la mémorisation d'un lieu ou d'une navigation. La présence d'une ligne haute tension dans un environnement découpe celui-ci en deux zones mais elle permet également de suivre le chemin qu'elle trace. Dans cet exemple, deux images schémas sont utilisées, la frontière (SPLITTING) et le chemin (PATH), pour représenter et mémoriser l'environnement.

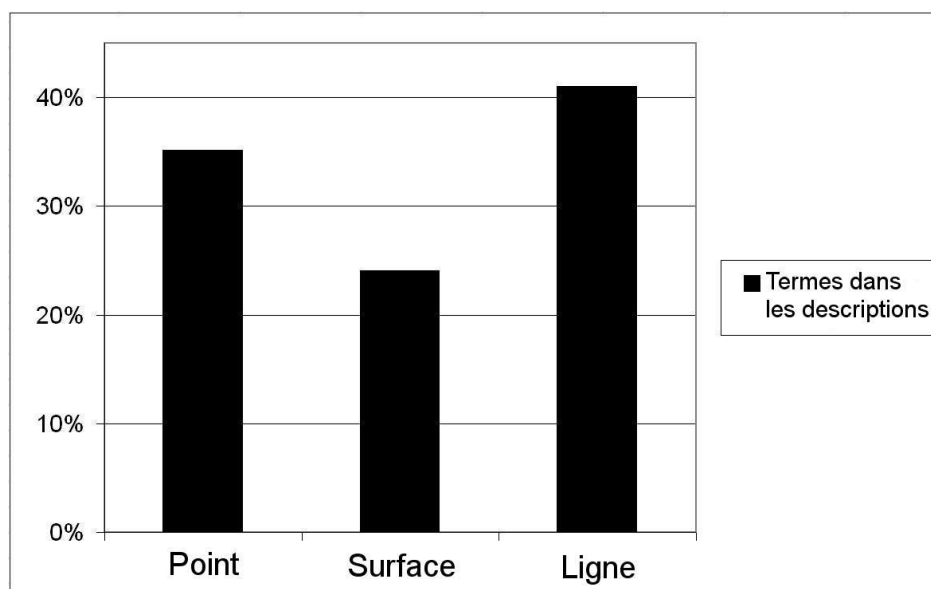


Figure II.4 — Diversité géométrique dans les descriptions en environnement naturel

Cette représentation structurelle de l'espace est complétée par des objets de type polygonal (*e.g.*, forêt) qui forment une partition de l'espace dans lequel les repères, considérés comme ponctuels (*e.g.*, un bâtiment), créent une sorte de couverture spatiale additionnelle et contextuelle. Les relations spatiales généralement décrites dans une navigation sont d'ordre topologique, métrique et directionnel (cf. chapitre I).

Dans le contexte des courses d'orientation, une tendance spécifique est révélée par l'importance du rôle joué par les termes exprimant l'orientation par rapport aux rôles

des autres mesures temporelles et métriques (*e.g.*, « je suis monté vers le NORD », description a de l'annexe B).

Ces constructions verbales sont essentiellement réalisées à partir d'adverbes et d'adjectifs. Les informations d'orientation sont importantes en navigation car elle traduisent la forme de la trajectoire 2D lorsqu'elle est associée à des actions. Cependant, nous remarquons que le rôle des constructions exprimant l'orientation est bien moins important que celui joué par les repères (cf. figure II.5).

Nous pouvons remarquer également la faible présence de termes exprimant une durée, ceci soulignant la prédominance de l'espace sur le temps dans les descriptions verbales d'itinéraire.

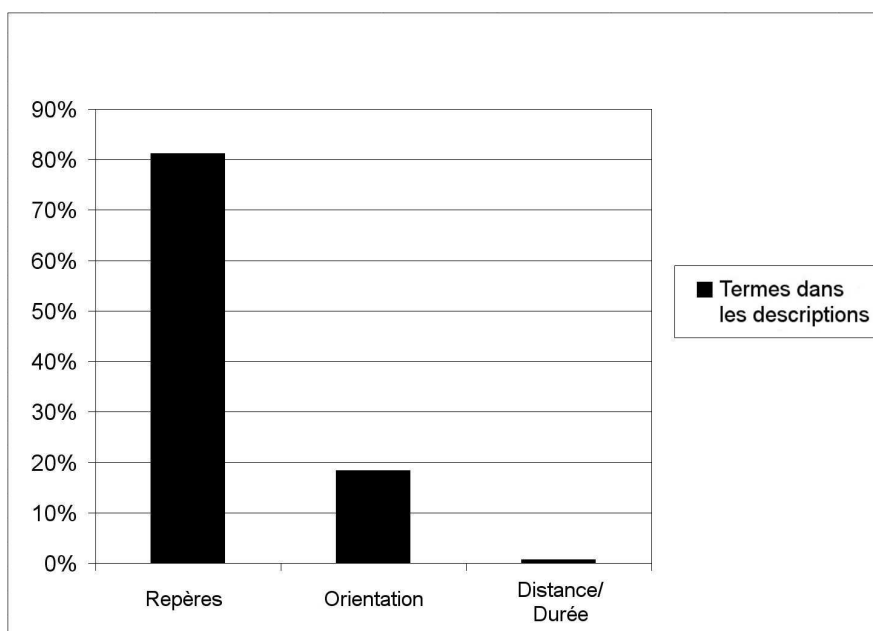


Figure II.5 — Catégories contenues dans les descriptions

Une autre observation réalisée à partir des résultats obtenus par cette expérimentation porte sur le nombre de dimensions (2D ou 3D) exprimées soit par des repères soit par des actions (cf. figure II.6). Ce nombre de dimensions est identifié de façon égale par des noms (*e.g.*, « colline ») ou des verbes (*e.g.*, « descendre »).

Il apparaît clairement que les entités 2D sont de loin les plus représentées avec une plus grande proportion de repères. Cette observation confirme également le rôle prédominant des repères dans les descriptions d'itinéraire.

L'explication du nombre plus grand de références à des objets ou des actions 2D par rapport à ceux exprimés en 3D provient d'une plus grande facilité de description et de mémorisation des termes et des actions 2D. La 3^e dimension est probablement moins précise dans un environnement naturel car plus complexe à appréhender pour être représentée dans des descriptions d'itinéraire. Par exemple, « monter un peu la colline », n'indique pas clairement la direction à prendre ni la fin de l'action.

Afin d'évaluer plus précisément l'interaction de la 3^e dimension avec les actions et les repères, nous utilisons la catégorisation de Denis (1997) introduite précédemment dans le chapitre I :

- Classe 1 : les actions exprimées sans repère
- Classe 2 : les actions exprimées avec références à un repère
- Classe 3 : les repères autres que ceux mentionnés avec une action
- Classe 4 : description d'un repère sans mentionner sa localisation
- Classe 5 : classe des commentaires, en d'autres termes tout ce qui ne rentre pas dans les autres classes

L'identification des termes exprimant la 3D montre qu'ils sont distribués de façon homogène en actions et en repères, et également selon la catégorisation de Denis (1997). Cela souligne le fait que la 3^e dimension spatiale est intégrée de façon homogène, et ceci à tous les niveaux, dans les descriptions d'itinéraires (cf. figure II.6).

II.3 Comparaison de navigation en milieux urbains et naturels

Dans le but de faire émerger les spécificités d'une navigation en milieu naturel, nous la comparons avec une navigation en environnement urbain. Cette comparaison se fait à deux niveaux différents. Il s'agit dans un premier temps de comparer les ontologies et les classifications cartographiques utilisées dans les deux environnements. Dans un deuxième temps, à l'aide des expériences réalisées par Denis (1997) et Przytula-Machrouh (2004), nous nous intéresserons aux caractéristiques des descriptions d'itinéraires dans ces deux milieux.

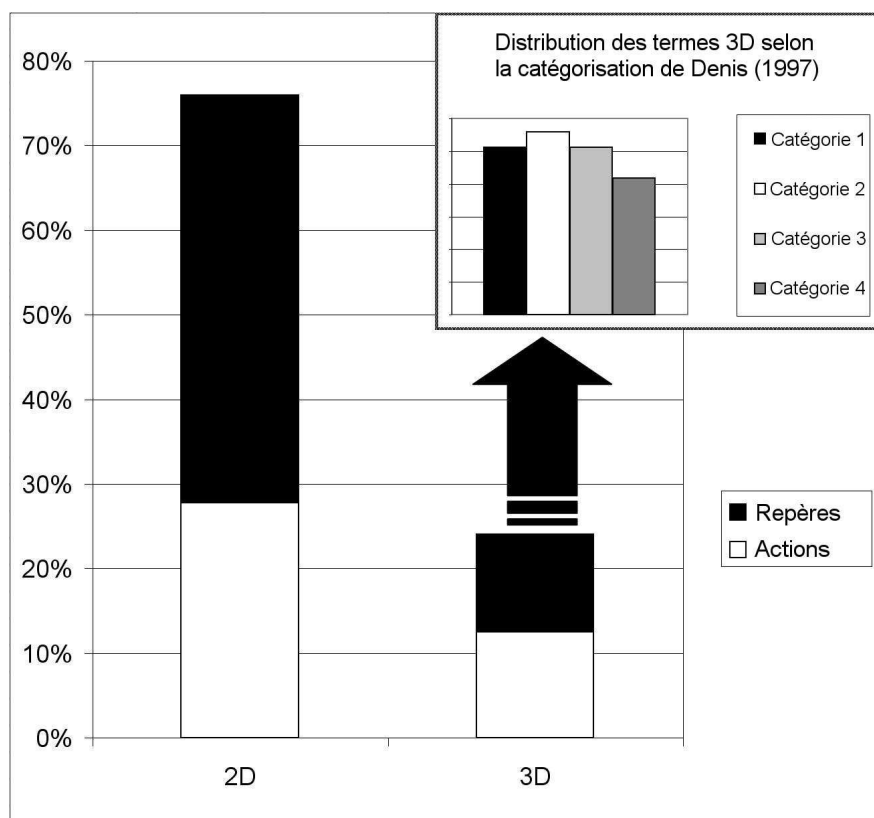


Figure II.6 — Termes 2D et 3D

II.3.1 Classifications cartographiques et ontologies

La première comparaison entre ces milieux naturels et urbains porte sur les ensembles d'objets permettant de décrire une navigation. Nous proposons d'étudier deux ensembles d'entités, l'un utilisé pour une navigation en milieu naturel, l'autre pour une navigation urbaine. Le but de cette comparaison est de faire émerger les différences et les points communs de navigations en milieu urbain et naturel d'un point de vue de la perception et conceptuel. En effet, les représentations externes reflètent les concepts mentaux impliqués dans un domaine de connaissances pour un milieu donné (Donald, 1991). Ce point de vue conceptuel aborde lui les modèles et les ontologies utilisés pour décrire les entités de ces milieux.

Les symboles de la carte de course d'orientation constituent l'ensemble des entités considérées pour le milieu naturel (voir annexe A). L'ensemble des entités utilisées pour une navigation urbaine, et considéré pour cette étude, est celui introduit par Maya (2001). Il se compose d'une hiérarchie d'objets permettant de décrire un environnement

urbain (voir figure II.7). Notons que la complexité et la profondeur de la structure de cette hiérarchie démontre une sémantique relativement riche.

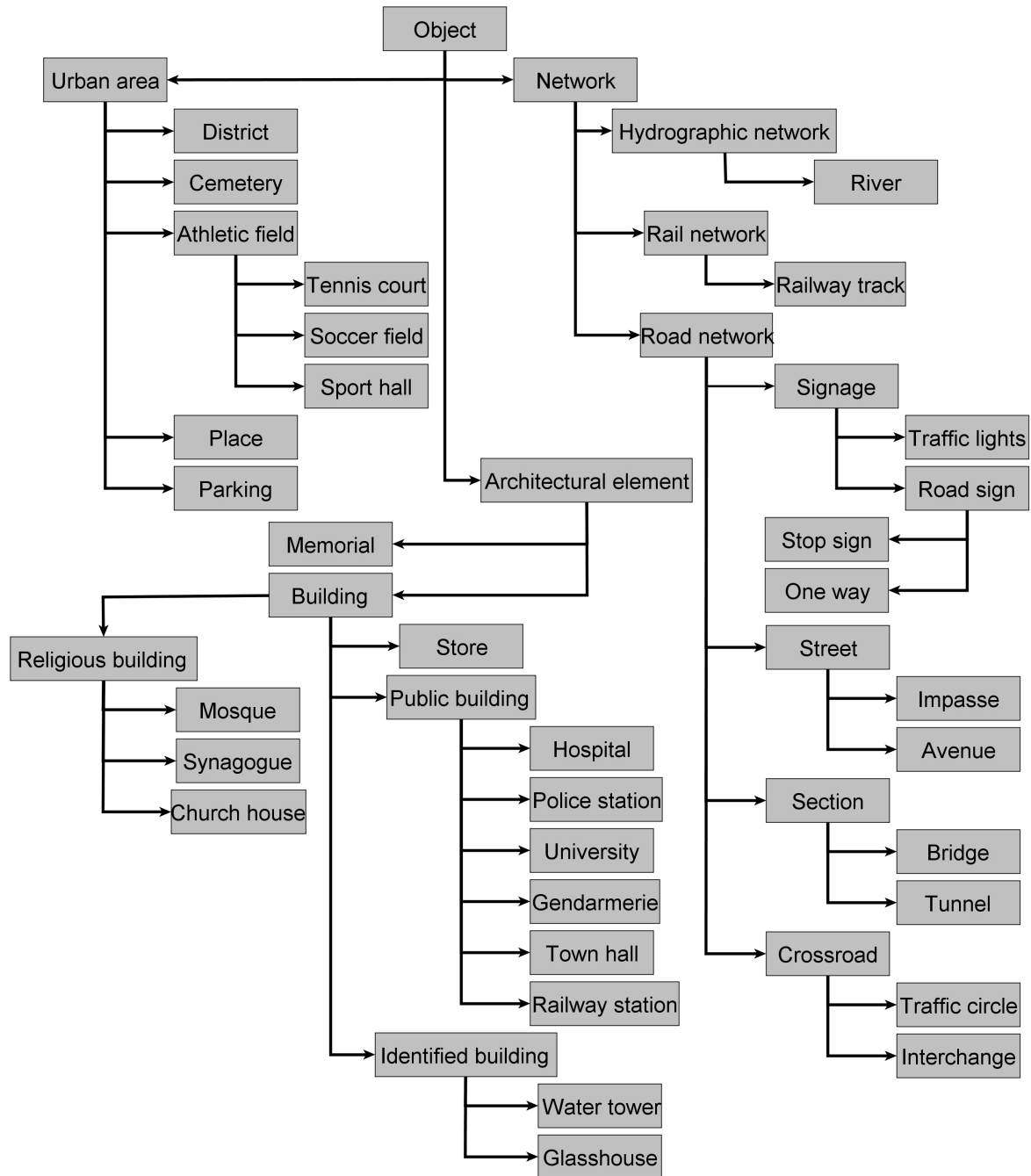


Figure II.7 — Représentation d'un l'environnement urbain (Maya, 2001)

Les entités identifiées dans ces deux ensembles sont regroupées par leur nature

géométrique (*i.e.*, ponctuelle, linéaire ou surfacique). La figure II.8 synthétise la diversité géométrique des entités utilisées pour des navigations en milieux naturel et urbain et fait émerger plusieurs constats. Nous pouvons constater que les distributions des entités selon leur type géométrique dans les deux milieux de navigation sont relativement proches. Les entités ponctuelles sont prédominantes, aussi bien en milieu urbain qu'en milieu naturel, bien que plus faiblement dans ce dernier. Elles représentent à elles seules plus de la moitié de l'ensemble de la classification. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette tendance. Les objets ponctuels, ou les objets perçus comme tels, sont peut-être les plus nombreux dans ces deux milieux. Ils sont également localisables d'une manière plus précise que les objets linéaires ou surfaciques, et constituent donc de bons candidats pour être utilisés comme repères en navigation. Les autres catégories géométriques, les lignes et les surfaces, sont moins représentées car leur géométrie est plus difficile à appréhender. Les entités décrites dans ces deux ensembles sont déjà interprétées et révèlent donc un niveau d'abstraction. Par exemple, les bâtiments sont ici vus comme des objets ponctuels pour la navigation. Ceci renforce le poids des objets ponctuels dans cette étude.

Il faut souligner que cette analyse, réalisée par l'étude de catégorisations d'entités provenant de deux légendes différentes, est d'ordre général et ne caractérise pas un mode de navigation particulier. Néanmoins, ces deux classifications sont des représentations externes d'environnement qui permettent d'analyser la conceptualisation des deux environnements (Couclelis, 1996).

II.3.2 Actions et repères

La seconde étude concerne l'analyse des actions et des repères exprimés dans l'expérimentation, et compare les résultats obtenus avec deux expérimentations comparables réalisées par Denis (1997) et Przytula-Machrouh (2004). Vingt personnes participèrent à l'expérimentation de Denis (1997), dix femmes et dix hommes âgés de 19 à 26 ans, tandis que l'expérimentation de Przytula-Machrouh (2004) regroupa 46 participants âgés de 18 à 24 ans. Le nombre de participants de ces deux expérimentations est légèrement plus important que celui de notre expérimentation, mais nous les considérons comme comparables. Le tableau II.1 résume les caractéristiques de chaque expérimentations.

La première analyse des résultats obtenus utilise une nouvelle fois la catégorisation

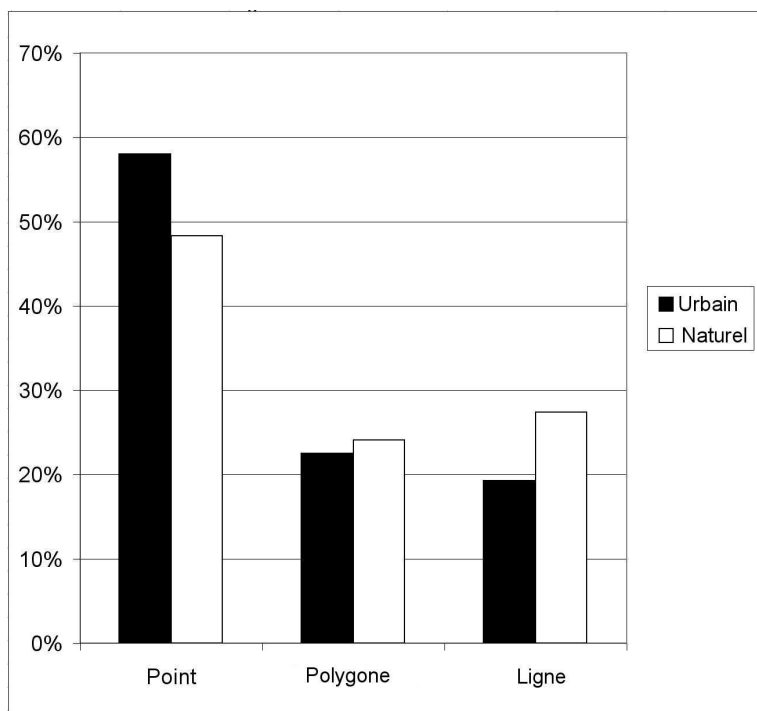


Figure II.8 — Diversité géométrique en navigations urbaine et naturelle

Tableau II.1 — Caractéristiques des expérimentations

Expérimentation	Type de descriptions recueillies	Environnement	Nombre de participants
Denis (1997)	Descriptions orales	Environnement urbain	20
Przytula-Machrouh (2004)	Descriptions textuelles	Environnement urbain	46
Brosset <i>et al.</i> (2008b)	Descriptions orales	Environnement naturel	14

de Denis (1997). Le nombre plus important d’occurrences de la classe numéro 2, qui répertorie les actions en rapport avec un repère, pour l’expérimentation de Przytula-Machrouh (2004), est l’observation la plus remarquable (cf. figure II.9). En effet, pour les expériences de Denis (1997) et de Brosset *et al.* (2008b) ce nombre est très proche, mais par contre il est double pour l’expérience de Przytula-Machrouh (2004). L’explica-

tion de cette différence entre les deux expériences menées en milieu urbain proposée par Przytula-Machrouh (2004) provient d'une différence de protocole expérimental. Cette dernière expérience est en effet réalisée en demandant des descriptions d'itinéraires écrites alors que Denis (1997) traite des descriptions d'itinéraires orales. Cette explication est confirmée par les résultats obtenus lors de notre expérimentation en milieu naturel. Le protocole utilisé pour cette expérimentation est similaire à celui utilisé par Denis (1997), et les nombres d'occurrences pour la classe 2 sont également similaires. Le nombre d'occurrences appartenant à la classe 2 apparaît donc comme une caractéristique des descriptions d'itinéraires textuelles. Il semble donc plus pertinent de comparer uniquement l'expérimentation faite en contexte naturel avec celle de Denis (1997) afin d'éviter le problème de la différence de protocole.

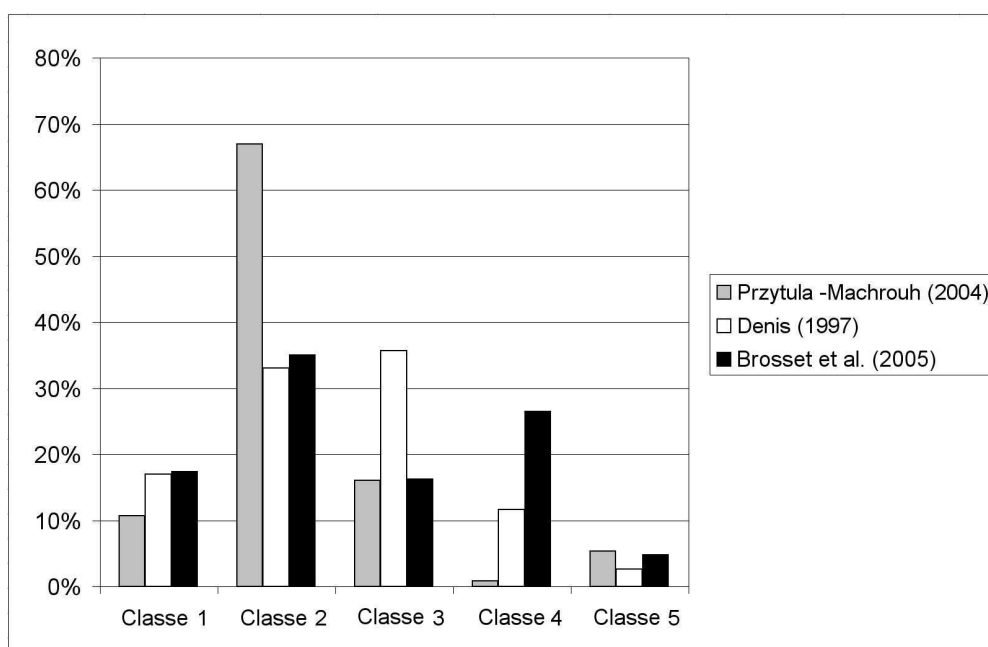


Figure II.9 — Analyse des expériences selon la catégorisation de Denis (1997)

Le nombre de références faites à des repères est donné par les occurrences de la classe 3 (mention d'un repère) et de la classe 4 (description de repères). Ce nombre est équivalent dans l'expérience de Denis (1997) et notre expérience en milieu naturel. Cependant, nous observons que dans l'expérience de Denis (1997) les repères sont plus fréquemment mentionnés (classe 3) que décrits (classe 4). Inversement, les repères décrits sont majoritaires dans notre expérimentation. Cette constatation peut s'expliquer par la nécessité de décrire d'avantage les repères dans une navigation en

milieu naturel, où les objets rencontrés sont souvent du même type et doivent donc être décrits précisément pour pouvoir les différencier. Cette observation doit cependant être pondérée car les descriptions d'itinéraires recueillies lors de notre expérimentation proviennent d'orienteurs experts qui sont plus à même de produire des descriptions précises. De plus, le choix d'une classe pour un terme peut être difficile et reflète par conséquent la subjectivité de la personne analysant la description. Quels que soient le milieu dans lequel a lieu la navigation, et la nature des descriptions (orales ou bien textuelles), le rôle des repères est essentiel dans la description d'un itinéraire.

Une autre propriété que nous souhaitons étudier est la distribution des repères le long des descriptions. À partir d'une expérience réalisée en environnement urbain, [Allen \(1997\)](#) a affirmé que le nombre de références à des repères augmente à la fin de la description qui devient ainsi plus précise pour atteindre le but de l'itinéraire. Cette affirmation a été contredite par [Lovelace *et al.* \(1999\)](#) qui ont observé une distribution homogène des références à des repères dans des descriptions d'itinéraires effectuées également en milieu urbain.

L'analyse de la distribution des références à des repères dans les descriptions d'itinéraires en milieu naturel montre également une homogénéité le long des descriptions (cf. figure II.10). Néanmoins, les références à des distances métriques n'apparaissent qu'à la moitié des descriptions et leur nombre augmente progressivement jusqu'au point final. Ce fait confirme l'hypothèse de [Allen \(1997\)](#), les descriptions d'itinéraires tendent à devenir de plus en plus précises, soit par une augmentation des références faites à des repères soit par l'utilisation de distances.

II.4 Discussion

De nombreuses études en cognition spatiale s'intéressent à la navigation urbaine, mais peu concernent la navigation en milieu naturel. La recherche présentée dans ce chapitre vise à caractériser la navigation pédestre en milieu naturel, du point de vue des ontologies et des structures verbales et spatiales utilisées, mais également à la comparer à la navigation urbaine.

Le protocole expérimental utilisé a consisté à interviewer plusieurs participants dans le cadre d'une course d'orientation. Cette expérimentation a permis de caractériser la navigation en milieu naturel. Plusieurs tendances ont été observées en analysant les

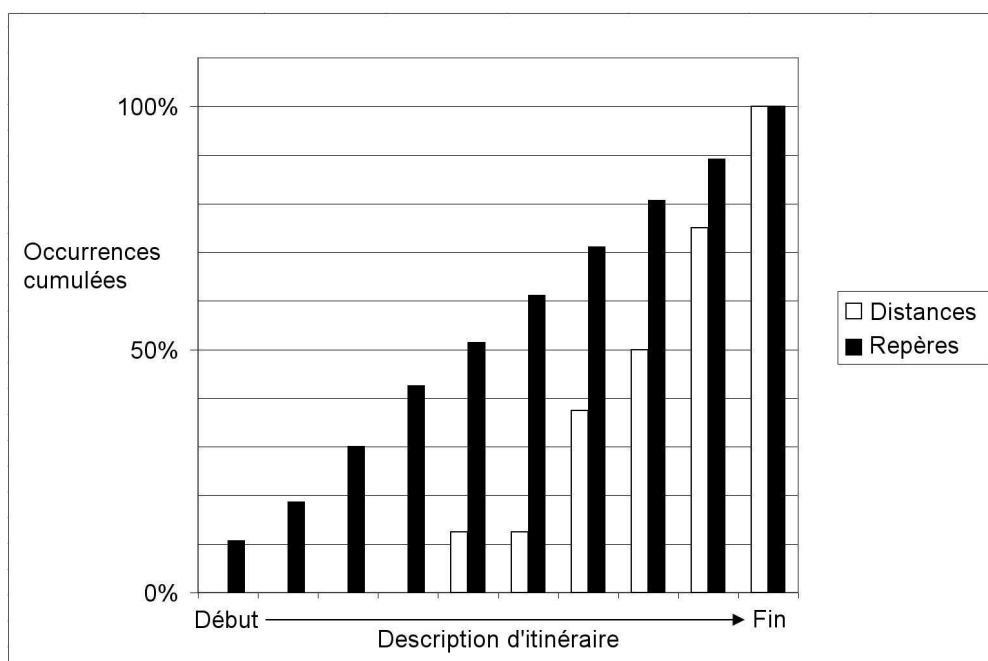


Figure II.10 — Distribution des repères et des informations métriques le long des descriptions d'itinéraire

résultats obtenus. Il apparaît que les repères mentionnés sont majoritairement de type linéaires. Cette prédominance s'explique par le besoin de **structure** pour la conceptualisation d'une navigation. En environnement naturel cette structure est absente ou peu visible d'où la nécessité d'utiliser des repères structurant l'espace. Au niveau des relations spatiales exprimées, les termes d'orientation sont largement majoritaires. Les notions de durée et de distance sont au contraire peu présentes dans les descriptions d'itinéraires recueillies. Cependant, le rôle des termes d'orientation est bien moins important que celui joué par les repères. L'étude des termes 2D et 3D contenus dans les descriptions a permis de montrer la prédominance de la 2D mais également l'homogénéité de la distribution de la 3D. En effet, la 3^e dimension apparaît de façon égale dans les actions et les repères, mais aussi dans les classes de la catégorisation de Denis (1997).

La comparaison des navigations urbaine et naturelle s'est faite à deux niveaux différents. Premièrement, l'analyse des ensembles de repères permettant de décrire une navigation dans les deux milieux a montré que les entités ponctuelles sont majoritaires dans les deux cas. Deuxièmement, l'expérience réalisée en contexte naturel a été confrontée à deux autres expériences réalisées en milieu urbain. L'utilisation de la

catégorisation de Denis (1997) a mis en évidence la cohérence des résultats obtenus avec le protocole utilisé. De plus, il apparaît que les repères sont plus souvent décrits dans une navigation en environnement naturel que dans une navigation urbaine. Ce constat peut s'expliquer par la ressemblance des repères se trouvant dans un même espace en milieu naturel. La prise en compte d'une catégorisation relativement précise est donc souhaitable afin de différencier chaque type de repères. La classification de la course d'orientation, précise et exhaustive, répond à ce besoin.

Une autre propriété examinée dans ce chapitre concerne la distribution des repères et des distances le long des descriptions. Le but est de savoir si la description devient de plus en plus précise ou non. Il apparaît clairement que la précision des descriptions augmente à la fin mais non pas avec une augmentation de repères, comme l'a observé Allen (1997), mais par la multiplication de références à des distances.

Cette analyse est fortement dépendante du lieu de l'expérience choisi ainsi que du panel des participants. Notre étude est à considérer comme qualitative et fait émerger des tendances plutôt que des faits. Les propriétés et les caractéristiques extraites par cette étude sur la navigation pédestre en contexte naturel vont permettre la construction d'une modélisation formelle adaptée. Les repères doivent être au coeur de la modélisation. La relation entre action et repère doit également être prise en compte dans le modèle. Enfin, la 3D constitue un élément indispensable à une modélisation de navigation en milieu naturel même si son rôle est bien moins important que la 2D.

Modélisation de descriptions d'itinéraires : une approche basée sur les graphes

Sommaire

III.1 Itinéraires : représentations actuelles	52
III.1.1 TOUR	53
III.1.2 PLAN	56
III.1.3 Discussion	57
III.2 Modèle formel d'itinéraire	58
III.2.1 Principes du modèle	59
III.2.2 Qualification du modèle	63
III.3 Prototype	65
III.3.1 Implémentation	66
III.3.2 Analyse de descriptions d'itinéraire	68
III.4 Mesures et comparaison de description d'itinéraire	72
III.4.1 Diversité structurelle	72
III.4.2 Richesse structurelle	73
III.4.3 Résultats	74
III.5 Discussion	76

Après une étude des descriptions d'itinéraires en milieu naturel, et la mise en évidence de leurs caractéristiques essentielles, ce chapitre aborde la modélisation d'une description d'itinéraire. Une telle approche relativement formelle de la description d'un itinéraire présente de multiples intérêts :

- la caractérisation et l'extraction automatique des différents éléments composant

- un itinéraire,
- la manipulation de ces éléments à l'aide d'un cadre mathématique,
- la comparaison de descriptions d'itinéraire,
- la définition de mesures pour la mise en évidence de propriétés,
- le codage informatique d'une description d'itinéraire permettant l'automatisation de différents traitements.

Ces avantages seront ensuite exploités afin de répondre à la problématique de la thèse, à savoir la géolocalisation automatique d'un itinéraire décrit verbalement. Ce chapitre commence par aborder la question de la représentation d'un itinéraire. Dans la section III.2 nous proposons une approche de modélisation de descriptions d'itinéraire. Cette modélisation a fait l'objet d'un prototype développé en Java présenté dans la section III.3. La section III.4 introduit la définition de plusieurs mesures visant à caractériser une description d'itinéraire. La section III.5 conclut ce chapitre par une discussion.

III.1 Itinéraires : représentations actuelles

Nous considérons intuitivement un itinéraire comme une suite d'étapes menant d'un point A, une origine, à un point B, une destination. Un itinéraire est communément défini comme un chemin à suivre ou suivi pour aller d'un lieu à un autre. Un itinéraire peut être défini plus formellement. Tout d'abord, il ne correspond pas à une réalité physique, il s'agit plus d'un concept logique. Un itinéraire peut prendre plusieurs formes, mais une forme minimale existe : c'est une séquence de points intermédiaires correspondant à des arrêts, des points caractéristiques, et des changements de direction. Un changement de direction amène la question du repère dans lequel est référencé un itinéraire. Dans le cadre de cette étude la notion d'itinéraire concerne principalement la navigation terrestre, un itinéraire peut être considéré comme faisant partie d'un univers à deux dimensions car deux coordonnées sont le plus souvent suffisantes pour différencier les points d'un itinéraire.

Nous retenons la notion d'itinéraire définie comme une séquence de points contenus dans un plan. L'ordre des points a de l'importance car il s'agit de points de passage, avec implicitement une notion de prédécesseur et de successeur. Un itinéraire est composé d'un ensemble de données spatiales et de temporelles. Un itinéraire possède une

longueur donnée qui est exprimée par une distance ou bien par une durée (une randonnée de 20 km / une randonnée de 5 heures). Une autre dimension caractérisant un itinéraire est le nombre d'étapes qui le constituent.

La figure III.1 illustre le rôle de l'ordre des points de passage. Ces deux tracés d'itinéraire possèdent le même ensemble de points mais ne correspondent pas à un même itinéraire. Ils ont des longueurs différentes d'un point de vue géométrique et probablement des temps de parcours différents. L'itinéraire III.1(a) est plus long que l'itinéraire III.1(b) mais pas d'un point logique (2 étapes dans les deux cas).

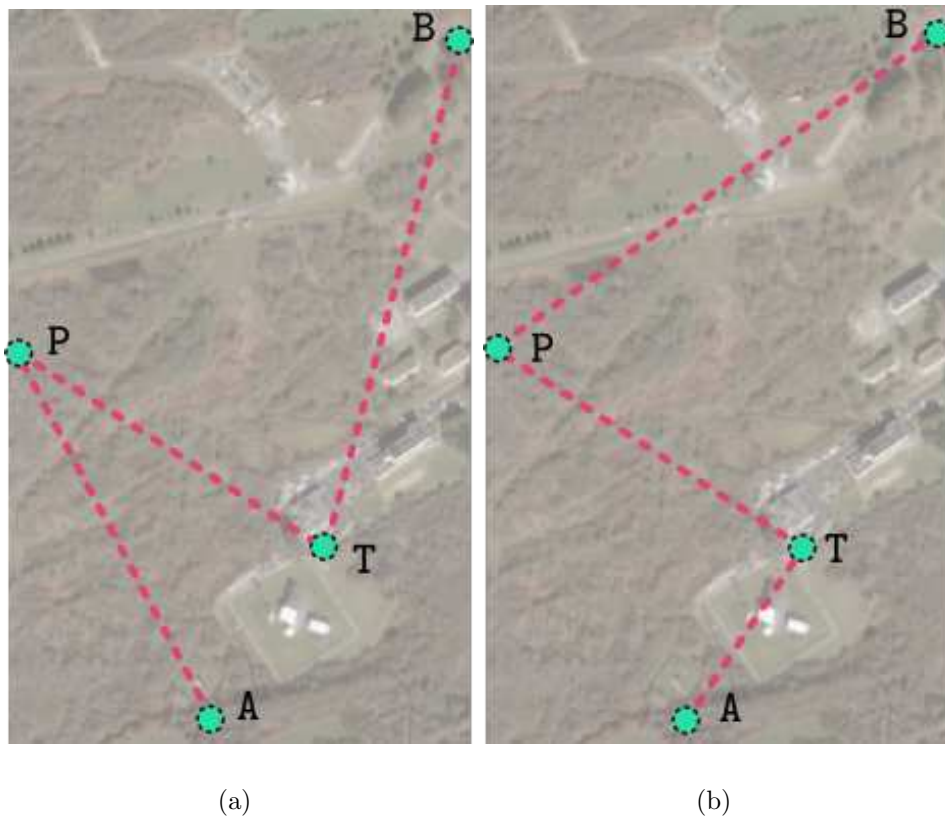


Figure III.1 — Itinéraire : une séquence de points ordonnée

III.1.1 TOUR

Le modèle TOUR introduit par Kuipers (1978) modélise un processus de navigation et les connaissances d'une personne de la structure spatiale d'un environnement à grande échelle. L'objectif de TOUR consiste à pouvoir répondre à des problèmes de

navigation et principalement à donner un itinéraire entre deux points. Orienté vers le domaine de la robotique, il représente une navigation par une séquence de « vues » et d' « actions. » La vue représente les données sensorielles de la personne se déplaçant, et l'action représente le déplacement physique effectué dans l'environnement. Une action est encadrée par deux vues et correspond à l'opération motrice produisant le changement de vue. Le schéma sensori-moteur constitué d'un quadruplet (but, situation, action, résultat) est l'élément de base du système TOUR. Une description d'itinéraire est composée d'un ensemble de schémas sensori-moteur. Par exemple, pour atteindre le but V_n :

$[V_n, V_i, A_i, V_{i+1}]$ où les V_i représentent les vues, A_i les actions avec $i = 0, \dots, n - 1$

TOUR contient plusieurs représentations correspondant à différentes connaissances spatiales. Elles sont classifiées en trois catégories principales :

- les représentations des connaissances d'un lieu particulier,
- la description de la position courante,
- les règles d'inférences permettant de manipuler les connaissances des deux premiers types.

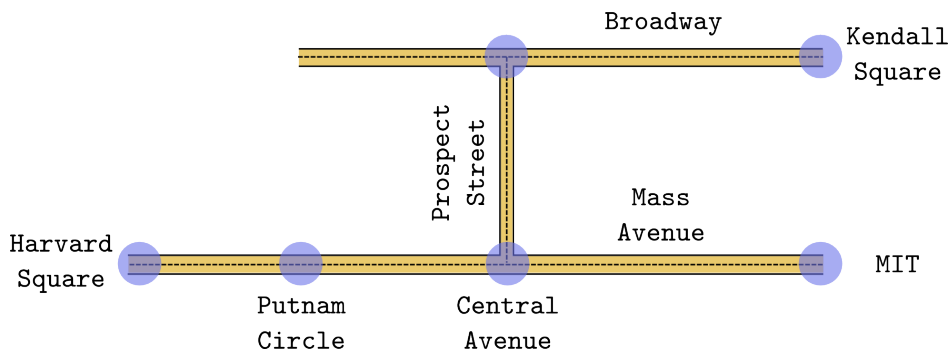


Figure III.2 — Exemple d'environnement modélisé par TOUR

Le système de connaissances de ce modèle est organisé en deux niveaux : un niveau topologique et un niveau métrique. Au niveau topologique, l'environnement est un ensemble de PLACE et de PATH modélisant respectivement la description d'un lieu et la description d'un chemin ou d'une rue. Une PLACE caractérise une entité à zéro dimension, une position ou un repère, tandis qu'un PATH est une description d'une entité à une dimension. Un objet de type PLACE est relié au PATH auquel il appartient et un objet PATH contient la liste des instances de type PLACE qu'il parcourt. Cette

liste est ordonnée et une direction (+,-) est définie permettant de savoir si un lieu est avant ou après un autre. Un troisième objet, REGION, est défini à partir de PLACE et de PATH. Comme son nom l'indique cet objet représente une région qui est constituée, dans le modèle TOUR, d'un ensemble de PLACE et de PATH.

Prenons l'exemple extrait de [Kuipers \(1977\)](#). Il faut dans un premier temps identifier les connaissances de l'environnement à partir desquelles le modèle va raisonner. Ces connaissances constituent la « carte cognitive » selon [Kuipers](#). La navigation de l'exemple se situe à Cambridge, Massachusetts, est plus particulièrement sur trois rues : Mass Avenue, Broadway et Prospect Street (cf. figure [III.2](#)). Les connaissances sont représentées à l'aide d'objets PLACE et PATH. À l'état initial les connaissances ne sont pas exhaustives comme le montre le tableau [III.1](#).

Tableau III.1 — Modélisation des connaissances initiales

PATH1 NAME : Mass Avenue ROW : (PLACE1 PLACE2 PLACE3)	PLACE1 NAME : Harvard Square ON : [PATH1 : Mass Avenue]
PATH2 NAME : Broadway ROW : (PLACE4)	PLACE2 NAME : Central Square ON : [PATH1 : Mass Avenue]
PATH3 NAME : Prospect Street ROW : (PLACE4)	PLACE3 NAME : MIT ON : [PATH1 : Mass Avenue]
	PLACE4 NAME : nil ON : [PATH2 : Broadway] [PATH3 : Prospect Street]

Une description d'itinéraire peut alors être traitée : « Prendre Prospect Street jusqu'à Central Square. Tournez à droite. Prendre Mass Avenue jusqu'à Putnam Circle. » Elle est transformée en un jeu d'instructions à l'aide des directives GO-TO et TURN (cf. tableau [III.2](#)).

Une nouvelle PLACE, « Putnam Circle », est automatiquement créée à partir de cette description. À chaque exécution d'instructions, le modèle TOUR va donc s'enrichir de nouvelles informations et ainsi simuler l'enrichissement des connaissances spatiales d'un être humain.

Tableau III.2 — Modélisation d'une description d'itinéraire avec le modèle TOUR

GO-TO :	FROM :nil
	TO :[PLACE2 : Central Square]
	ON : [PATH3 : Prospect Street]
	DIR : nil
TURN :	
	AT : nil
	ST1 : nil
	DIR1 : nil
	AMT : 90.
	ST2 : nil
	DIR2 : nil
GO-TO :	FROM :nil
	TO :[PLACE5 : Putnam Circle]
	ON : [PATH1 : Mass Avenue]
	DIR : nil

III.1.2 PLAN

Le modèle PLAN, abréviation de « Prototypes, Location and Associative Networks » a été développé par [Chown *et al.* \(1995\)](#) dans le but de résoudre quatre grands problèmes de navigation :

- l'identification des repères,
- la sélection de chemins,
- la sélection de la direction,
- la représentation globale d'un environnement.

Ce modèle vise la simulation des processus humains mis en jeu dans les problèmes de navigation. Il construit une représentation d'un environnement en niveaux successifs : reconnaissance des repères, création d'une structure directionnelle et création des cartes régionales. Ces niveaux correspondent aux différentes étapes de la construction des connaissances spatiales d'un environnement.

Le premier niveau permet de créer un réseau d'entités remarquables, les repères. Pour être considérée comme un repère, une entité doit répondre aux critères suivants :

- elle doit être remarquable et ceci de différentes vues possibles,
- elle ne doit pas avoir plus de 5 ± 2 repères à une même position (cette limite correspond au nombre d'unités mnésiques de l'empan de la mémoire de travail

humaine),

- un repère est lié à un contexte, une entité est remarquable dans certains contextes mais peut ne pas l'être dans d'autres.

Le deuxième niveau crée une « carte locale » qui décrit la direction à suivre pour aller d'une position à une autre. Ces cartes sont construites aux emplacements où se trouvent des repères.

À un niveau d'abstraction plus élevé, la représentation globale d'un environnement repose sur la construction de « cartes régionales ». Ces cartes sont délimitées par des points de passages (gateways) qui délimitent des régions. Pour une navigation à l'intérieur de bâtiments, les portes et les couloirs constituent les principaux points de passage de l'environnement. La navigation en milieu extérieur contient moins de zones clairement délimitées, mais les ponts et les limites de végétation sont des exemples de points de passage.

III.1.3 Discussion

Il existe d'autres modèles permettant soit de décrire une navigation soit de simuler une carte cognitive. Par exemple, le modèle Navigator décrit une représentation mentale d'un environnement de banlieue (Gopal *et al.*, 1989). Il est composé de deux modules : l'environnement objectif, qui représente la zone de banlieue dans laquelle la navigation a lieu, et l'environnement subjectif constitué de perceptions et de mémoires. Le but de ce système est la simulation d'un déplacement à partir de repères saillants. Le modèle Qualnav est basé sur le modèle TOUR et a pour but la navigation robotisée (Kuipers *et Levitt*, 1988). Les itinéraires sont assimilés à des états du monde (vue selon TOUR) pouvant être atteints par des déplacements du robot. Le modèle TRAVELLER simule l'apprentissage de réseaux dans le but de planifier des itinéraires (Leiser *et Zilbershatz*, 1989). Il se base sur un graphe orienté. Un ensemble d'ordres lui est donné afin qu'il « apprenne » de nouveaux itinéraires.

Werner *et al.* (2000) présentent un formalisme pour la modélisation d'itinéraire avec des graphes orientés. Un nœud est constitué d'une position décisive alors qu'un arc correspond à un lien physique entre deux positions. Ils définissent la notion de segment d'itinéraire comme un couple de positions décisives reliées l'une à l'autre par un chemin. Ce modèle est adapté à la navigation supportée par un réseau bien défini tel

Tableau III.3 — Comparatif des différents modèles

Modèle	Milieu	Repères	Actions	But
TOUR	Urbain	Non	Intégrées	Simuler l'acquisition des connaissances de navigation par l'homme
PLAN	Urbain	Intégrés	Non	Simuler des processus humains impliqués dans la navigation
Navigator	Urbain	Intégrés	Intégrées	Simuler des déplacements à partir de repères saillants
TRAVELLER	Réseau	Non	Intégrées	Simuler l'apprentissage de réseaux
Qualnav	Environnement ouvert	Oui au sens robotique	Intégrées	Navigation robotisée

que le réseau ferroviaire. Il se veut indépendant du domaine, du type de navigation ainsi que de l'agent effectuant la navigation (humain ou robot) pour constituer un squelette pour la modélisation de navigation par itinéraires (Krieg-Brückner et Shi, 2006).

L'ensemble des modèles présentés fait ressortir l'importance du rôle des positions, des repères et des actions. Une description d'itinéraire conserve l'ordre spatio-temporel de l'itinéraire (Allen, 2000), ce qui permet la modélisation par un graphe orienté. Ce graphe doit modéliser les repères et les actions effectuées pendant l'itinéraire décrit. Ces observations vont nous servir de base pour modéliser formellement une description d'itinéraire en milieu naturel selon les principes de la théorie des graphes. Ce cadre formel nous permettra de manipuler et d'analyser le contenu d'une description verbale d'itinéraire.

III.2 Modèle formel d'itinéraire

Le terme « modèle » est utilisé dans cette thèse comme la représentation conceptuelle d'un phénomène. Un modèle conceptuel est un ensemble théorique composé de

variables et de relations entre ces variables. Il fournit un cadre logique et mathématique qui peut être utilisé comme un support pour représenter un phénomène et raisonner à partir des informations identifiées dans le système. De telles représentations peuvent également être utilisées pour la simulation.

Les actions, les repères et les entités spatiales sont considérées comme les éléments fondamentaux de notre approche de modélisation (Brosset *et al.*, 2007). Associés les uns aux autres, les actions, les repères et les entités spatiales forment les expressions de navigation élémentaires, dans lesquelles les repères et les entités spatiales sont souvent associés à une action (Michon et Denis, 2001 ; Denis, 1997). Afin de clarifier et de préciser notre propos nous donnons quelques définitions de ces notions :

Définition III.1 (Position) *lieu dans l'espace géographique. Dans une description d'itinéraire, une position peut être définie par le début ou la fin d'une action de déplacement.*

Définition III.2 (Repère) *objet communément défini en navigation comme un point de décision saillant, ou assimilé à un point de décision, où des décisions de déplacement sont prises (Sorrows et Hirtle, 1999 ; Golledge, 1999).*

Définition III.3 (Action) *déplacement élémentaire qui peut être schématisé par un chemin direct entre deux positions.*

Définition III.4 (Entité Spatiale) *entité à une, deux ou trois dimensions ou non saillante qui apparaît dans la description d'un déplacement.*

Notre objectif est d'identifier et d'intégrer dans notre approche de modélisation les positions, les repères et les entités spatiales pouvant être géo-référencées au cours d'une navigation. Les actions constituent les liens entre ces entités.

III.2.1 Principes du modèle

Le modèle proposé s'appuie sur le formalisme simplifié de la théorie des graphes développé par Berge (1958). Un graphe est une représentation symbolique d'un réseau.

Deux types de graphes sont distingués : les graphes non-orientés et les graphes orientés appelés également digraphes. Ils sont constitués d'un ensemble de sommets, ou de noeuds, reliés par des arêtes, appelées arcs dans le cas des graphes orientés. Le champ des applications des graphes est vaste, allant de la modélisation de réseaux routiers à l'analyse de réseaux sociaux en passant par la conception des réseaux de télécommunication.

Un processus de navigation peut être modélisé comme un chemin selon les principes des graphes, où les noeuds du chemin représentent les positions, les arcs du chemin, les actions entre ces positions. Une primitive de déplacement est définie par une origine et une arrivée et constitue un segment d'itinéraire. Nous modélisons donc une description d'itinéraire par une séquence ordonnée de segments d'itinéraire élémentaires.

Les actions, les entités spatiales et les repères interagissent de diverses façons. Prenons l'exemple de la description d'itinéraire suivante : « Depuis la forêt, je suis allé jusqu'au pont ». Cette action est terminée par un repère (*i.e.*, le pont) et commence par une entité spatiale (*i.e.*, la forêt) qui ne peut être considérée comme un repère car elle n'est pas ponctuelle ou assimilable à une entité ponctuelle. Les actions peuvent également être associées à des repères ou des entités spatiales (*e.g.*, « traverser le pont », « suivre le cours d'eau »).



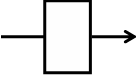
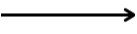
Afin de développer notre approche de modélisation, nous considérons le fait qu'une position peut être caractérisée par la présence d'un repère ou une entité spatiale et, de manière similaire, une action peut interagir ou non avec un repère ou une entité spatiale. Pour identifier clairement ces catégories, nous introduisons deux fonctions booléennes f et g , qui sont vraies lorsque respectivement, une position, ou une action, est en relation avec un repère ou une entité spatiale.

$$f : N \rightarrow \{0, 1\} \quad (\text{III.1})$$

$$g : E \rightarrow \{0, 1\} \quad (\text{III.2})$$

Plus formellement, un itinéraire est modélisé par un graphe orienté $G(N, E, l, d)$ où N représente l'ensemble des noeuds, E l'ensemble des arcs, l une fonction qui associe une position à un noeud, et d une fonction qui associe une action à un arc. Les ensembles

Tableau III.4 — Représentations graphiques des positions ou des actions

Définition	Représentation graphique
Position ne contenant ni repère ni entité spatiale	
Position contenant un repère ou une entité spatiale	
Action en interaction avec un repère ou une entité spatiale	
Action sans interaction avec un repère ou une entité spatiale	

L et A représentent respectivement l'ensemble des positions et l'ensemble des actions.

Une description d'itinéraire est modélisée par un ensemble ordonné r de triplets connectés (p_i, a_i, p_{i+1}) , appelés segments d'itinéraire, où $p_i, p_{i+1} \in L$ et $a_i \in A$. Un segment d'itinéraire élémentaire est caractérisé et enrichi par les valeurs données par les fonctions f et g , appliquées respectivement à p_i, p_{i+1} et a_i . Soit S l'ensemble des segments d'itinéraire et h une fonction qui qualifie un segment d'itinéraire :

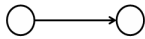
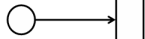

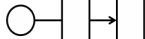

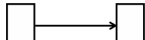
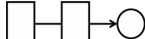

$$h : \begin{cases} S & \rightarrow \{0, 1\}^3 \\ (p_i, a_i, p_{i+1}) & \mapsto (f(p_i), g(a_i), f(p_{i+1})) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Définition III.5 (Segment d'itinéraire élémentaire) *Triplet composé d'une position de départ, d'une action de déplacement et d'une position finale.*

Chaque segment d'itinéraire élémentaire possède une représentation graphique permettant la manipulation d'une description d'itinéraire formelle (cf. tableau III.4).

Une description d'itinéraire peut être représentée visuellement grâce à la représentation graphique de sa séquence de segments d'itinéraire. L'image de l'ensemble S par la fonction h représente l'ensemble des segments d'itinéraire élémentaires illustré par le tableau III.5.

Tableau III.5 — Ensemble des segments d'itinéraire élémentaires

ID	Définition	Représentation booléenne	Représentation graphique
α_0	Une action qui commence par une position et qui se termine par une position	$[0, 0, 0]$	
α_1	Une action qui commence par une position et qui se termine par un repère ou une entité spatiale	$[0, 0, 1]$	
α_2	Une action, qualifiée par un repère ou une entité spatiale, qui commence par une position et qui se termine par une position	$[0, 1, 0]$	
α_3	Une action qui commence par une position, qualifiée par un repère ou une entité spatiale et qui se termine par un repère ou une entité spatiale	$[0, 1, 1]$	
α_4	Une action qui commence par un repère ou une entité spatiale et qui se termine par une position	$[1, 0, 0]$	
α_5	Une action qui commence par un repère ou une entité spatiale et qui se termine par un repère ou une entité spatiale	$[1, 0, 1]$	
α_6	Une action, qualifiée par un repère ou une entité spatiale, qui commence par un repère ou une entité spatiale et qui se termine par une position	$[1, 1, 0]$	
α_7	Une action, qualifiée par un repère ou une entité spatiale, qui commence par un repère ou une entité spatiale et qui se termine par un repère ou une entité spatiale	$[1, 1, 1]$	

III.2.2 Qualification du modèle

Le modèle présenté est complété, d'une part en qualifiant les actions, et d'autre part en caractérisant les repères ou les entités spatiales. Cette approche définit donc plusieurs niveaux de granularités qui permettent d'effectuer des modélisations et des analyses plus ou moins fines.

Les actions peuvent être précisées par des orientations cardinales ou relatives et également par une élévation. Des relations spatiales sont alors ajoutées à la modélisation en qualifiant les arcs. Une action peut être qualifiée par son orientation que se soit d'un point de vue allocentrique ou bien dans un repère égocentrique (Musto *et al.*, 1999 ; Freksa, 1992). Un repère allocentrique est exprimé en utilisant les points cardinaux tandis que des termes relatifs (devant, derrière, droite, gauche) utilisent un repère égocentrique et relatif. La phrase « aller au nord » contient une action qualifiée par une orientation cardinale. L'exemple « tourner à droite » contient également une action qualifiée par orientation mais cette fois c'est un terme relatif qui est employé. Plus formellement, soient Or_R et Or_C respectivement l'ensemble des orientations relatives et l'ensemble des orientations absolues, l'union de ces deux ensembles forme l'ensemble Or contenant toutes les orientations possibles pour une action. L'élément *null* est ajouté à l'ensemble pour dénoter l'absence d'indication sur l'orientation de l'action dans une description verbale d'itinéraire.

$$Or_R = \{R, L, F, B\}$$

$$Or_C = \{N, S, E, W, NE, NW, SE, SW\}$$

$$Or = Or_R \cup Or_C \cup \{null\}$$

La plupart du temps, une navigation pédestre peut être considérée comme une dynamique dans un espace en deux dimensions. Les êtres humains évoluant dans des environnements naturels intègrent cependant la troisième dimension dans leurs descriptions d'itinéraires (Brosset *et al.*, 2008b). Cette information vient enrichir les connaissances données sur l'environnement et améliore également la précision des descriptions d'itinéraire. Soit V l'ensemble des termes précisant la troisième dimension :

$V = \{+, -, =, null\}$ où le symbole $+$ représente une action montante, le symbole $-$ une action descendante et le symbole $=$ une action s'effectuant sur une zone de plat.

Deux fonctions sont alors définies afin d'intégrer les informations d'orientation et d'élévation à la notion de segment d'itinéraire élémentaire. Soit g^+ la fonction qui caractérise un arc comme interagissant avec un repère ou une entité spatiale et par l'orientation et l'élévation de l'action qu'il représente. La fonction h^+ caractérise alors un triplet $[n_i, e_i, n_{i+1}]$ par les résultats obtenus par la fonction f appliquée aux noeuds n_i et n_{i+1} , et également par le résultat de la fonction g^+ sur e_i :

$$g^+ : E \rightarrow g(E) \times Or \times V \quad (\text{III.4})$$

où E , Or et V sont respectivement les ensembles des arcs, des orientations et des élévations.

$$h^+ : N \times E \times N \rightarrow f(N) \times g^+(E) \times f(N) \quad (\text{III.5})$$















Cet enrichissement formel du modèle s'accompagne également d'une extension du langage graphique par l'addition de symboles représentant les éléments des ensembles orientation et élévation (cf. tableau III.6).

Après les actions, les repères et les entités spatiales peuvent être qualifiés de façon plus précise. En effet, dans les descriptions d'itinéraires ceux-ci sont nommés et peuvent être qualifiés par un type d'entité géographique particulier. Pour chaque catégorie d'environnement, ainsi que pour chaque type de navigation, un ensemble de repères et d'entités spatiales peut être identifié. Idéalement, cet ensemble dérive d'une référence standard ou d'une ontologie de l'environnement ou de la navigation étudiée. Par exemple, les types d'entités géographiques ne sont pas les mêmes en navigation urbaine et en navigation naturelle où les entités de la végétation seront plus nombreuses et variées. Ces catégories sont modélisées de la façon suivante. Soit L_{DK} l'ensemble des types de repères et d'entités spatiales de l'environnement où la navigation a lieu. Soient k_l et k_a les fonctions donnant respectivement le type de repère ou d'entité spatiale en relation avec la position ou l'action qui sont caractérisées par les fonctions f et g :

$$k_l : N \rightarrow P(L_{DK}) \quad (\text{III.6})$$

$$k_a : E \rightarrow P(L_{DK}) \quad (\text{III.7})$$

Tableau III.6 — Symboles d'orientation et d'élévation

Orientation	Symbole	Définition
Orientation cardinale		Nord
		Sud
		Nord Ouest
		Nord Est
		Sud Ouest
		Sud Est
		Ouest
		Est
Orientation relative		Devant
		Derrière
		Gauche
		Droite
Elévation		Haut
		Bas

La classification de repères et d'entités spatiales que nous utilisons dans le cadre de la navigation en milieu naturel est celle de la course d'orientation (voir Annexe A). Cette classification très détaillée (par exemple, un chemin, un sentier et un sentier peu visible sont différenciés) et répond ainsi au besoin de précision des descriptions de repères observé lors de l'expérimentation (cf. chapitre II).

III.3 Prototype

Le modèle formel ainsi que le langage graphique introduits sont manipulés à l'aide d'un prototype expérimental (voir Annexe D.1). Les descriptions verbales d'itinéraire constituent les données d'entrée du logiciel et permettent la modélisation interactive d'itinéraires fournis par des orienteurs. Dans la version actuelle de ce prototype, la transcription est effectuée manuellement car l'automatisation du processus

ne fait pas partie de l'objectif de cette recherche. Cependant, cette opération est envisageable en utilisant les nombreux travaux réalisés dans le domaine du traitement du langage naturel et plus particulièrement celui de l'interprétation des concepts spatio-temporels. Cette section présente les caractéristiques principales du prototype et quelques exemples d'application de celui-ci.

III.3.1 Implémentation

Le langage Java a été utilisé comme langage de programmation pour le développement du prototype. Les raisons de ce choix proviennent de la portabilité du langage Java ainsi que sa facilité de déploiement sur le Web notamment avec la technologie WebStart. L'interface graphique est composée de trois fenêtres (cf. figure III.3). La fenêtre principale permet de construire la description formelle d'une description verbale d'itinéraire s'affichant sous forme de texte dans la partie haute de cette fenêtre. Une description formelle d'itinéraire peut être construite avec plus ou moins de précision. Les deux fenêtres supplémentaires sont utilisées pour préciser la description en qualifiant les actions (orientation et élévation) et en indiquant le type de chaque repère selon la catégorisation choisie.

Prenons l'exemple suivant afin d'illustrer l'utilisation du prototype : « Je suis parti de la prairie vers le nord et j'ai franchi la colline. Après avoir tourné à droite et traversé la rivière, je me suis dirigé vers le nord jusqu'à la forêt. » Le premier segment d'itinéraire (« Je suis parti de la prairie vers le nord ») est composé d'une action qui commence par un repère (la clairière) et se termine à une position qui n'est pas précisée. La description d'itinéraire résultat de cette modélisation contient six nœuds et cinq arcs, dans laquelle quatre repères sont identifiés (clairière, colline, rivière, forêt). La figure III.3 illustre la représentation de cette description d'itinéraire à l'aide de l'interface du prototype.

Dans le contexte de la course d'orientation, les repères et les entités spatiales sont qualifiés selon la légende définie par la fédération internationale de l'orientation (IOF) telle que décrit dans le chapitre II. Ces symboles caractérisent de façon précise les entités géographiques ayant un rôle important dans la navigation pédestre. Les symboles identifiés sont classifiés en cinq catégories : le relief, les roches, l'hydrographie, la végétation et les constructions humaines (voir Annexe A). Au niveau du prototype, le choix du type de repère ou entité spatiale se fait à partir d'une fenêtre divisée en

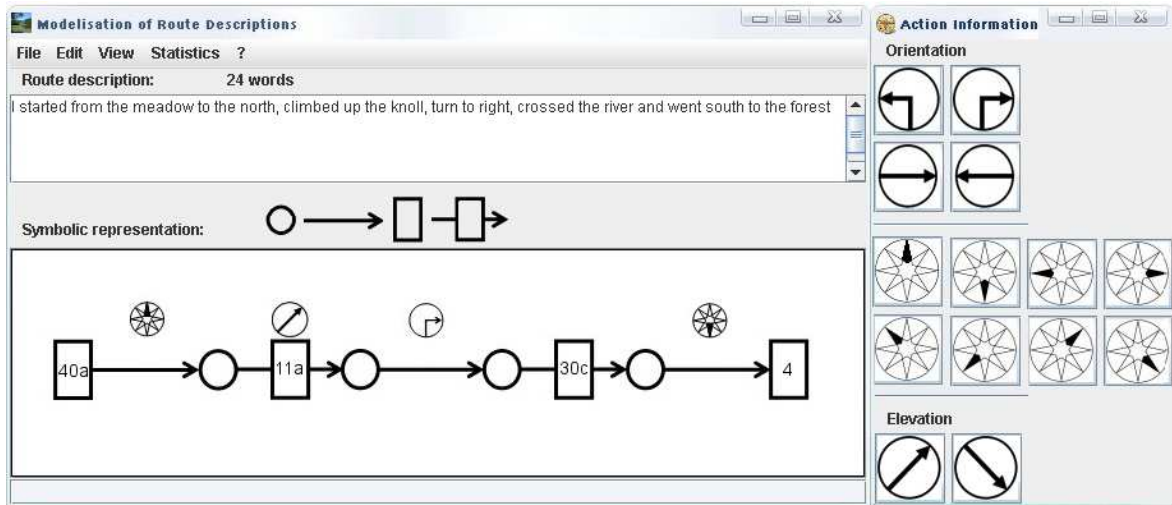


Figure III.3 — Du verbal à une description formelle et graphique

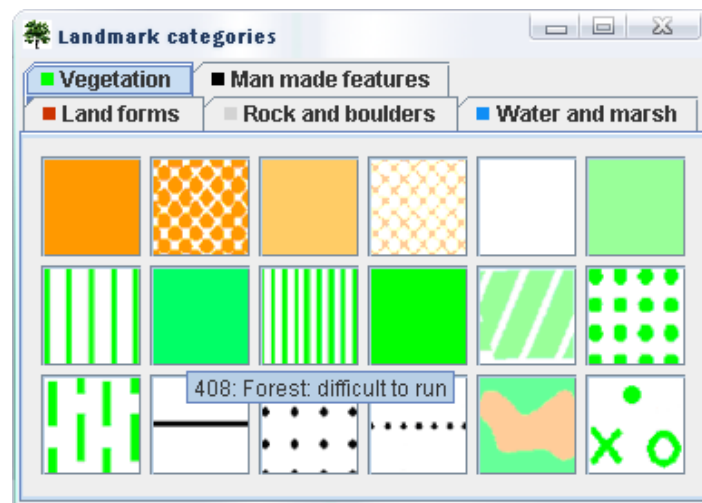


Figure III.4 — Choix du type du repère ou de l'entité spatiale

onglets. Chaque onglet regroupe les types appartenant à une catégorie. La figure III.4 montre les choix possibles pour les types de la catégorie végétation.

Cependant, et même si la classification de l'IOF identifie de façon précise un ensemble de repères et d'entités spatiales différentes, nous proposons une extension de cette légende mieux adaptée au but de cette recherche. Par exemple, le repère référencé par le terme « forêt » dans la description, correspond à plusieurs types dans la classification de l'IOF. De nouvelles catégories sont donc naturellement introduites (*e.g.*, 4 pour « forêt »). Un deuxième problème vient du fait qu'un repère donné peut

être caractérisé par plusieurs catégories. Par exemple, la terme « clairière » correspond aussi bien à l'entité spatiale « terrain découvert » qu'à celui « terrain découvert avec des arbres dispersés ». Plusieurs symboles sont donc rajoutés à cette classification.

III.3.2 Analyse de descriptions d'itinéraire

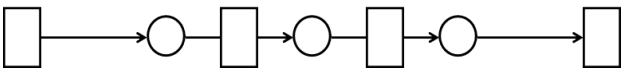
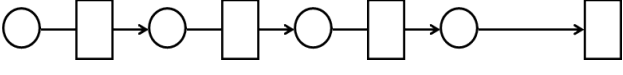
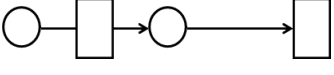
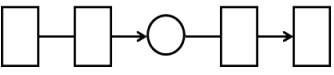
L'approche de modélisation fait émerger la structure fondamentale de l'itinéraire considéré qui n'apparaît pas clairement et directement avec une description verbale. Le tableau III.7 montre quelques exemples de descriptions d'itinéraires qui représentent et modélisent le même itinéraire (d_0, d_1, d_2, d_3). Ces descriptions sont des extraits simplifiés des descriptions recueillies lors de l'expérience décrite dans le chapitre II.

Ces représentations graphiques montrent la structure logique principale de chaque description d'itinéraire, même si quelques ambiguïtés du langage peuvent mener à de légères différences de constructions. La première description d_0 reprend l'exemple présenté dans la figure III.3 sans les termes d'orientation. Contrairement à la seconde description d_1 qui est pourtant relativement proche, la description d_0 commence par une entité spatiale. Cette différence est importante car la d_1 n'est pas entièrement bornée ce qui la rend bien moins précise. Par conséquent, comme le point de départ n'est pas précisément donné pour l'un d'entre eux, les deux itinéraires sont susceptibles d'avoir des structures différentes. Une recherche et une géolocalisation de ces itinéraires ne relèveront pas d'une même complexité algorithmique.

Une autre propriété à étudier concerne la comparaison quantitative des structures de graphes. Les descriptions décrivent le même itinéraire, cependant leurs représentations formelles ne possèdent pas le même nombre de nœuds (cinq nœuds pour d_0 alors que d_3 a seulement trois nœuds). Ceci montre clairement le fait que d_0 contient plus d'informations du point de vue logique. Au contraire, les descriptions d_2 et d_3 ont un nombre équivalent de nœuds alors que l'itinéraire d_2 est plus court.

À un autre niveau d'abstraction, les termes exprimant l'élévation et l'orientation mettent en exergue d'autres caractéristiques (cf. tableau III.8). La première description d'itinéraire (d_{0+}) est celle présentée dans la figure III.3. Les structures de d_{0+} et d_4 sont équivalentes, et leurs descriptions verbales respectives sont très ressemblantes. Néanmoins, l'orientation et l'élévation contenues dans ces descriptions sont très différentes. À l'opposé, d_{0+} et d_5 ont des structures bien différentes mais présentent

Tableau III.7 — Descriptions verbales et formelles : différences structurales

Id	Description et transcription
d ₀	<p>Je suis parti de la prairie, j'ai gravi la colline, traversé la rivière et je suis allé jusqu'à la forêt.</p> 
d ₁	<p>J'ai traversé la prairie, gravi la colline, traversé la rivière et je suis allé jusqu'à la forêt.</p> 
d ₂	<p>Après avoir gravi la colline, je suis arrivé à la forêt.</p> 
d ₃	<p>J'ai gravi la colline après la prairie. Ensuite j'ai traversé la rivière pour arriver à la forêt.</p> 

des similarités au niveau de l'orientation et l'élévation. Ceci montre que les coureurs n'apportent pas la même précision à leur description d'itinéraire. Certains sont relativement précis dans la structuration de l'itinéraire (d_4), tandis que d'autres sont plus précis dans l'expression des relations spatiales telles que l'orientation et l'élévation (d_5). Certains, enfin, sont précis dans les deux aspects (d_{0+}).

D'autres propriétés peuvent être extraites des descriptions d'itinéraires à partir du prototype. La figure III.5 illustre les propriétés dérivées de la description d'itinéraire modélisée, et calculées automatiquement lors de la construction de la description formelle. Premièrement, la distribution des différentes entités composant le modèle (position, position avec un repère ou une entité spatiale, action, action interagissant avec un repère ou une entité spatiale), caractérise relativement bien la structure de la description d'itinéraire en entrée (cf. figure III.5, en haut). Deuxièmement, l'importance relative des repères et des entités spatiales identifiées montre la richesse sémantique des descriptions d'itinéraire. La distribution des repères et des entités spatiales le long de la description donne une information supplémentaire sur l'homogénéité des descriptions (cf. figure III.5, en bas à gauche).

Enfin, la répartition des différents repères et des entités spatiales dans les catégories définies permet de caractériser l'environnement dans lequel s'est déroulé l'itinéraire décrit (cf. figure III.5, en bas à droite).

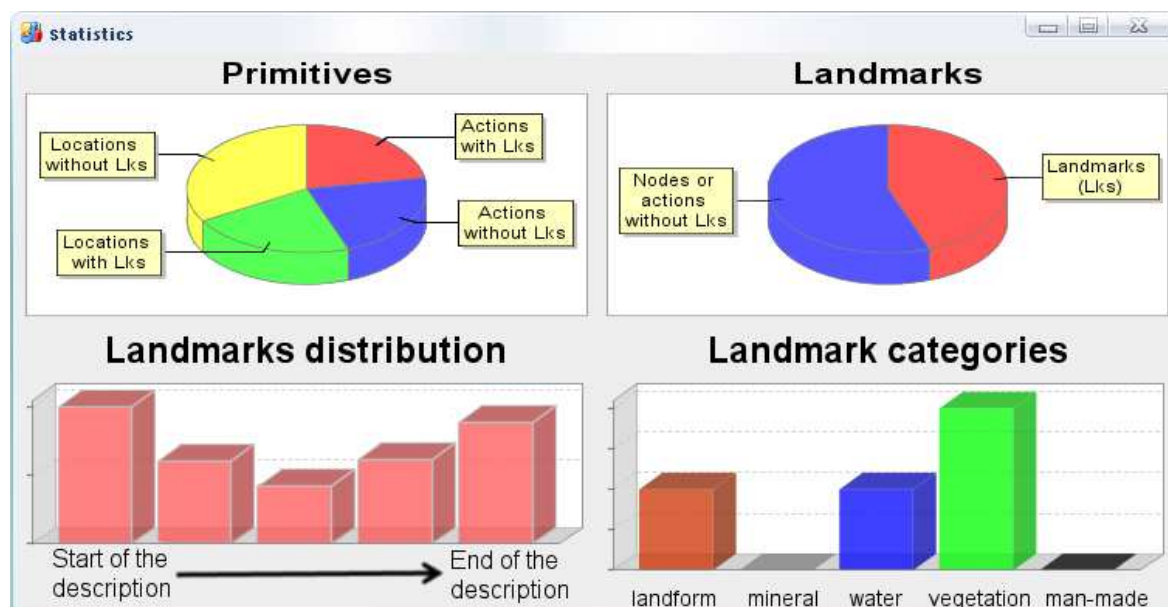
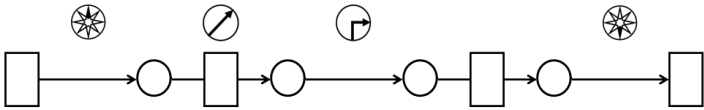
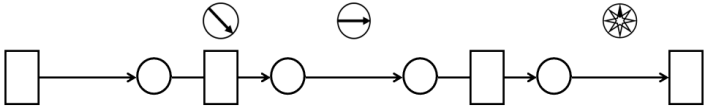
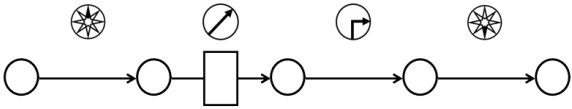


Figure III.5 — Analyse de descriptions d'itinéraire

Tableau III.8 — Descriptions verbales et formelles : différences d'orientation et d'élévation

Id	Description et transcription
d ₀₊	<p>Je suis parti de la prairie vers le nord, j'ai gravi la colline, tourné à droite, traversé la rivière et je suis allé au sud jusqu'à la forêt.</p>  $h^+(d_{0+}) = [$ <p>[1, (0, N, null), 0], [0, (1, null, +), 0], [0, (0, R, null), 0], [0, (1, null, null), 0], [0, (0, S, null), 1]]</p>
d ₄	<p>Je suis parti de la prairie, j'ai descendu la colline, j'ai continué tout droit, j'ai traversé la rivière et je me suis dirigé vers le nord jusqu'à la forêt.</p>  $h^+(d_4) = [$ <p>[1, (0, null, null), 0], [0, (1, null, -)0,], [0, (0, F, null), 0], [0, (1, null, null), 0], [0, (0, N, null), 1]]</p>
d ₅	<p>Je suis allé au nord, ensuite j'ai gravi la colline, j'ai tourné à droite et je suis allé au sud.</p>  $h^+(d_5) = [[0, (0, N, null), 0], [0, (1, null, +), 0],$ <p>[0, (0, R, null), 0], [0, (0, S, null), 0]]</p>

III.4 Mesures et comparaison de description d'itinéraire

Après avoir défini l'approche de modélisation et illustré l'intérêt de la démarche, cette section introduit plusieurs mesures permettant de caractériser et également de comparer des descriptions d'itinéraire. Le modèle de graphe support permet une manipulation ainsi que l'extraction de différentes propriétés des descriptions d'itinéraire. Notre objectif consiste à mettre en relief la quantité d'information contenue dans une description d'itinéraire et de quantifier les caractéristiques de ces informations.

III.4.1 Diversité structurelle

Une description d'itinéraire est avant tout un acte de communication entre deux personnes. Il s'agit d'un message contenant des informations spatio-temporelles. Il est donc possible d'utiliser la théorie de l'information développée par [Shanon et Weaver \(1949\)](#) afin de mesurer la quantité d'information. [Haken et Portugali \(2003\)](#) ont déjà auparavant utilisé cette théorie dans le but de quantifier l'information portée par les villes. Ils ont étudié le lien entre l'information portée par un système spatial à partir de sa perception et de sa mémorisation humaine. Ces travaux ont conduit à la définition d'une mesure de diversité spatiale reposant d'une part sur la première loi de la géographie (les entités proches sont plus en relation que les entités distantes), et d'autre part sur la théorie de l'information ([Claramunt, 2005](#)).

Selon la théorie de l'information, la quantité d'information contenue dans un message peut être mesurée par la diversité de l'information appelée entropie (H). Le terme entropie a été choisi à cause de la forte analogie entre la mesure de Shannon et l'entropie en thermodynamique. Cette mesure repose sur l'hypothèse que lorsque la diversité du message augmente alors la quantité d'information contenue dans ce message augmente également. L'entropie de Shannon est donnée par la formule suivante :

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (\text{III.8})$$

où $K \in \mathbb{R}^+$ est une constante et p_i représente le pourcentage d'entités qui appartiennent à la classe.

Cette mesure repose sur l'exploitation du nombre d'occurrences de l'alphabet contenues dans le message. La définition de l'alphabet et celle de l'ensemble des composants atomiques du message doivent être réalisées pour appliquer cette mesure. Dans notre approche une description est modélisée par un ensemble de segments d'itinéraire. Cet ensemble va constituer l'alphabet utilisé pour ce calcul de l'entropie.

Plusieurs niveaux de détails sont utilisables dans la construction d'un segment d'itinéraire : il est possible de prendre uniquement la structure, de considérer la présence d'une orientation ou d'une élévation, ou de faire la distinction entre chaque orientation et élévation. Considérons la structure des segments d'itinéraire avec l'alphabet constitué par les éléments du tableau III.5. Une description d'itinéraire est alors considérée comme un message composé d'occurrences des huit classes possibles. Soit h_S la fonction qui retourne l'entropie structurelle d'une description d'itinéraire :

$$h_S = - \sum_{i=1}^n p_{\alpha_i} \log_2 p_{\alpha_i} \tag{III.9}$$

Prenons l'exemple de la description d_0^+ : « Je suis parti de la prairie vers le nord, j'ai gravi la colline, tourné à droite, traversé la rivière et je suis allé au sud jusqu'à la forêt. » Sa description formelle est :

$$\begin{aligned} d_0 &= [[1, 0, 0], [0, 1, 0], [0, 1, 0], [0, 0, 1]] \\ &= [\alpha_4, \alpha_2, \alpha_2, \alpha_1] \end{aligned}$$

L'entropie structurelle correspondant à cette description est donnée par :

$$h_S(d_0) = \frac{1}{4} \log_2\left(\frac{1}{4}\right) + \frac{1}{2} \log_2\left(\frac{1}{2}\right) + \frac{1}{4} \log_2\left(\frac{1}{4}\right) = 1.5$$

III.4.2 Richesse structurelle

La diversité permet de caractériser une description d'itinéraire au niveau de sa structure. La quantité d'information contenue dans une description d'itinéraire peut être appréciée en prenant en compte les occurrences d'orientation, d'élévation, des repères et des entités spatiales. La trajectoire définie à partir des termes d'orientation et d'élévation porte la richesse des actions. Les repères et les entités spatiales fournissent des informations sur les positions traversées, et sur l'environnement dans

lequel se déroule la navigation. Soient r_{SP} la fonction retournant le nombre de labels d'orientation et d'élévation d'une description d'itinéraire formelle, et r_{SE} la fonction qui donne le nombre de labels de repères ou d'entités spatiales présents. La longueur de l'itinéraire est évaluée par la fonction r_l qui donne le nombre de segments d'itinéraire composant la description formelle.

$$\begin{aligned} r_{SP} &: R_T \rightarrow \mathbb{N} \\ r_{SE} &: R_T \rightarrow \mathbb{N} \\ r_l &: R_T \rightarrow \mathbb{N} \end{aligned} \tag{III.10}$$

où R_T est l'ensemble des descriptions d'itinéraires formalisées.

À l'aide de ces fonctions, nous définissons la notion de richesse d'une description (r_D) par la formule suivante :

$$r_D : \begin{cases} R_T & \rightarrow \{0, 1\} \\ r_D(d) & \mapsto \frac{\frac{r_{SE}(d)}{3} + \frac{r_{SP}(d)}{2}}{2r_l(d)} \end{cases} \tag{III.11}$$

où $d \in R_T$.

Cette mesure permet de quantifier l'information contenue dans une description d'itinéraire en se basant sur des critères spatiaux et sémantiques.

III.4.3 Résultats

Les mesures d'entropie et de richesse introduites ont été appliquées aux descriptions issues de l'expérience décrite dans le chapitre III (voir Annexes B et C). La première observation faite par l'application de ces mesures est qu'elles caractérisent de manière unique chaque description (cf. tableau III.9).

La figure III.6 montre l'influence de la longueur de la description sur la mesure de l'entropie. La description c , qui est la plus longue, a la valeur d'entropie maximale alors que les descriptions les plus courtes ont les valeurs les plus faibles. Cette observation remet en cause la pertinence d'une telle mesure pour comparer des descriptions

Tableau III.9 — Résultats expérimentaux

Id	Valeur de richesse	Valeur d'entropie structurelle
a	0,47	0,53
b	0,33	0,75
c	0,40	0,93
d	0,25	0,75
e	0,46	0,50
f	0,29	0,67
g	0,35	0,77
h	0,28	0,51
i	0,31	0,67
j	0,35	0,50
k	0,35	0,86
l	0,39	0,53
m	0,50	0,53
n	0,55	0,64

d'itinéraire. Cependant, il est naturel qu'une description longue soit considérée comme riche, c'est-à-dire, comme contenant beaucoup d'informations. La longueur logique d'une description est évaluée dans notre étude par le nombre de segments d'itinéraire élémentaires contenu dans sa description formelle, et non par le nombre de mots de sa description verbale.

Au contraire, la mesure de richesse est indépendante de la longueur de la description car elle est normalisée par la longueur logique. La comparaison de descriptions de longueurs différentes est ainsi possible avec la mesure de richesse (cf. figure III.7).

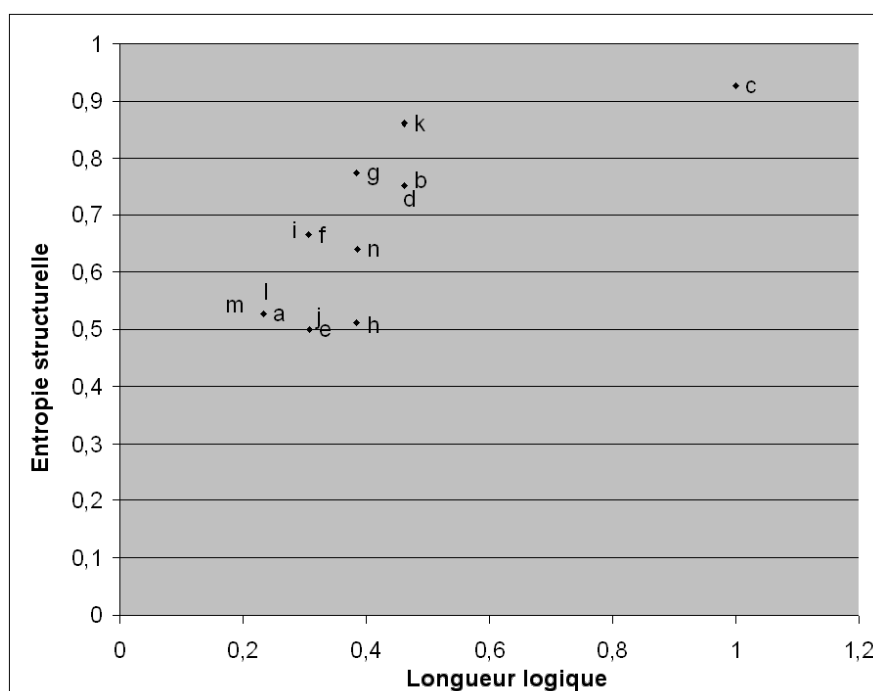


Figure III.6 — Distance logique et entropie

III.5 Discussion

La modélisation de processus de navigation en milieu naturel est un problème encore ouvert et peu traité à ce jour. Plusieurs modélisations ont été proposées dans les domaines de la robotique et de l'informatique (TOUR, PLAN, NAVIGATOR, ...). La comparaison de ces différents modèles nous a montré la pertinence d'une modélisation basée sur les repères, les positions et les actions. Les difficultés de la modélisation d'une navigation en milieu naturel à partir d'une description verbale d'itinéraire provient de l'absence de réseau support et de la richesse des informations fournies.

Le modèle proposé repose sur la représentation d'un itinéraire décrit par un chemin orienté au sens de la théorie des graphes, où les nœuds sont les étapes de l'itinéraire, et les arcs les actions de déplacement entre ces étapes. L'hypothèse principale de notre approche est la suivante : une position peut être un repère ou une entité spatiale ou non, et une action peut interagir ou non avec un repère ou une entité spatiale. À partir de cette hypothèse nous avons défini le concept de segment d'itinéraire élémentaire comme un triplet (position, action, position). À partir de ce concept, un langage graphique a été développé. L'utilisation du formalisme des graphes nous a permis de définir

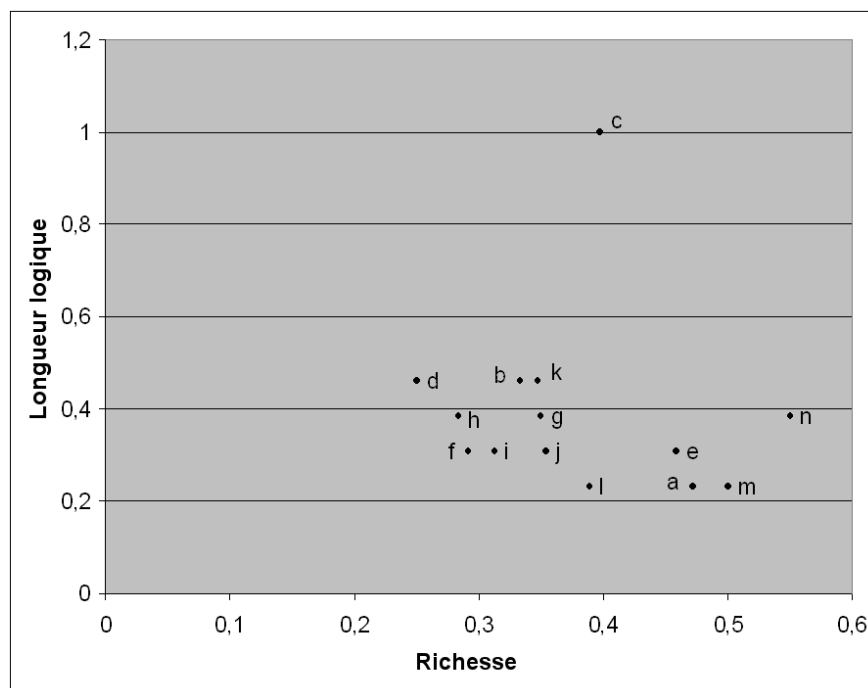


Figure III.7 — Mesure de richesse et longueur logique de description d'itinéraire

un ensemble de mesures caractérisant une description verbale d'itinéraire à différents niveaux d'abstraction (logique, spatiale et sémantique).

La validation de la modélisation présentée a été réalisée par le développement d'un prototype permettant de modéliser une description verbale d'itinéraire. Ce prototype permet la construction graphique d'une description formelle d'itinéraire. Il met en avant plusieurs calculs caractérisant la description modélisée ainsi que l'environnement. À partir du modèle, deux mesures ont été définies : l'entropie structurelle et la richesse. Ces mesures évaluent la quantité d'information contenue dans une description verbale d'itinéraire. Cette approche de modélisation, l'ensemble des fonctions et des mesures développées ainsi que le prototype implémenté, permettent l'extraction et la manipulation des informations spatiales et sémantiques d'une description verbale d'itinéraire.

 Sommaire

IV.1 Optimisation	81
IV.1.1 Catégories de problèmes d'optimisation	82
IV.1.2 Méthodes de résolution	83
IV.2 Algorithmes de colonies de fourmis	89
IV.2.1 Inspiration du monde des fourmis	89
IV.2.2 Métaheuristique pour l'optimisation par colonies de fourmis	91
IV.3 Principes de l'algorithme développé	95
IV.3.1 Initialisation	95
IV.3.2 Exécution	97
IV.3.3 Implémentation	101
IV.3.4 Analyse des résultats	105
IV.4 Évaluation des paramètres de l'algorithme	105
IV.4.1 Performance globale	106
IV.4.2 Influence du nombre de fourmis	107
IV.4.3 Influence du taux d'évaporation	107
IV.4.4 Influence de la distance de visibilité	110
IV.4.5 Influence de la longueur de la description	111
IV.4.6 Evaluation du temps de calcul	111
IV.5 Discussion	112

Ce chapitre a pour objectif de proposer des solutions valides au problème de géolocalisation d'un itinéraire à partir d'une description verbale. La principale difficulté consiste à transformer une description qualitative, une des-

cription verbale, en une représentation quantitative permettant une géolocalisation.

À la lecture d'une description verbale d'itinéraire, il est impossible de construire directement une solution satisfaisant l'itinéraire décrit et cela pour plusieurs raisons. La première explication de cette difficulté provient de la complexité du problème posé et du nombre bien trop grand de solutions possibles provenant forcément d'une résolution par approximation. Prenons par exemple le cas d'un environnement avec de nombreux repères du même type que ceux évoqués dans la description : le choix du repère le plus approprié ne sera pas évident. Construire une solution à partir du début d'une description suppose également que le premier point après le point de départ soit bien choisi et corresponde parfaitement à la description verbale pour permettre de trouver les autres. Une solution peut aussi être globalement très proche de la description verbale donnée en entrée, alors que le premier point de cette solution ne correspondrait pas tout à fait. Enfin, les données provenant de la description verbale d'itinéraire peuvent ne pas être respectées à la lettre car elles sont qualitatives. L'orientation, par exemple, peut ne pas être strictement respectée. Suivre la direction de l'ouest ne doit pas être interprété comme prendre un cap à 270° , mais plus comme une orientation générale à respecter. Cet ensemble de contraintes et leur enchaînement rendent donc le problème complexe.

Ces contraintes sont extraites de la description formelle de l'itinéraire à géolocaliser. La figure IV.1 illustre le principe général de la résolution du problème de géolocalisation d'itinéraire à partir d'une description verbale d'itinéraire. Il s'agit de trouver une séquence de points de l'environnement, définis par leurs coordonnées, correspondant à la description d'itinéraire considérée. C'est donc un problème d'optimisation combinatoire. Plus formellement, ce problème de géolocalisation peut être défini par le triplet $P = (S, \Omega, f)$ où S correspond à l'espace de recherche, Ω représente un ensemble de contraintes, *i.e.*, la description formelle et f la fonction à optimiser. La fonction f évalue l'adéquation d'une séquence de points avec la description formelle d'itinéraire. Un mécanisme d'amélioration des solutions permet d'obtenir des solutions optimales au problème.

Ce chapitre commence par une présentation des problèmes d'optimisation et des différentes méthodes de résolution dans la section IV.1. Nous présentons les algorithmes de colonies de fourmis dont s'inspire notre approche dans la section IV.2. L'algorithme développé fait l'objet de la section IV.3. La section IV.4 concerne l'évaluation des paramètres de l'algorithme par une série de tests effectués avec le prototype implémenté.

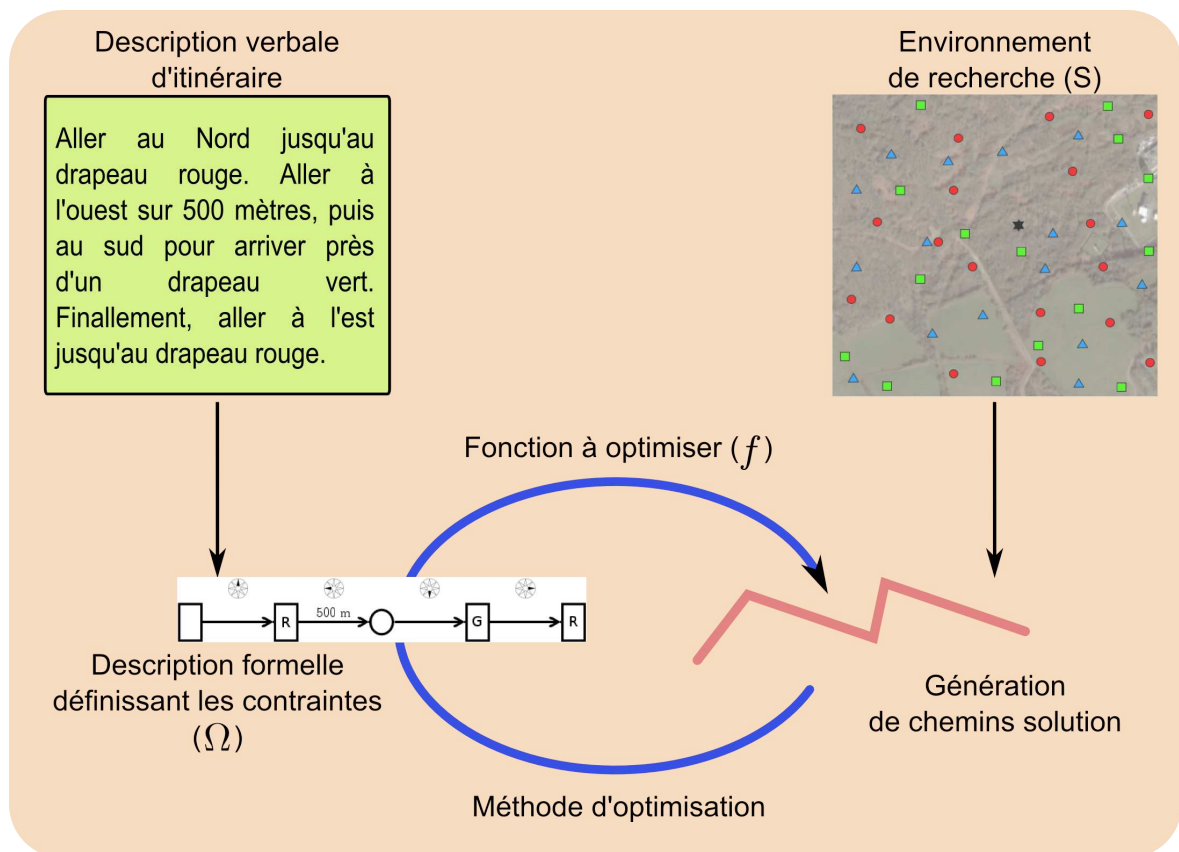


Figure IV.1 — Principe général de la recherche d'itinéraire

Il s'en suit une discussion sur la méthode, les résultats obtenus et les différentes perspectives de recherche dans la section IV.5.

IV.1 Optimisation

L'optimisation est une branche des mathématiques et de l'informatique qui étudie les problèmes de la forme suivante (Collette et Siarry, 2002 ; Dréo *et al.*, 2003) :

Soit $f : S \mapsto \mathbb{R}$ une fonction de l'ensemble S vers l'ensemble des nombres réels. Quel est l'élément \bar{x} qui maximise la fonction f ? Il s'agit donc de trouver \bar{x} tel que $f(\bar{x}) \succeq f(x) \forall x \in S$

Maximiser f est équivalent à minimiser $-f$, par conséquent, un algorithme permettant de connaître le minimum ou le maximum suffit à résoudre un problème d'op-

timisation. L'ensemble S appartient à \mathbb{R}^n et il est la plupart du temps contraint par un ensemble de critères (Ω). Deux types de problèmes d'optimisation sont généralement distingués : les problèmes « discrets » (ou combinatoires) et les problèmes à valeurs continues. Si $S \in \mathbb{N}^n$ alors le problème est dit combinatoire sinon il s'agit d'optimisation à valeurs continues. Le problème que nous traitons peut être ramené à un problème combinatoire (cf. section IV.3), nous détaillerons donc cette classe de problème. Différentes méthodes de résolution par métaheuristiques seront évoquées dans la deuxième partie de cette section.

IV.1.1 Catégories de problèmes d'optimisation

Parmi les problèmes d'optimisation combinatoire certains sont dits « difficiles » car il n'existe pas d'algorithme pouvant les résoudre dans un temps acceptable, c'est-à-dire ayant une complexité polynomiale. Ces problèmes d'optimisation classiques peuvent être classés en quatre grandes catégories : les problèmes d'affectation, les problèmes de localisation, les problèmes d'ordonnancement et les problèmes de transport (Dhaenens *et al.*, 2002).

Les problèmes de type affectation ont pour objectif d'affecter un ensemble d'objets à des places appropriées. Un des problèmes les plus connus de cette catégorie est sans doute le problème du « sac à dos » (Martello et Toth, 1990). L'objectif est de remplir un sac à dos à capacité limitée, avec des objets ayant une valeur et un poids, de la façon la plus optimale possible. Il s'agit de trouver la combinaison d'objets donnant le plus de valeur au sac en minimisant son poids.

Les problèmes de localisation (Drezner, 1995) consistent à placer un ensemble de services différents tout en minimisant une fonction de coût. Plusieurs contraintes doivent être respectées comme la distance minimale entre services coopérants ou bien la capacité des services. Les problèmes d'ordonnancement (Rardin, 1998) tels que la planification d'équipes ou bien la création d'emplois du temps constituent une catégorie à part entière. Un exemple caractéristique est la conception d'emplois du temps pour une école, en gérant la disponibilité des salles, des professeurs et en respectant l'ordre des cours ainsi que la cohérence des groupes d'élèves. Le problème du voyageur de commerce (Lawler *et al.*, 1985) est peut-être l'exemple le plus caractéristique des problèmes de type transport. Ce problème est le suivant : un voyageur de commerce doit passer une fois et une seule fois par toutes les villes d'un réseau donné et ceci en minimisant

la longueur du parcours effectué. Il faut trouver le parcours hamiltonien le plus court.

Le problème de géolocalisation d'itinéraire décrit que nous proposons d'étudier consiste à identifier une séquence de points dans l'espace géographique correspondant à une description d'itinéraire. Il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire car, pour un ensemble fini de points dans un espace géographique, il convient d'identifier un sous ensemble fini de points. Ce problème est proche du problème du voyageur de commerce. Dans les deux cas, il faut trouver une séquence de points qui respecte un ensemble de contraintes :

- plus court circuit hamiltonien pour le problème du voyageur de commerce,
- respect d'une description d'itinéraire qualitative pour le problème de géolocalisation d'itinéraire décrit.

Les caractéristiques du problème de géolocalisation d'un itinéraire à partir d'une description verbale sont les suivantes :

- il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire,
- le problème est particulièrement complexe car il est défini par une description verbale imprécise et un environnement géographique complexe,
- plusieurs solutions sont possibles,
- il est possible qu'il n'existe pas de solution optimale au problème,
- le point de départ de l'itinéraire est connu.

IV.1.2 Méthodes de résolution

Il existe un grand nombre de méthodes de résolution des problèmes d'optimisation. La figure IV.2 relie les différentes méthodes d'optimisation d'après Collette et Siarry (2002). La géolocalisation d'itinéraire décrit est un problème combinatoire. Ce problème ne possède pas de méthode de résolution exacte permettant de connaître les points constituant les étapes d'un itinéraire en utilisant une description verbale. Les caractéristiques du problème à résoudre nous permettent de considérer une méthode de résolution approchée et plus particulièrement une métaheuristique.

Le principe d'une métaheuristique est de partir d'une solution, ou d'un ensemble de solutions, générées pseudo-aléatoirement, et d'appliquer une méthode « d'amélioration » dans le but d'obtenir une solution proche de l'optimale. Le terme

« métaheuristique », provient d'heuristique. Une heuristique est une méthode de résolution donnant une solution approchée à un problème ne pouvant être résolu de manière exacte dans un temps de calcul acceptable. Une heuristique calcule, en un temps polynomial, une solution optimale à un problème « difficile ».

Une métaheuristique est également une méthode d'approximation d'une fonction, généralement itérative et stochastique. Tout comme une heuristique, ce type de méthode permet d'obtenir dans un temps raisonnable une solution approchée du problème et non une solution exacte. Contrairement à une heuristique, définie pour un problème ou un type de problèmes particuliers, une métaheuristique possède un niveau d'abstraction élevé : il s'agit d'une méthode de résolution approximative pouvant s'adapter à un large domaine de problèmes différents.

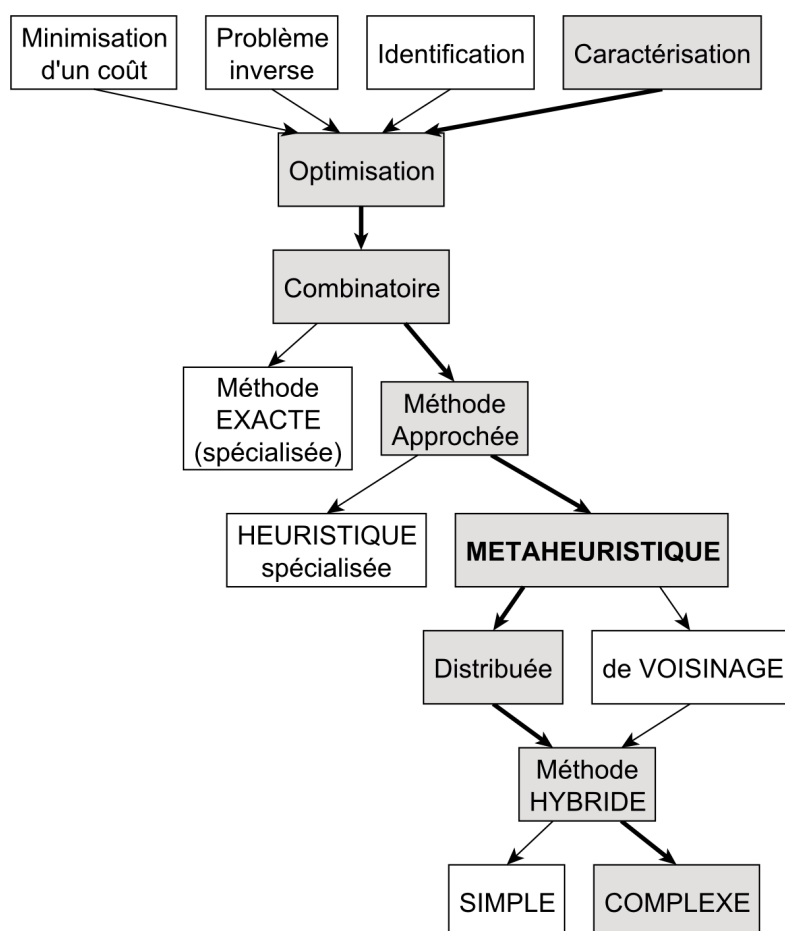


Figure IV.2 — Classification des méthodes d'optimisation

La figure IV.3 caractérise les différentes métaheuristiques. Nous ne détaillons ici que certaines parmi les plus utilisées : la recherche Tabou (Glover, 1986), le recuit simulé (Kirkpatrick *et al.*, 1983), les algorithmes génétiques (Goldberg, 1989) et les algorithmes de colonies de fourmis (Dorigo, 1992).

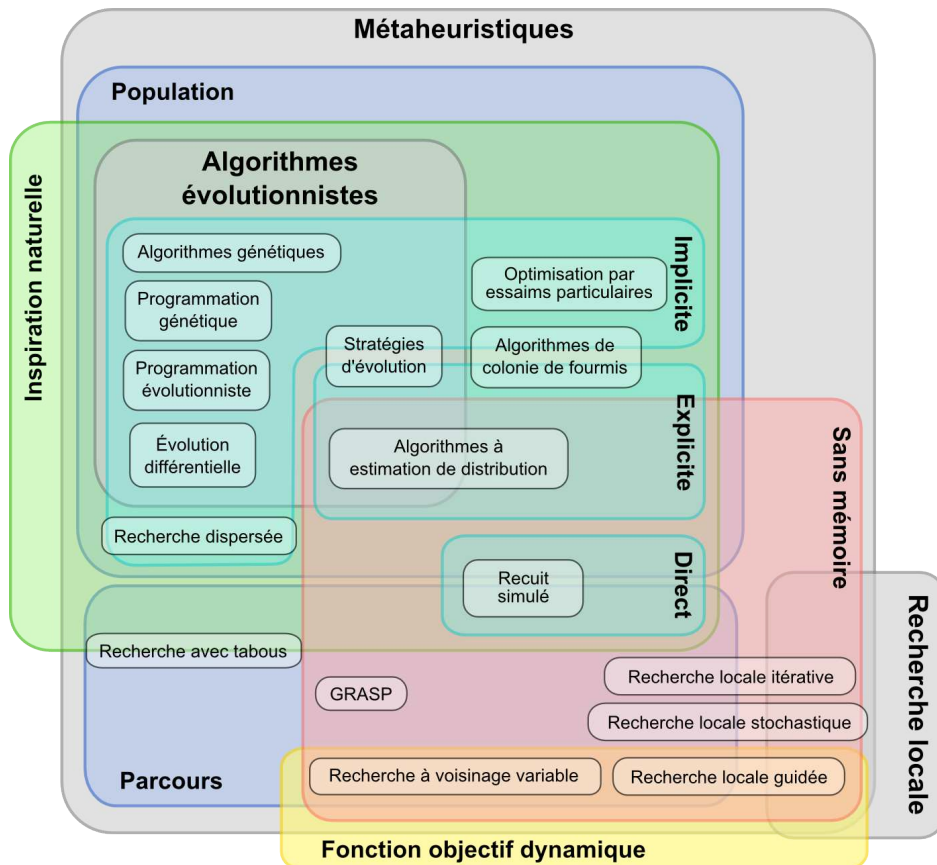


Figure IV.3 — Classification des métaheuristiques (Source : Wikipédia, auteur : Johann Dréo)

La méthode Tabou utilise la mémoire de l'algorithme afin d'éviter un optimum local. Son principe consiste à analyser le voisinage de la solution courante, et à sélectionner la solution qui améliore, ou qui altère le moins possible, la fonction à optimiser. Chaque solution est conservée en mémoire pour éviter d'une part de revenir sur une solution déjà examinée, et empêcher ainsi de boucler sur deux solutions, et d'autre part, pour retenir la meilleure solution. Au bout d'un nombre d'itérations fixé à l'avance l'algorithme s'arrête et fournit la meilleure solution obtenue (voir l'algorithme 1). L'optimisation du placement de composants électroniques constitue un exemple d'application de la recherche Tabou.

Algorithme 1 Algorithme simple de recherche Tabou

Entrées: s : solution courante, s_{best} : meilleure solution, L_t : liste Tabou**Sorties:** s_{best} : meilleure solution $s \leftarrow \text{GenererSolutionInitiale}()$ $L_t \leftarrow \text{InitialiserListeTabou}()$ $s_{best} \leftarrow s$ **tantque** (! ConditionArret) **faire** $A \leftarrow \text{SolutionsVoisinesNonTaboues}(s)$ $s \leftarrow \text{Meilleure}(A)$ $\text{MiseAJourListeTabou}()$ **si** $(f(s) < f(s_{best}))$ **alors** $s_{best} \leftarrow s$ **finsi****fin tantque**Retourner s_{best} .

L'algorithme du recuit simulé s'inspire directement du recuit des métaux en métallurgie. Un métal refroidissant trop rapidement contient de nombreux défauts, c'est un optimum local, alors qu'un autre refroidissant plus lentement présente une structure plus ordonnée, il correspond à un optimum global. Le recuit réel correspond à une méthode désordre/ordre dont l'objectif vise à obtenir une structure ordonnée correspondant à un minimum d'énergie. Le recuit simulé est l'adaptation de ce principe à des problèmes d'optimisation. Dans le cas du recuit réel le but est de minimiser la fonction d'énergie alors que le recuit simulé permet de minimiser la fonction d'un problème d'optimisation. Le principe général est donné par l'algorithme 2. La température est le paramètre de contrôle fondamental de la méthode. L'algorithme est composé de deux boucles. La première correspond à la boucle de la température qui décroît au fur et à mesure. La seconde correspond à l'équilibre thermostatique. L'algorithme commence à une température élevée et consiste à effectuer de « légers changements » à la solution courante. Ces changements sont acceptés selon une loi probabiliste dépendant de la température courante. La loi de Metropolis ([Metropolis et al., 1953](#)) est en pratique la loi d'acceptation utilisée. Concrètement, à haute température le nombre de changements acceptés est important même si ces changements ne conduisent pas forcément à une meilleure solution. Avec la diminution de la température de moins en moins de changements n'améliorant pas la solution seront acceptés. L'inconvénient majeur de cette méthode est lié au réglage des paramètres (température initiale, conditions d'arrêt, méthode de calcul des changements, ...). Cette méthode est utilisée dans le traitement d'images pour reconstituer des images 2D ou 3D à partir de données in-

complètes dans les domaines de la médecine ou de la géologie.

Algorithme 2 Algorithme simple de recuit simulé

Entrées: s : solution courante, s_{best} : meilleure solution, T : température

Sorties: s_{best} : meilleure solution

```

tantque (! ConditionArret1) faire
  tantque (! ConditionArret2) faire
     $s \leftarrow \text{ChangementSimple}(s)$ 
    si ( $\text{Acceptation}(s, s_{best}, T)$ ) alors
       $s_{best} \leftarrow s$ 
    fin tantque
  fin tantque
   $T \leftarrow T - 1$ 
fin tantque
Retourner  $s_{best}$ .

```

Les algorithmes génétiques imitent l'évolution des organismes selon la théorie de Darwin (Darwin, 1859). Les solutions sont considérées comme des individus rassemblés dans une population. Cette méthode n'améliore pas seulement une solution mais la population entière. Un algorithme génétique est itératif, une itération est appelée génération pour rester dans l'analogie du monde du vivant. Au fil des générations, les solutions vont se reproduire entre elles, muter, et ainsi proposer de nouvelles solutions. Comme dans la nature, seules les solutions les plus adaptées vont rester. La mesure de l'adaptation correspond au score donné par la fonction à optimiser. Les difficultés de mise en oeuvre de tels algorithmes sont le codage des solutions ainsi que la définition des opérateurs de reproduction et de mutation qui doivent permettre d'améliorer les solutions. L'algorithme 3 est un exemple d'algorithme génétique simple. Les applications de ces algorithmes sont, par exemple, la sélection de sondes bathymétriques pour la cartographie marine (Brosset et Devogele, 2004), ou l'optimisation des réseaux UMTS par France Telecom (Jamaa *et al.*, 2003).

Les algorithmes de colonies de fourmis, appelés également algorithmes de fourmis artificielles, reproduisent en partie le comportement de certains insectes sociaux dans la nature, tels que les fourmis. L'observation des fourmis dans la nature a montré qu'elles étaient capables de résoudre des problèmes difficiles, notamment identifier le plus court chemin entre le nid de la colonie et une source de nourriture. Le principe de cette méthode de résolution repose essentiellement sur la coopération entre fourmis par le moyen d'une substance chimique, appelée phéromone, qui attire les autres fourmis. Meilleur est le parcours proposé par les fourmis, plus grande est la quantité

Algorithme 3 Algorithme génétique simple

Entrées: P : Population d'individus solutions**Sorties:** une solution optimale $P \leftarrow \text{GenererPopulationInitiale}()$ **tantque** (! ConditionArret) **faire** $\text{SelectionReproduction}()$ $\text{Croisement}()$ $\text{Mutation}()$ $\text{Evaluation}()$ $\text{RemplacementPopulation}()$ **fin tantque**Retourner MeilleurIndividu .

de phéromone déposée. L'algorithme 4 donne les grandes lignes d'un algorithme de colonies de fourmis. Les colonies de fourmis ont été appliquées dans des problèmes industriels avec succès comme la planification de tournées de véhicules avec la prise en compte des contraintes de chargement et de déchargement (Ghariani et Furnon, 2003).

Algorithme 4 Algorithme type colonies de fourmis

 $\text{GenerationInitialeDesSolutions}()$ $\text{InitialisationPheromone}()$ **tantque** (! ConditionArret) **faire** $\text{ConstructionDesSolutions}()$ $\text{MiseAJourPheromone}()$ **fin tantque**Retourner $\text{MeilleureSolution}()$.

Le choix d'une métaheuristique pour un problème donné est difficile et n'obéit à aucune règle formelle (Dréo *et al.*, 2003). Cependant, dans le cas de la géolocalisation d'un itinéraire décrit, qui vise la recherche d'un parcours dans un espace géographique, la méthode par colonies de fourmis semble appropriée pour plusieurs raisons. Premièrement, le problème étudié est un problème de parcours de graphe, ce genre de problème pouvant être résolu par un algorithme de colonies de fourmis comme par exemple le problème du voyageur de commerce (Dorigo et Gambardella, 1997). Deuxièmement, il existe une analogie entre une équipe de recherche coopérant pour retrouver une personne égarée et une colonie de fourmis communiquant par le biais de la phéromone pour trouver le plus court chemin entre deux points.

La principale difficulté de l'utilisation des colonies de fourmis est la modélisation de l'espace du problème de géolocalisation par un graphe. En effet, l'espace des solutions

est un espace géographique continu.

IV.2 Algorithmes de colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis font partie des métaheuristiques de type distribué (cf. figure IV.2). Leur principe repose sur le phénomène d'auto-organisation d'un système par la coopération, directe ou indirecte, des composants élémentaires du système. De ce fait, ils peuvent être considérés comme un système multi-agents à part entière, où chaque fourmi constitue un agent autonome communicant. Ce genre de système est inspiré directement de la nature. La recherche de nourriture par les fourmis, le vol structuré des oiseaux, la formation des bancs de poissons ou encore la construction des ruches par les abeilles sont autant d'exemples de systèmes auto organisés que l'on trouve dans la nature.

Les algorithmes de colonies de fourmis appartiennent à la classe des algorithmes de programmation à mémoire adaptative tout comme les algorithmes génétiques et la méthode Tabou (Taillard *et al.*, 2001). La mémoire du système est contenue dans le patrimoine génétique de la population de solutions pour les méthodes évolutionnaires, dans la liste Tabou pour la recherche Tabou tandis que les algorithmes de colonies de fourmis utilisent les pistes de phéromone. Le terme d'intelligence par essaim peut également être employé pour qualifier les colonies de fourmis dans la littérature sur les métaheuristiques. Ce terme est utilisé pour décrire les algorithmes d'optimisation proches des systèmes multi-agents comme les essaims particuliers (Bonabeau *et al.*, 1999).

IV.2.1 Inspiration du monde des fourmis

Les fourmis vivent ensemble dans des colonies, appelées fourmilières, pouvant regrouper jusqu'à plusieurs millions d'individus. Elles sont organisées en castes et œuvrent pour le bien de la collectivité. Ce type d'organisation, appelée eusocialité, est composé d'un ensemble d'individus possédant des comportements relativement simples, mais qui, ensemble, forment un super organisme. Aucune hiérarchie n'est présente, la reine de la colonie n'a pour rôle que de pondre, c'est une vraie hétérarchie, où les décisions de la colonie sont constituées des actions de toutes les fourmis.

L'histoire des algorithmes de fourmis commence dans les années 1950/1960 avec une étude sur le comportement des termites fait par un entomologiste français, [Grassé \(1959\)](#). Cette étude a permis de mettre en évidence un type de communication indirecte nommé stigmergie. [Deneubourg et al. \(1990\)](#) réalisèrent une expérience avec des fourmis d'Argentine. Elle consiste à proposer aux fourmis deux chemins de longueur identique entre leur nid et une source de nourriture (cf. figure IV.4(a)). Au début de l'expérience les fourmis choisissent de façon égale les deux chemins, mais rapidement la majorité des fourmis de la colonie emprunte le même itinéraire. Cette expérience montre clairement le mécanisme de phéromone qui, déposée sur les chemins, incite les fourmis suivantes à emprunter la même route. Ils répétèrent ce même protocole expérimental un grand nombre de fois et observèrent que les deux chemins étaient utilisés de façon équitable.

L'expérience complémentaire de [Goss et al. \(1989\)](#) donne deux chemins possibles pour la colonie de fourmis, dont un nettement plus court (cf. figure IV.4(b)). Au début de l'expérience les fourmis choisissent de façon égale un des deux chemins. Mais contrairement à l'expérience des ponts de même longueur, les fourmis empruntant le chemin le plus court reviennent plus rapidement au nid. Par conséquent l'itinéraire le plus court est marqué par de la phéromone avant le deuxième chemin, les fourmis vont donc rapidement privilégier ce parcours. La colonie de fourmis arrive donc à trouver le plus court chemin entre leur nid et la source de nourriture. Un modèle fut établi afin de formaliser le comportement observé lors de cette expérience. Il s'agit de définir la probabilité p_1 de choisir le chemin 1 par une fourmi au temps t sachant qu'à ce même temps, m_1 fourmis ont choisi le chemin 1 et m_2 le chemin 2 :

$$p_1 = \frac{(m_1 + k)^h}{(m_1 + k)^h + (m_2 + k)^h} \quad (\text{IV.1})$$

$$p_2 = 1 - p_1$$

Des simulations de Monte Carlo ont donné les valeurs d'ajustement de $k \approx 20$ et de $h \approx 2$ permettant d'être très proches des observations ([Pasteels et al., 1987](#)).

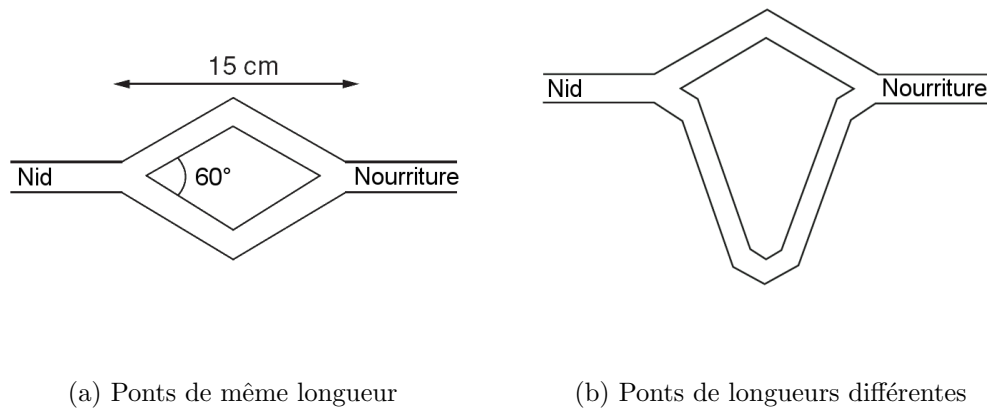


Figure IV.4 — Expériences des doubles ponts

IV.2.2 Métaheuristique pour l'optimisation par colonies de fourmis

Dorigo et ses collègues ont formalisé la métaheuristique des algorithmes de colonies de fourmis (Dorigo et Di Caro, 1999 ; Dorigo *et al.*, 1999). Il s'agit d'un cadre permettant la résolution de différents problèmes d'optimisation en utilisant un algorithme de type colonies de fourmis. Une méthode de type Ant Colony Optimization (ACO) suit l'algorithme 4.

Comme les fourmis réelles, les fourmis artificielles vont être attirées par les pistes de phéromone laissées par les fourmis précédentes. Les dépôts de phéromone étant proportionnels à la satisfaction des contraintes imposées, au fil des itérations les fourmis vont privilégier les bonnes solutions. Ce principe permet la convergence vers des solutions satisfaisantes.

Trois algorithmes principaux ont été développés selon cette métaheuristique. Il s'agit des algorithmes Ant System, Ant Colony System et Max-Min Ant System.

Ant System

Le premier algorithme de type ACO développé est Ant System (AS). La particularité de AS tient dans la méthode de mise à jour des pistes de phéromones qui est

faite par l'ensemble des fourmis (Dorigo *et al.*, 1996). Prenons l'exemple du voyageur de commerce pour illustrer l'algorithme. La quantité de phéromone déposée par m fourmis sur l'arc reliant les deux villes i et j à une itération donnée de l'algorithme est le suivant :

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (\text{IV.2})$$

Le taux d'évaporation ρ permet « d'oublier » des solutions non optimales et ainsi continuer d'explorer de nouvelles solutions. Ce principe d'évaporation provient également de l'observation des insectes sociaux et des fourmis en particulier. Le paramètre $\Delta\tau_{ij}^k$ représente le dépôt de la k^{e} fourmi sur l'arc ij . Ce dépôt est le « score » obtenu par la solution de la k^{e} fourmi :

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/L_k & \text{si l'arc } ij \text{ fait partie du trajet suivi par la fourmi } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

L_k est la longueur du trajet effectué par la k^{e} fourmi et Q est une constante.

La quantité de phéromone sur les arcs est au coeur d'un processus de choix probabiliste. La probabilité que la ville j soit choisie à partir de la ville i est la suivante :

$$\Delta p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_l \tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta} & \text{si la ville } j \text{ n'a pas encore été visitée} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

Seules les villes l n'ayant pas été visitées sont prises en compte. La longueur des arcs pouvant appartenir aux futures solutions est prise en compte par η_{ij}^β défini par :

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (\text{IV.5})$$

où d_{ij} est la distance séparant les villes i et j .

Cette information permet de privilégier les arcs les plus courts puisque le but est de trouver le chemin le plus court passant par toutes les villes. Les coefficients α et

β permettent d'ajuster respectivement le rôle de la phéromone déposée sur l'arc ij et celui de sa longueur d_{ij} .

Ant Colony System

Une amélioration de AS, nommée Ant Colony System (ACS), a été proposée par [Dorigo et Gambardella \(1997\)](#). Trois mécanismes supplémentaires viennent renforcer l'algorithme.

Premièrement, une mise à jour locale de la phéromone est effectuée. Cette mise à jour concerne uniquement le dernier arc traversé par une fourmi et ceci à chaque pas de construction des solutions. Deuxièmement, la mise à jour globale, effectuée par l'ensemble des fourmis à la fin de chaque itération complète, diffère en deux points. Cette mise à jour n'est faite que par une et une seule fourmi. La fourmi effectuant cette mise à jour est soit celle qui a construit la meilleure solution pour l'itération courante ou bien la fourmi qui a trouvé la meilleure solution depuis le début. La formule de mise à jour est également différente :

$$\tau_{ij} \leftarrow \begin{cases} (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij} & \text{si } (ij) \text{ appartient à la meilleure solution} \\ \tau_{ij} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

La dernière particularité de ACS tient dans la règle de décision utilisée par les fourmis dans le processus de construction des solutions. Dans l'algorithme AS, la probabilité qu'une fourmi choisisse le nœud j à partir du nœud i est proportionnelle à la quantité de phéromone déposée sur l'arc ij (cf. equation (IV.4)). ACS introduit une nouvelle règle de décision utilisant une variable aléatoire q uniformément distribuée sur $[0, 1]$ et un paramètre de réglage q_0 . À chaque pas de construction (choix de la prochaine ville dans le cas du problème du voyageur de commerce) si $q < q_0$ alors la fourmi choisit le nœud j tel que l'arc ij possède la quantité la plus grande de phéromone parmi tous les arcs possibles. Dans les autres cas, la règle définie dans AS par l'équation IV.4 est appliquée.

Max-Min Ant System

Max-Min Ant System (MMAS) (Stützle et Hoos, 2000) améliore également l'algorithme original AS. Toutefois, les différences sont moins importantes que pour ACS. Tout comme ce dernier, une seule fourmi met à jour la phéromone déposée sur les arcs à la fin de chaque itération. Contrairement à ACS, il n'y a pas de mise à jour locale mais la quantité de phéromone contenue sur un arc est limitée par une borne minimum (τ_{\min}) et une borne maximum (τ_{\max}) :

$$\tau_{ij} \leftarrow \left[(1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^{\text{best}} \right]_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \quad (\text{IV.7})$$

L'opérateur $[x]_b^a$ est défini par :

$$[x]_b^a = \begin{cases} a & \text{si } x > a \\ b & \text{si } x < b \\ x & \text{autrement} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

Ces bornes, déterminées par l'expérience et devant être réglées en fonction du problème traité, permettent de garantir une exploration suffisante.

Discussion

Ces trois algorithmes de colonies de fourmis sont très proches les uns des autres. La différence entre ces méthodes réside dans le principe de mise à jour de la phéromone. Trois critères régissent cette mise à jour :

- à quel moment la mise à jour est-elle effectuée ?
 1. à chaque itération, fourmi après fourmi (ACS),
 2. à chaque itération principale, c'est-à-dire, après le passage de l'ensemble des fourmis de la colonie (AS, MMAS).
- qui met à jour la phéromone ?
 1. la fourmi qui a obtenu la meilleure solution de l'itération principale courante, ou de l'ensemble des itérations principales (ACS, MMAS),
 2. l'ensemble des fourmis (AS).

– la quantité de phéromone est-elle bornée ?

1. non (AS, ACS),
2. oui (MMAS).

Cet ensemble de paramètres ne peut être décidé en analysant le problème à traiter mais en effectuant différents tests permettant de créer une variante adaptée. Cependant, ces algorithmes ont tous en commun le fait qu'ils conviennent à la résolution des problèmes modélisés par un graphe, tel que le voyageur de commerce. Le problème de géolocalisation d'itinéraire auquel nous nous intéressons n'est pas sous la forme d'un graphe. Un nouveau type d'algorithme de colonies de fourmis doit donc être développé pour surmonter cette difficulté.

IV.3 Principes de l'algorithme développé

L'algorithme développé est du type colonies de fourmis (Brosset *et al.*, 2008a). Il est composé de deux phases : l'initialisation et l'exécution. La première étape va fortement conditionner le comportement et surtout les performances de la méthode car elle définit l'espace de recherche des solutions. En effet, contrairement aux algorithmes par colonies de fourmis classiques, le problème n'est pas modélisé de façon structurée comme par exemple un graphe pour le problème du voyageur de commerce. La phase d'initialisation va définir l'espace des solutions en fonction de l'environnement mais également de la description d'itinéraire devant être localisé.

IV.3.1 Initialisation

Deux étapes sont nécessaires pour définir l'espace du problème. Lors de la première étape, un nombre important de fourmis partent du point de départ et tracent autant d'itinéraires. Les itinéraires produits sont conformes à la description d'itinéraire en entrée dans le sens où ils respectent les caractéristiques physiques de l'itinéraire : l'intervalle de longueur de l'itinéraire, son nombre d'étapes, sa boîte englobante et sa linéarité. L'ensemble des points constituant les itinéraires générés définit l'espace des solutions du problème. Deuxièmement, cet espace va être filtré pour, d'une part diminuer le nombre de points, et ainsi le nombre de solutions possibles, et d'autre part, pour obtenir un ensemble d'itinéraires potentiellement corrects par rapport à la sémantique

de la description étudiée. Pour cela, les points vont subir un processus de sélection qui détermine s'ils feront partie du sous-ensemble de points dans lequel la recherche va s'effectuer. Ces points sont nommés « nœuds potentiels » dans la mesure où ils constituent potentiellement les points de l'espace de recherche pour l'identification des nœuds formels décrits dans le graphe de description d'itinéraire. La figure IV.5 illustre le processus de sélection des nœuds potentiels. Le principe de la sélection repose sur l'analyse du voisinage (disque de rayon α) du nœud potentiel, et sur la présence de repères décrits dans la modélisation. Un nœud potentiel près d'un repère du même type que celui décrit va être déplacé vers le centre du repère.

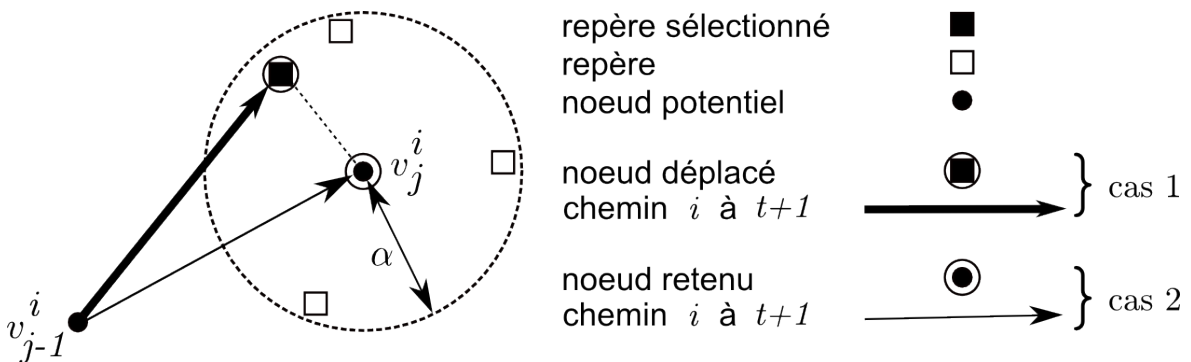


Figure IV.5 — Processus de sélection des nœuds

Cas 1 : le nœud formel n_j est un repère donné explicitement par la description (e.g., « aller jusqu'à la balise Rouge »). Le nœud potentiel v_j^i est déplacé à la position du repère et sélectionné.

Cas 2 : le nœud formel n_j se trouve dans le voisinage du repère identifié dans la description d'itinéraire (e.g., « arriver près de la balise Verte »). Le nœud v_j^i est retenu.

L'algorithme est initialisé par une génération aléatoire de M chemins de longueur l , où $l + 1$ représente le nombre de nœuds de la description d'itinéraire formelle. Le nombre M est paramétré au niveau de l'interface et doit être choisi assez grand. Nous supposons que la description est sémantiquement riche, c'est-à-dire, que la plupart des nœuds formels sont qualifiés par des repères. Les repères sont ceux identifiés par la légende de la course d'orientation.

Pour chaque chemin pt_i ($i \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq M$), un processus d'évaluation est appliqué à chaque nœud potentiel v_j^i ($j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq l + 1$) comme ci-dessous :

- pour un nœud potentiel donné v_j^i d'un chemin et quand le j^{ieme} nœud formel de la description d'itinéraire donnée est étiqueté par un repère, l'algorithme recherche des repères similaires dans un voisinage circulaire de rayon α autour du nœud potentiel v_j^i . La distance α est paramétrée au niveau de l'interface du prototype, et est dépendante de la topographie et de la nature de l'environnement. Quand aucun repère ne qualifie le nœud de la description, le nœud potentiel v_j^i est ajouté à l'ensemble des nœuds N_j .
- quand plusieurs repères sont trouvés à proximité, un de ceux-ci est sélectionné aléatoirement. Si un seul repère est trouvé il est automatiquement sélectionné. Deux cas possibles sont considérés (cf. figure IV.5)
- Le nœud potentiel retenu par l'algorithme dans le cas 1 ou dans le cas 2, est ajouté à l'ensemble des nœuds N_j ,
- si aucun repère n'est trouvé pour ce nœud potentiel, l'algorithme passe au nœud potentiel v_j^i suivant s'il y en d'autres, sinon il passe au chemin suivant s'il existe, sinon il termine.

L'algorithme génère implicitement un nombre de $(l+1)$ couches où chaque couche L_j ($j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq l+1$) est associée à un ensemble N_j de K_j nœuds qui représentent les solutions possibles pour le j^e nœud formel de la description d'itinéraire.

Un ensemble de nœuds potentiels est obtenu, correspondant aux nœuds formels décrits dans la modélisation de la description. Cet ensemble est organisé en couches comme illustré dans la Figure IV.6.

IV.3.2 Exécution

Un processus d'optimisation par colonies de fourmis est exécuté pour résoudre le problème de recherche d'itinéraire. Les principales caractéristiques de l'exécution de l'algorithme sont les suivantes :

1. à chaque itération t de l'algorithme, chaque fourmi de la population de la colonie génère un chemin parmi l'ensemble des nœuds,
2. ces chemins sont construits en utilisant un processus probabiliste qui maintient une balance entre exploration de nouvelles solutions et confirmation des bonnes solutions, et utilisant les nœuds sélectionnés par l'initialisation de l'algorithme,
3. à chaque itération de l'algorithme, des traces de phéromones sont déposées sur les

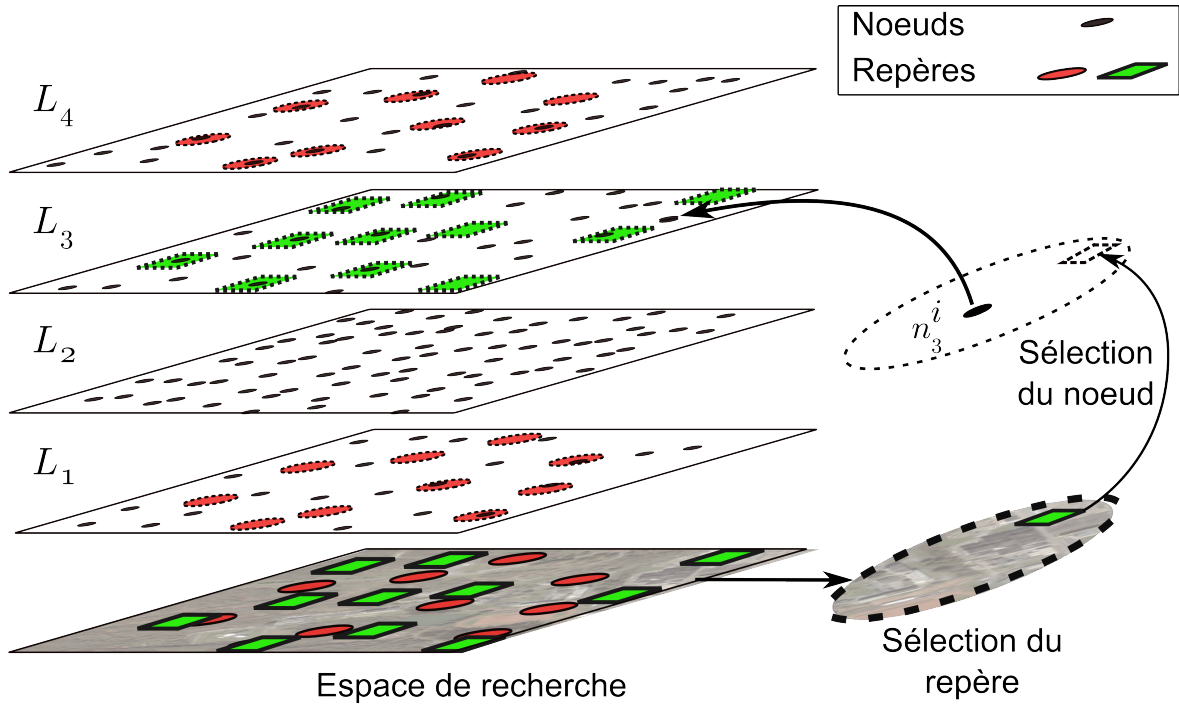


Figure IV.6 — Ensemble des nœuds candidats organisé en couches

arcs candidats en fonction de l'évaluation des itinéraires suivis par les fourmis.

À la première itération de l'algorithme, les arcs candidats de chaque couche L_j sont initialisés avec une valeur de phéromone $\tau_{initial}$. Chaque fourmi construit un chemin r de longueur l . À chaque point de décision, *i.e.*, chaque nœud n_j ($j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq l+1$), chaque fourmi sélectionne aléatoirement le nœud suivant parmi l'ensemble N_{j+1} . la probabilité $Prob_{n_j, n_{j+1}}(t)$ de choisir le nœud n_{j+1} parmi l'ensemble N_{j+1} à partir du nœud n_j au moment t est donnée par :

$$Prob_{n_a^{(j)}, n_b^{(j+1)}}(t) = \frac{\tau_{n_a^{(j)}, n_b^{(j+1)}}(t)}{\sum_{k=1}^{K_{j+1}} \tau_{n_a^{(j)}, n_k^{(j+1)}}(t)} \quad (\text{IV.9})$$

où $\tau_{n_j, n_{j+1}}(t)$ donne la valeur de la phéromone de l'arc (n_j, n_{j+1}) à t .

Cette approche maintient une balance entre la nécessité de favoriser de bonnes solutions tout en permettant l'exploration de nouveaux chemins. À chaque itération de l'algorithme, deux mises à jour successives sont réalisées. Premièrement, l'évaporation

de la phéromone assure que les chemins qui ne sont plus suivis par les fourmis sont progressivement oubliés. Deuxièmement, la valeur de phéromone déposée sur chaque arc (n_j, n_{j+1}) est calculée. Cette valeur est la somme de la phéromone déposée précédemment jusqu'au temps t , moins l'évaporation, plus la phéromone déposée à l'instant $t + 1$ par l'ensemble des fourmis :

$$\tau_{n_j, n_{j+1}}(t + 1) = \tau_{n_j, n_{j+1}}(t)(1 - \rho) + \delta_{n_j, n_{j+1}}(t + 1) \quad (\text{IV.10})$$

avec le taux d'évaporation ρ compris dans l'intervalle unitaire $[0, 1]$.

La valeur donnée à ρ contrôle la balance entre la nécessité d'explorer de nouvelles solutions (*i.e.*, avec une valeur d'évaporation proche de 1), et le renforcement des bonnes solutions déjà trouvées (*i.e.*, avec une valeur d'évaporation proche de 0). L'évaluation de chaque arc (n_j, n_{j+1}) est donnée par la quantité de phéromone $\delta_{n_j, n_{j+1}}$ déposée à chaque cycle de l'algorithme. La quantité de phéromone $\delta_{n_j, n_{j+1}}$ laissée sur l'arc (n_j, n_{j+1}) à l'instant $t + 1$ est donnée par :

$$\delta_{n_j, n_{j+1}}(t + 1) = \sum_{q=1}^Q \delta_{n_j, n_{j+1}}^q(t + 1) \quad (\text{IV.11})$$

où Q est le nombre de fourmis, et $\delta_{n_j, n_{j+1}}^q$ la quantité de phéromone déposée sur l'arc (n_j, n_{j+1}) à l'instant $t + 1$ par la fourmi q .

Le dépôt de phéromone est local à chaque arc mais reflète l'évaluation globale de la solution proposée. Pour chaque arc (n_u, n_{u+1}) d'un chemin $r_q(t + 1)$ suivi par une fourmi q , nous faisons la différence entre trois cas, du meilleur au moins bon :

Cas A : le nœud de départ n_u et le nœud d'arrivée n_{u+1} correspondent à la sémantique de la description d'itinéraire, *i.e.*, les nœuds sont associés à des repères de classe similaire à ceux décrits,

Cas B : un seul des deux nœuds n_u et n_{u+1} correspond à la sémantique de la description d'itinéraire, *i.e.*, un nœud seulement est associé à un repère similaire à celui de la description,

Cas C : aucun des deux nœuds n_u et n_{u+1} ne correspond à la sémantique de la description d'itinéraire.

Afin de donner une valeur représentative aux trois différents cas décrits ci-dessus, en fonction des deux nœuds composant le segment d'itinéraire, la fonction $\beta_{n_u, n_{u+1}}$, définie sur l'intervalle $[0, 1]$, tend vers 1 pour le cas A, vers 0.5 pour le cas B, et vers 0 pour le cas C.

Les critères d'orientation ainsi que de distance rentrent également en compte lorsqu'ils sont présents dans la description d'itinéraire. L'orientation et la longueur d'un arc (n_u, n_{u+1}) sont évaluées respectivement par les fonctions $\mu_{n_u, n_{u+1}}$ et $\lambda_{n_u, n_{u+1}}$. Le résultat de ces deux fonctions reflète le degré de similarité avec les informations de la description d'itinéraire donnée en entrée, selon une loi gaussienne. Ceci permet de ne pas éliminer de solutions assez proches des orientations et des distances données. L'évaluation de l'orientation d'un arc par la fonction $\mu_{n_u, n_{u+1}}$ donne un score allant de 0 (l'arc ne correspond pas à l'orientation donnée) à 1 (l'arc correspond parfaitement à l'orientation donnée ou bien aucune information d'orientation n'est fournie par la description d'itinéraire). L'interprétation choisie des orientations relatives et cardinales repose sur une représentation symétrique des directions (cf. figures I.11(a), I.10(a)).

De façon similaire, la longueur d'un arc, évaluée par la fonction $\lambda_{n_u, n_{u+1}} \in [0, 1]$ est notée de 0, la longueur de l'arc ne correspond pas du tout, à 1 quand la longueur de l'arc est égale à la longueur donnée avec une tolérance paramétrée ou bien lorsqu'aucune longueur n'est précisée dans la description. La figure IV.7 illustre le principe d'évaluation de l'orientation et de la longueur d'un arc sur l'exemple « Aller à l'ouest pendant cinq cents mètres ».

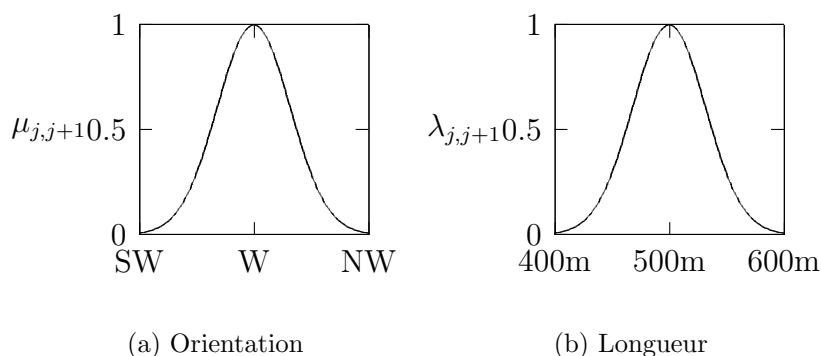


Figure IV.7 — Évaluation de la correspondance d'un arc avec la description

Au total, la quantité de phéromone $\delta_{n_u, n_{u+1}}^q$ déposée par une fourmi q sur l'arc (n_u, n_{u+1}) à l'instant $t + 1$ est :

$$\delta_{n_u, n_{u+1}}^q(t + 1) = \begin{cases} \sum_{u=1}^n \left(\frac{\beta_{n_u, n_{u+1}}}{l} * \mu_{n_u, n_{u+1}} * \lambda_{n_u, n_{u+1}} \right) \\ \quad \setminus (n_u, n_{u+1}) \in r_q(t + 1) \forall u = 1, \dots, l \\ 0 \quad \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

En fait, des valeurs positives de phéromone sont déposées par une fourmi sur les arcs appartenant à l'itinéraire qu'elle a suivi tandis qu'elle ne met aucune phéromone sur les autres arcs. L'algorithme est terminé lorsque les meilleures solutions ne changent plus, ou bien lorsque le nombre d'itérations donné comme limite est atteint.

IV.3.3 Implémentation

L'algorithme de géolocalisation d'itinéraire a été implémenté et validé par un prototype développé en Java (voir Annexe D.2). La librairie GeoTools a été utilisée pour la manipulation de données géographiques. Cette librairie regroupe un ensemble de structures et de méthodes permettant d'utiliser les principaux formats de fichiers contenant des informations géographiques. Cette librairie, libre d'utilisation, est liée à la librairie Java Topology Suite (JTS) qui est composée de nombreuses fonctions de calcul géométrique (distance euclidienne, calcul du centroïde de formes complexes, ...). Cet ensemble d'outils nous permet d'utiliser des données géographiques standards pour constituer l'espace de recherche représentant l'environnement géographique.

Cet espace de recherche est modélisé par un ensemble de couches géographiques vectorielles au format *ShapeFile* créé par la société ESRI[™], concepteur de systèmes d'information géographique. Ce format de fichier est employé par de nombreux logiciels et constitue un bon candidat pour la modélisation d'information géographique sans contraindre l'utilisateur à un logiciel spécifique. Pour le développement de la solution logicielle, nous privilégions une solution libre et gratuite afin de fournir un ensemble complet allant de la modélisation de l'espace de recherche à la géolocalisation en passant par la modélisation de descriptions verbales d'itinéraire. Parmi les logiciels libres, trois candidats ont été identifiés : JUMP, GvSIG et Quantum GIS. Après plusieurs essais,

le logiciel Quantum GIS (QGIS) s'est imposé par sa simplicité mais surtout par sa fiabilité.

Le principe du prototype, décrit dans la figure IV.8, est le suivant : un ensemble de couches géographiques est créé en utilisant le logiciel QGIS, ces couches sont lues et manipulées par le prototype avec les outils fournis par Geotools, un algorithme de type colonies de fourmis est appliqué sur une description d'itinéraire modélisée, le résultat est affiché avec les données géographiques de l'environnement.

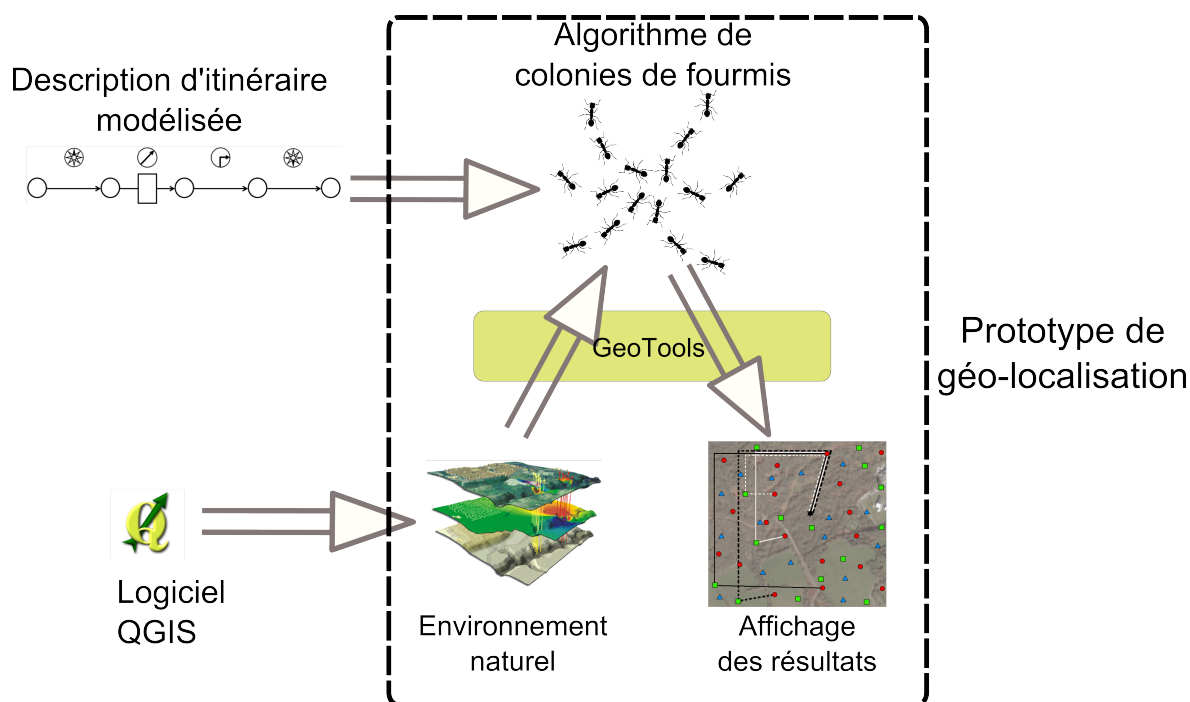


Figure IV.8 — Solution logicielle

La description d'itinéraire suivante a été utilisée pour illustrer l'algorithme :

« Aller au Nord jusqu'au drapeau rouge. Se diriger vers l'Ouest pendant 500 mètres, puis au Sud pour arriver près du drapeau vert. Finalement, partir à l'Est pour arriver au drapeau rouge. »

L'environnement considéré est de grande taille, environ soixante kilomètres carrés, très boisé avec divers obstacles (talus, fossé, etc.) et une grande diversité de repères (arbre isolé, monticule, rochers, étang, ...). La figure IV.9 montre une photo satellite de l'environnement ainsi qu'une photo donnant un aperçu d'un point de vue au sol.

Le terrain est initialisé avec une vingtaine de repères artificiels (drapeaux de couleur) pour les trois classes prises en compte.



Figure IV.9 — Environnement modélisé par le prototype

La figure IV.10 montre l'interface du prototype. La description d'itinéraire choisie, qui est dans le format défini dans le chapitre précédent, est affichée dans la partie supérieure droite. Les paramètres de contrôle du prototype sont placés dans plusieurs onglets en dessous de la description. Le premier onglet regroupe les paramètres spécifiques aux algorithmes de colonies de fourmis (nombre de fourmis, distance de visibilité, taux d'évaporation de la phéromone, nombre d'itérations maximum). L'affichage de l'espace recherche est paramétré dans le deuxième onglet. Les différentes couches géographiques (végétation, rochers, drapeaux, ...) peuvent être affichées ou masquées. Le dernier onglet permet de fixer les paramètres de la recherche tels que le point de départ de l'itinéraire recherché ou bien de délimiter la zone de recherche. L'environnement géographique, constituant l'espace de recherche de solutions, occupe la plus grande partie de l'interface à droite. Les fonctions de zoom et de navigation à l'aide de la souris permettent le déplacement dans l'espace de recherche. Les repères identifiés sur l'environnement sont ceux des trois classes considérées.

L'algorithme est d'abord initialisé. La figure IV.10 montre le résultat du processus d'initialisation, après la génération aléatoire d'un grand nombre de chemins (pour plus de lisibilité seulement quelques chemins générés sont affichés). La génération de cet ensemble de chemins entraîne la création de $l + 1$ couches. Chaque couche L_j contient N_j nœuds candidats pour le j^{ieme} nœud de la description formelle de longueur l . L'algorithme est alors prêt à exécuter le processus d'optimisation par colonies de

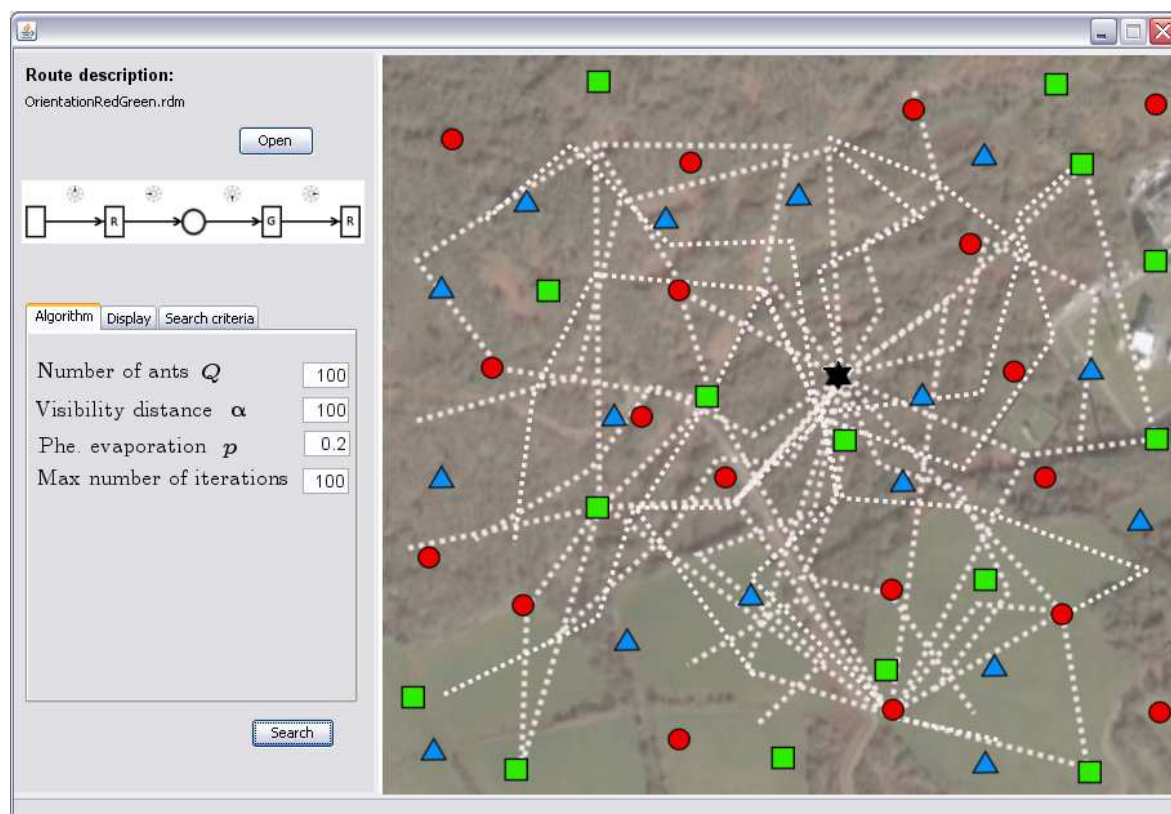


Figure IV.10 — Interface du prototype : phase d'initialisation

fourmis en utilisant les paramètres choisis par l'utilisateur au niveau de l'interface. Le réglage de ces paramètres doit être le meilleur compromis entre la nécessité d'assurer la convergence vers des solutions acceptables, et le besoin de travailler sur un espace suffisamment étendu pour éviter le plus possible des solutions locales. Les valeurs de ces paramètres sont choisies empiriquement. Ces paramètres sont les suivants :

- la distance de visibilité α qui est utilisée pour la définition du voisinage dans le processus de sélection des vertex. Ce paramètre est directement lié à la nature de l'environnement,
- le taux d'évaporation ρ ,
- le nombre de fourmis Q ,
- le nombre maximal d'itérations que l'algorithme doit exécuter avant de s'arrêter.

IV.3.4 Analyse des résultats

Une série d'expériences a été menée afin d'évaluer le degré de complexité de l'algorithme ainsi que le rôle joué par les différents paramètres. L'algorithme, appliqué à l'exemple de description d'itinéraire précédemment introduit, a donné les résultats suivants. La figure IV.10 montre qu'un nombre important de chemins est généré à l'étape d'initialisation. Lors de cette étape d'initialisation un millier de fourmis ont créé l couches de nœuds potentiels. Les expériences ont été réalisées avec une distance de visibilité $\alpha = 100$ mètres ce qui correspond à la visibilité moyenne étant donné la topographie du terrain. Chaque couche contient entre deux et trois cents nœuds. Un taux d'évaporation de phéromone $\rho = 0.2$ a été utilisé pour ces essais.

Les expériences menées ont révélé que l'algorithme converge rapidement après seulement quelques itérations. Ce comportement montre clairement que, bien qu'il soit basé sur des connaissances minimales et un comportement local, l'algorithme par colonies de fourmis trouve rapidement des solutions satisfaisant la description d'itinéraire en entrée. Quatre solutions ont été identifiées par rapport à la sémantique de la description d'itinéraire (cf. figure IV.11). Il est important de noter que même si ces solutions répondent toutes aux critères donnés par la description d'itinéraire, elles sont relativement différentes mais elles correspondent toutes à des alternatives plausibles. La principale différence est la longueur des chemins générés qui peut, si elle est précisée dans la description, aider à différencier et à classer ces solutions.

IV.4 Évaluation des paramètres de l'algorithme

L'algorithme développé étant une métaheuristique, il est dépendant de plusieurs paramètres qui sont la plupart du temps réglés empiriquement. De fait, les valeurs choisies pour ces paramètres peuvent modifier de façon significative le comportement de l'algorithme. Néanmoins, de faibles variations ($\pm 10\%$) modifient peu les résultats de l'algorithme. Afin d'étudier l'influence des différents paramètres et ainsi connaître les réglages optimaux, plusieurs expériences ont été réalisées. Les valeurs utilisées pour l'ensemble des tests, hormis le paramètre sujet du test, sont les suivantes :

- une distance de visibilité $\alpha = 100$ mètres, ce qui correspond à la visibilité moyenne en prenant en compte la topographie du terrain étudié,

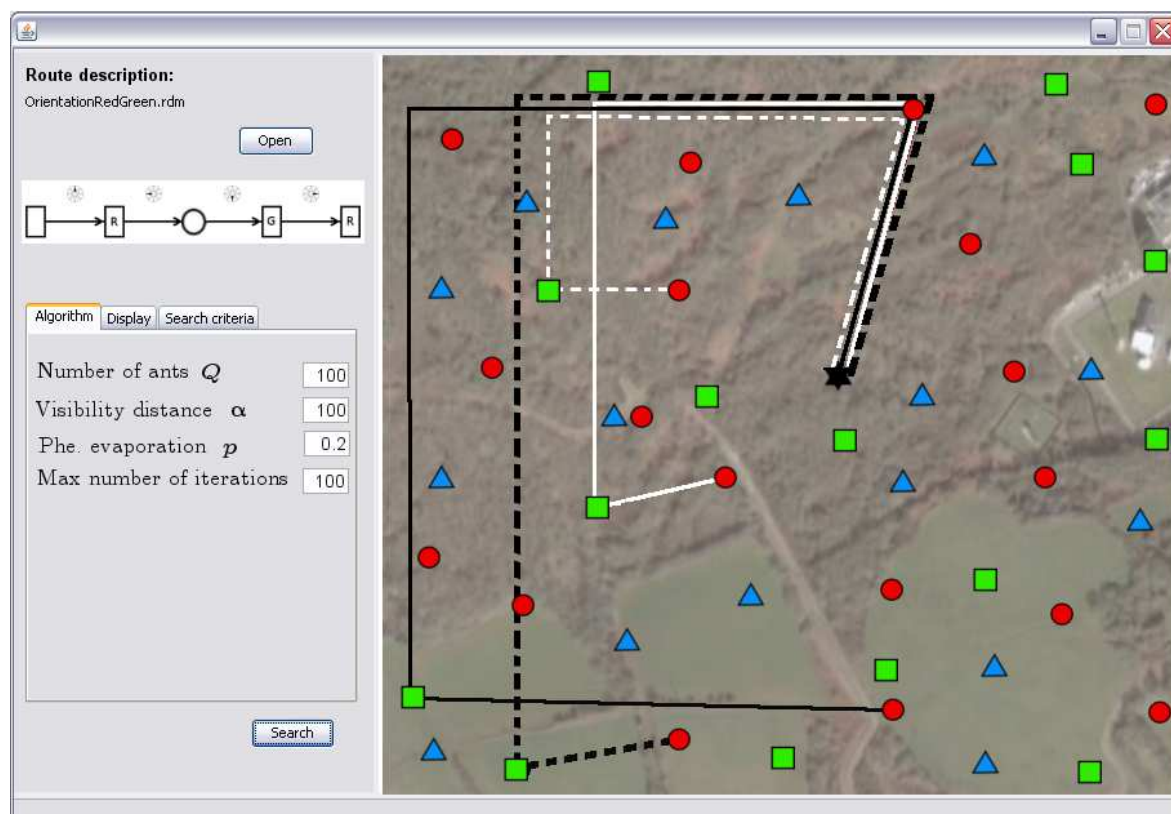


Figure IV.11 — Exemple de solutions données par l'algorithme

- un taux d'évaporation $\rho = 0.2$,
- un nombre de fourmis $Q = 100$,
- un nombre de chemins $M = 1000$ pour la phase d'initialisation, ce qui génère des couches de deux à trois cents nœuds.
- la description d'itinéraire suivante :
« Aller au Nord jusqu'au drapeau rouge. Se diriger vers l'Ouest pendant 500 mètres, puis au Sud pour arriver près du drapeau vert. Finalement, partir à l'Est pour arriver au drapeau rouge. »

IV.4.1 Performance globale

Les propriétés étudiées concernent la convergence du maximum de phéromone déposé par itération. Cette valeur est donnée par la quantité de phéromone $\delta_{j,j+1}(t)$ déposée sur un arc $(j, j + 1)$ à chaque itération t de l'algorithme selon l'équation (cf. equation (IV.11)). La phéromone déposée sur un arc donné augmente avec le

nombre de fourmis utilisant celui-ci pour la construction de leur chemin solution (cf. equation (IV.12)). Les valeurs de phéromone déposées sur les arcs d'un parcours augmentent quand la sémantique du parcours suivi par une fourmi est proche de celle exprimée dans la description verbale. Les bonnes solutions sont révélées par les arcs ayant le maximum de phéromone. Cette méthode permet d'évaluer le taux de convergence en fonction de l'ensemble des critères restreignant la recherche. En moyenne, les expériences mettent en évidence la convergence de l'algorithme après seulement une dizaine d'itérations grâce à la coopération indirecte entre fourmis (cf. figure IV.12). Cela montre que, même si le comportement des fourmis est basé sur une connaissance locale de l'environnement, l'algorithme par colonies de fourmis évolue rapidement vers des solutions satisfaisant la description verbale donnée en entrée. La valeur moyenne de la phéromone déposée sur les arcs augmente également au fil des itérations ce qui prouve que l'ensemble des fourmis améliore les chemins produits au cours du temps.

IV.4.2 Influence du nombre de fourmis

Les tests réalisés montrent que l'augmentation du nombre des fourmis accélère la convergence de l'algorithme, mais une limite asymptotique survient avec un nombre de fourmis relativement grand (≥ 80). En analysant ces résultats et en considérant le fait qu'augmenter le nombre de fourmis augmente également nettement le temps de calcul, une valeur optimale (≈ 100) pour le nombre de fourmis semble émerger (cf. figure IV.12). Le nombre de fourmis peut donc être réduit pendant la phase d'exécution ce qui confirme les tests effectués sur l'algorithme ACO par [Dorigo *et al.* \(1991\)](#). Néanmoins, il doit rester élevé pendant la phase de construction du réseau afin qu'un nombre conséquent de solutions satisfaisant les critères de la description soit généré.

IV.4.3 Influence du taux d'évaporation

Le taux d'évaporation de la phéromone est un paramètre important de l'algorithme de colonies de fourmis car il est le garant d'une exploration suffisante de l'environnement de recherche. En effet, le principe d'évaporation permet de ne pas renforcer continuellement les mêmes chemins et, par conséquent, d'éviter le plus possible les extrema locaux. Ce paramètre ρ influence donc de manière significative le comportement de l'algorithme (cf. figure IV.13). Néanmoins, il apparaît que la taille du réseau créé

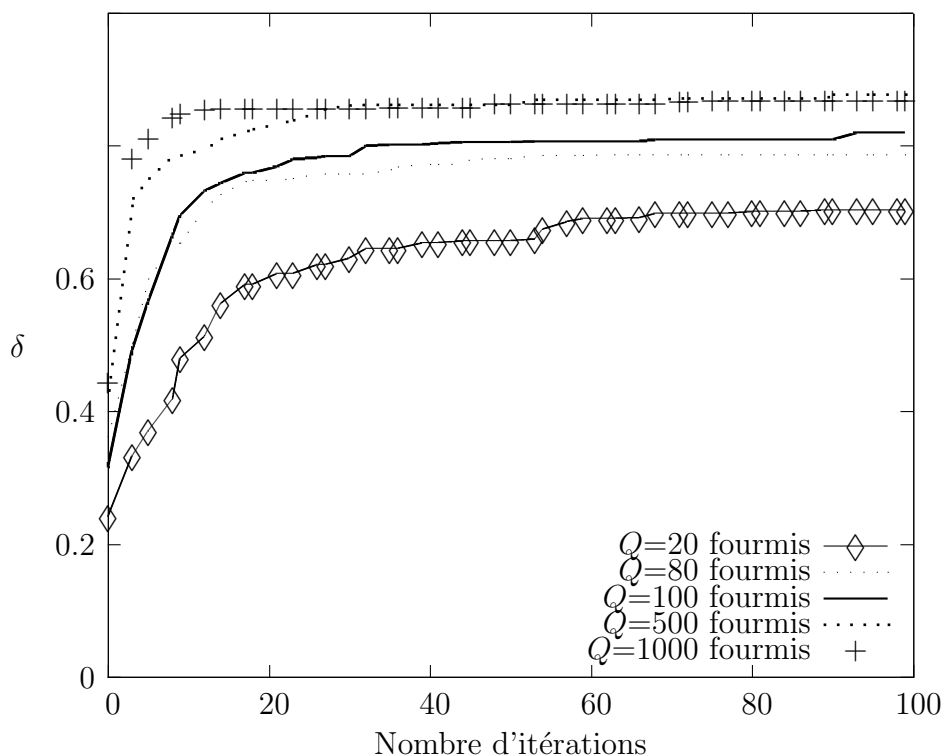


Figure IV.12 — Valeurs maximales de phéromone δ en fonction du nombre de fourmis Q

pour notre cas d'étude est si grande, qu'une faible valeur d'évaporation convient pour faire émerger rapidement des solutions satisfaisantes. En effet, le nombre d'arcs étant très important, l'algorithme garde des qualités exploratoires suffisantes même avec un taux d'évaporation faible.

À contrario, il est bien visible qu'un taux d'évaporation très élevé, voire maximum, ne permet pas une convergence correcte. Avec un taux $\rho = 1$, la valeur maximale de phéromone déposée augmente tout de même, mais bien plus lentement et de manière saccadée. Ceci vient du fait qu'il n'y a plus aucun processus de renforcement ni aucune coopération, et donc de meilleures solutions sont trouvées de façon totalement aléatoire. La figure IV.14 illustre bien qu'il n'y a pas d'amélioration des solutions en moyenne au cours des itérations.

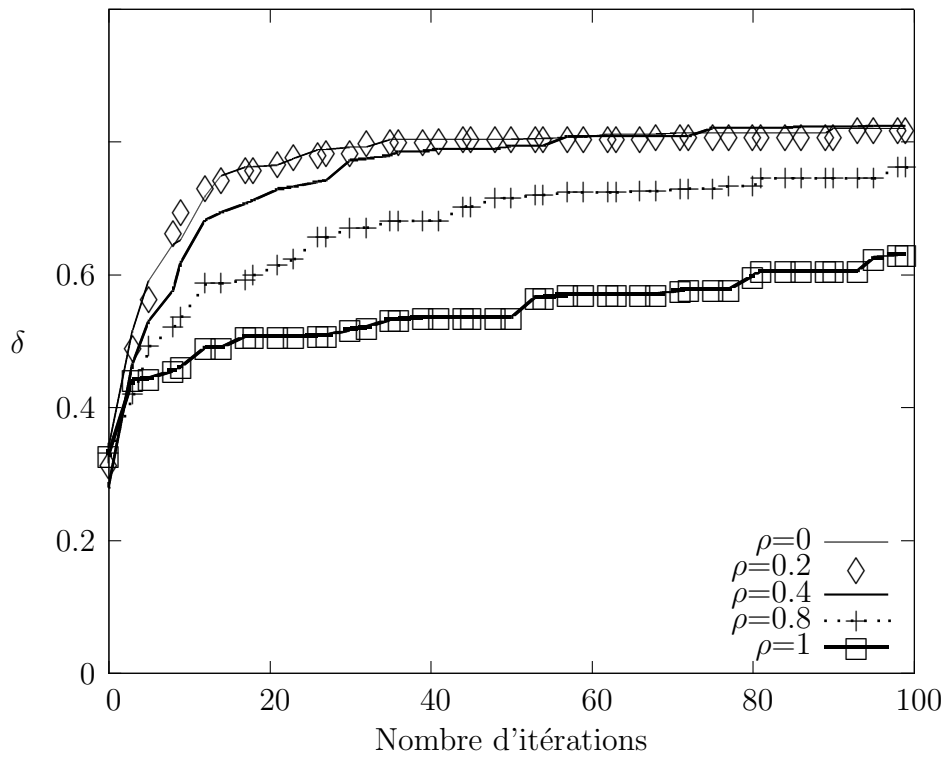


Figure IV.13 — Valeurs maximales de phéromone δ en fonction du taux d'évaporation ρ

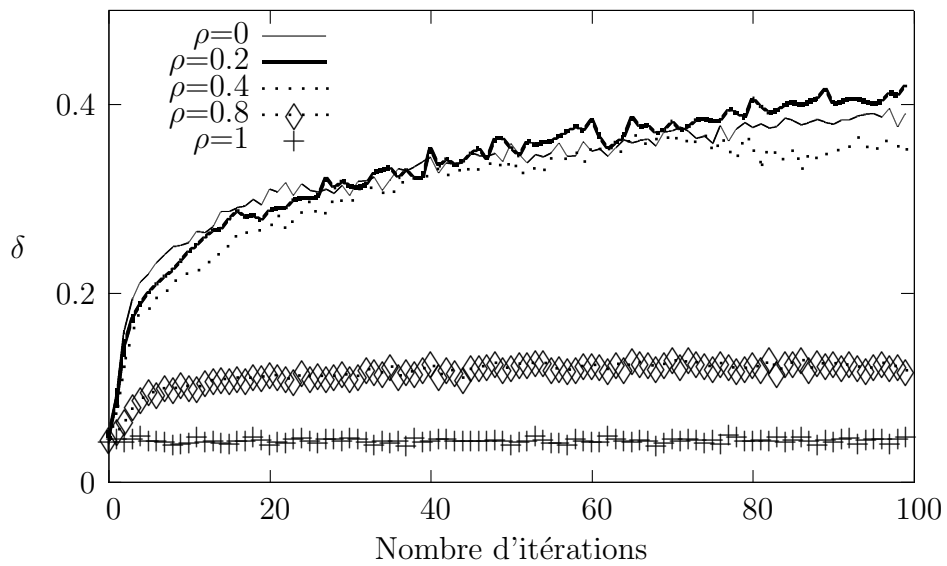


Figure IV.14 — Valeurs moyennes de phéromone δ en fonction du taux d'évaporation ρ

IV.4.4 Influence de la distance de visibilité

La distance de visibilité (α) règle la taille du voisinage utilisé pendant le processus de sélection des nœuds par la phase d'initialisation de l'algorithme. Ce paramètre influence le nombre de nœuds contenus dans chaque couche. Plus la distance est grande, plus le nombre de nœuds diminue car plus il y a de chance qu'un repère soit trouvé dans le voisinage et donc que le vertex soit déplacé vers celui-ci. Le nombre de nœuds définissant la taille de l'espace de recherche, celui-ci joue un rôle majeur sur la convergence de l'algorithme. La distance de visibilité influe donc grandement sur la convergence de l'algorithme. Une distance de visibilité trop petite rend l'espace de recherche trop grand et donc le nombre de solutions possibles inexorablement en un temps satisfaisant. Les résultats montrent clairement que la distance de visibilité optimale est de l'ordre de 100 mètres (cf. figure IV.15). Bien évidemment, cette valeur est dépendante de l'environnement pris en compte. La distance de visibilité comme son nom l'indique est relié à la visibilité sur le terrain et donc la topographie a une influence certaine. Des tests supplémentaires sur des environnements variés permettront de mieux comprendre la relation entre la topographie de l'espace étudié et la distance de visibilité.

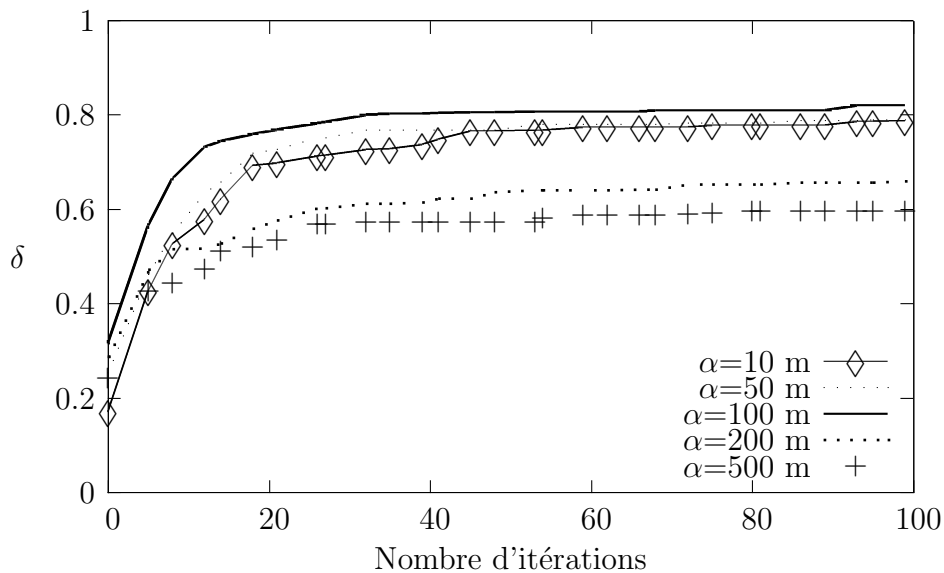


Figure IV.15 — Valeurs maximales de phéromone δ en fonction de la distance de visibilité α

IV.4.5 Influence de la longueur de la description

Ce test permet l'évaluation de la complexité de l'algorithme quand la complexité du problème augmente. La figure IV.16 montre que le temps de calcul augmente de façon linéaire avec l'augmentation de la longueur de la description d'itinéraire à traiter. Les résultats montrent que lorsque la longueur de la description augmente, le nombre de solutions satisfaisantes augmente rapidement mais le nombre de solutions répondant à tous les critères diminue.

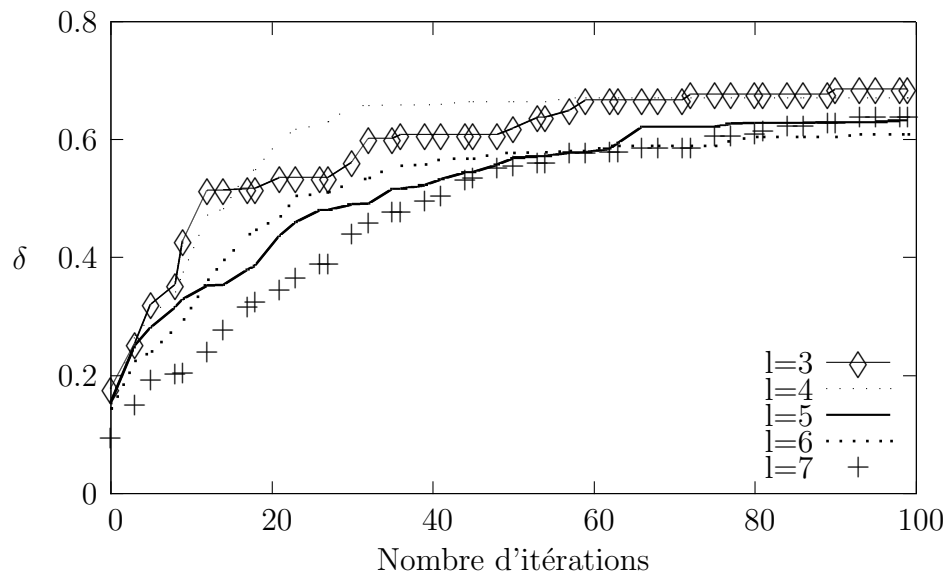


Figure IV.16 — Valeurs maximales de phéromone δ en fonction de la longueur l de la description

IV.4.6 Evaluation du temps de calcul

La dernière expérience présentée compare l'influence respective du nombre de fourmis et de la longueur de la description formelle sur le temps de calcul. Étant donné que l'algorithme repose sur un processus de sélection stochastique, chaque test a été réalisé une centaine de fois afin de présenter la moyenne de ces essais pour en faire ressortir une tendance générale. Les résultats de la figure IV.17 soulignent le fait que le temps d'exécution ne subit pas d'influence importante quand la longueur de la description augmente avec un nombre de fourmis constant ($Q = 500$). Il apparaît en fait, que l'augmentation de la longueur de la description n'augmente pas la complexité

de l'algorithme. Des descriptions plus longues et donc plus riches peuvent donc être traitées par notre algorithme sans que les performances soient détériorées.

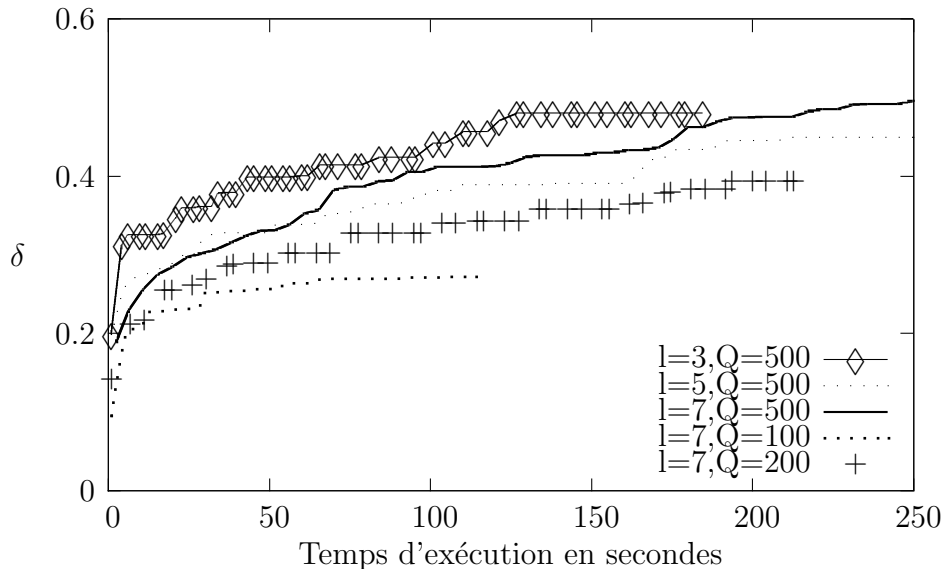


Figure IV.17 — Valeurs maximales de phéromone δ en fonction de la longueur de la description l et du nombre de fourmis Q

IV.5 Discussion

Le problème de géolocalisation d'un itinéraire à partir d'une description verbale est un problème complexe qui ne possède pas actuellement à notre connaissance de méthode de résolution efficace. Il peut être formalisé comme étant un problème d'optimisation combinatoire dont le but est d'identifier une séquence de points, répondant à la description verbale d'un itinéraire, dans un espace géographique.

Plusieurs méthodes de résolution de problèmes combinatoires difficiles existent. Parmi ces méthodes de résolution, les métaheuristiques permettent de s'adapter à une large gamme de problèmes d'optimisation ne possédant pas de méthodes exactes de résolution, ni de méthodes approchées connues. Notre problème ne possède ni méthode exacte, ni méthode approchée permettant sa résolution, il constitue donc un bon candidat à une résolution par métaheuristique. Quatre grandes familles de métaheuristiques ont été étudiées afin d'identifier la plus adaptée au problème de géolocalisation d'itinéraire. Il s'agit de la méthode Tabou, du recuit simulé, des al-

algorithmes génétiques et des algorithmes de colonies de fourmis. Finalement, les algorithmes de colonies de fourmis apparaissent comme une méthode de résolution adaptée au problème de géolocalisation.

Un algorithme spécifique a été développé pour résoudre le problème en s'appuyant sur le principe des algorithmes de colonies de fourmis. Afin d'adapter une méthode de résolution par colonies de fourmis, nous avons défini une approche permettant de modéliser l'espace de recherche géographique sous la forme d'un graphe généré dynamiquement et en fonction de la description verbale d'itinéraire considérée comme point d'entrée. Une fonction évaluant l'adéquation entre description formelle d'itinéraire et itinéraire géolocalisé a été définie. Cette fonction prend en compte les repères, les orientations et les distances présentes dans une description d'itinéraire (cf. equation (IV.12)). Plusieurs paramètres ont été ajoutés aux algorithmes de colonies de fourmis afin de résoudre le problème de géolocalisation d'itinéraire. Certains paramètres sont qualitatifs, comme l'orientation, tandis que d'autres sont quantitatifs, comme la distance de visibilité.

Un prototype a été implémenté afin de valider l'algorithme. Les résultats obtenus sur plusieurs descriptions d'itinéraires montrent que l'algorithme trouve des solutions acceptables au problème de géolocalisation d'itinéraire. Ces solutions sont autant d'itinéraires plausibles répondant à la description verbale considérée. Un ensemble de tests a été réalisé pour calibrer les différents paramètres de réglage de l'algorithme et pour évaluer ses performances. Les différents tests réalisés ont montré que l'algorithme converge rapidement vers des solutions satisfaisantes et qu'il est stable dans le sens où les résultats obtenus sont constants. Sa complexité est linéaire en fonction de la longueur de la description d'itinéraire en entrée ce qui permet d'envisager le traitement de descriptions et d'environnement complexes.

Conclusion

Contexte

La prise de conscience actuelle par la société de l'importance d'une gestion adaptée et durable de notre environnement renforce les intérêts et la nécessité de mieux le comprendre. Les recherches en théories de l'information spatiale s'attachent depuis une quarantaine d'années à l'étude de processus de navigation et à leur modélisation au sein de systèmes spatialisés. Modéliser, analyser, et simuler des comportements humains sont en effet des fonctions essentielles pour une meilleure compréhension de notre environnement et de nos interactions avec celui-ci. Les descriptions d'itinéraires constituent des données essentielles pour l'étude de processus de navigation dans de nombreux domaines comme ceux des sciences cognitives, de la linguistique, et de l'informatique. Ces descriptions d'itinéraires se présentent sous plusieurs formes : verbales (écrites ou orales), graphiques, et mixtes. Chacune de ces formes présente des particularités et des pouvoirs d'expression qui lui sont propres. Nous avons abordé dans cette thèse la problématique de la modélisation et de la géolocalisation d'un itinéraire en milieu naturel à partir d'une description verbale.

Contribution

Si peu d'études ont été menées, à notre connaissance, dans le domaine de la navigation en milieu naturel, de nombreux travaux concernent la navigation en milieu urbain. Ce constat nous a amené à comparer ces études aux navigations réalisées en environnement naturel. Afin d'effectuer cette comparaison et d'en dresser un cadre méthodologique pour aborder notre contexte d'étude, une expérimentation a

été conduite et appliquée aux courses d'orientation. Les résultats de cette étude nous permettent de caractériser la navigation en milieu naturel et d'en faire ressortir ses particularités.

À partir de cette analyse, une approche de modélisation a été élaborée. Celle-ci s'appuie sur le formalisme des graphes et place les repères et l'interaction repères-actions au centre du modèle. Les repères sont qualifiés à partir d'une classification issue de la légende de la course d'orientation. Un langage graphique apporte une composante visuelle et symbolique à une description verbale d'itinéraire, et en permet une meilleure manipulation à partir d'une construction logique et structurelle, manuelle et plus intuitive. L'utilisation d'un formalisme issu de la théorie des graphes nous a permis de définir une structure logique de représentation et de proposer plusieurs fonctions qui caractérisent une description d'itinéraire : l'entropie structurelle et la richesse de description. Un prototype de modélisation de descriptions d'itinéraires valide le modèle et présente quelques résultats expérimentaux préliminaires.

La modélisation d'une description d'itinéraire permet d'une part de caractériser l'itinéraire et son environnement, et également de manipuler plus intuitivement les informations de l'itinéraire décrit. Cette construction logique nous permet d'aborder la problématique de la géolocalisation d'un itinéraire décrit, un problème complexe qui ne possède pas à notre connaissance de méthodes efficaces de résolution. En effet, ce problème peut avoir plusieurs solutions, ou ne pas avoir de solution satisfaisant entièrement une description d'itinéraire. Cette caractéristique nous a amené à envisager l'utilisation d'une métaheuristique. Parmi les différentes métaheuristicques envisagées telles que la recherche Tabou, le recuit simulé, ou les algorithmes génétiques, les algorithmes par colonies de fourmis se sont révélés particulièrement adaptés. Les algorithmes de colonies de fourmis sont conçus pour résoudre des problèmes dont l'espace de solutions est modélisé sous une forme de réseau. L'algorithme développé contient une phase d'initialisation où l'espace de recherche des solutions est créé sous une forme de réseau à partir de l'environnement géographique considéré et de la description d'itinéraire en entrée. Cette étape originale adapte les algorithmes de colonies de fourmis au problème de géolocalisation. Des paramètres qualitatifs et spatiaux sont introduits au sein de l'algorithme afin de résoudre le problème de géolocalisation. Des tests ont montré les différentes influences des paramètres de réglage en utilisant le prototype implémenté. Le nombre de fourmis doit être suffisamment grand, mais l'augmenter au delà d'une certaine valeur relativement grande n'améliore pas les performances

de l'algorithme du point de vue de la convergence et de la qualité des solutions. Le taux d'évaporation doit être assez faible pour garder un processus de renforcement des solutions qui soit correct. La distance de visibilité utilisée pour le processus d'initialisation doit être adaptée au type d'environnement étudié. Les tests expérimentaux développés montrent que l'algorithme donne plusieurs solutions adaptées aux descriptions d'itinéraires fournies en entrée. Nous pouvons ainsi qualifier l'algorithme comme satisfaisant, et performant dans la mesure où les tests réalisés montrent que sa complexité est linéaire en fonction de la longueur de la description d'itinéraire considérée. L'algorithme est en partie stochastique (génération de l'espace de recherche) et probabiliste (choix des étapes par les fourmis en fonction du taux de phéromone) mais il est stable dans le sens où il donne les mêmes résultats pour un problème particulier à chaque essai. Notre recherche et le modèle identifié sont validés par une plateforme logicielle qui offre une approche expérimentale de modélisation, d'analyse et de géolocalisation d'itinéraires à partir de descriptions verbales.

Extensions possibles

Les extensions possibles de cette approche consistent à intégrer de nouveaux critères qualitatifs dans la modélisation. Le modèle actuel ne prend pas en compte les observations de la forme « Au nord de la colline, il y a une forêt ». L'approche se fonde en effet sur la modélisation d'une navigation, et non de son environnement au sens large. Dans cet exemple, l'existence de la colline ou de la forêt ne sera prise en considération que dans le cas de figure où elle localise le déplacement. L'absence de telles observations dans notre corpus issu de l'expérimentation justifie ce choix. Cependant, dans le cadre d'un dialogue entre deux personnes, les observations sur le positionnement de repères les uns par rapport aux autres doivent être prises en compte. Une telle interaction permettrait en effet d'améliorer la qualité des informations transmises par un dialogue de nature à enrichir la perception par l'auditeur de l'itinéraire décrit.

La sémantique des mesures de richesse et d'entropie structurelle doit encore être étudiée. Afin d'en évaluer la portée, de nouvelles mesures peuvent aussi être définies comme par exemple l'extension de la mesure d'entropie en augmentant la taille de l'alphabet pris en compte. Des expériences sur différentes personnes et différents environnements permettront d'évaluer de quelle façon ces mesures qualifient la particularité

du raisonnement de l'acteur de la navigation, la richesse et les propriétés de l'environnement décrit.

L'étude des mesures de richesse et d'entropie ouvre plusieurs perspectives pour les comparaisons de descriptions d'itinéraires. Le développement d'un outil de comparaison de descriptions d'itinéraires semble être un sujet de recherche à explorer. À partir de ce comparateur, une mesure de similarité entre deux descriptions d'itinéraires pourrait être formalisée. Cette mesure de similarité sera utilisée pour la relaxation de contraintes sur les descriptions d'itinéraires pour améliorer les performances de la géolocalisation dans certains cas où la description d'itinéraire en entrée est ambiguë ou insuffisamment riche.

Le temps d'exécution de l'algorithme de géolocalisation peut être amélioré en parallélisant le code. Deux méthodes différentes sont envisagées :

- diviser le nombre de fourmis (Q) par le nombre de processeurs (P) et attribuer Q/P fourmis à chaque processeur,
- placer une colonie de fourmis par processeur comme proposé par [Stützle \(1998\)](#).

L'algorithme proposé pourra également être enrichi afin de mieux prendre en compte le niveau d'accessibilité des zones de l'espace géographique considéré ainsi que la proximité sémantique des repères décrits par rapport à la classification utilisée. L'ajout d'une recherche locale à l'algorithme de géolocalisation peut engendrer une plus grande précision dans la géolocalisation. Deux possibilités existent pour créer une recherche locale, la première étant de réaliser fréquemment une recherche locale peu coûteuse mais n'améliorant que peu les solutions, la deuxième de faire une recherche locale plus coûteuse mais plus performante avec une fréquence faible. Le principe d'une recherche locale pour la géolocalisation d'un itinéraire décrit consisterait à faire, pour chaque parcours, une recherche d'une meilleure étape dans le voisinage de celle trouvée. Seule la meilleure des deux solutions, entre l'initiale et celle issue de la recherche locale, est conservée. Cette recherche locale pourra suivre de préférence les repères linéaires qui sont importants dans la représentation mentale d'une navigation. L'ajout d'une méthode de recherche locale constitue un changement important pour l'algorithme. En effet, les paramètres de réglages (notamment le taux d'évaporation et le nombre de fourmis) seraient à calibrer de nouveau afin d'obtenir de meilleures performances. L'algorithme de géolocalisation devra être testé par rapport à d'autres métaheuristiques. Ces quelques pistes d'adaptation de notre algorithme ne sont pas restrictives mais

constituent une base de réflexion qui doit être poursuivie pour l'enrichissement de notre approche.

Perspectives d'application

























Plusieurs applications peuvent être envisagées à partir de notre modèle. Le premier cadre applicatif, qui relève du contexte de notre recherche, est celui de la caractérisation de descriptions verbales d'itinéraire et de la géolocalisation de personnes à partir de descriptions verbales. Il apparaît également que la qualité des descriptions verbales d'itinéraires de randonnée pourrait être quantifiée, d'une part par les mesures d'entropie et de richesse, et d'autre part par les résultats obtenus par l'algorithme de géolocalisation. Retracer l'itinéraire d'une personne à partir d'une description verbale de son itinéraire pourrait également permettre de retrouver des randonneurs perdus ou en danger quand certains sont parvenus à rejoindre un poste de secours. L'algorithme de géolocalisation constitue également un outil pour des équipes de secours afin de mieux cibler une zone de recherche. Les Centres Régionaux d'Opérations de Sauvetage et de Secours (CROSS) reçoivent de multiples appels téléphoniques de personnes à terre signalant des navires en difficulté. Dans la mesure où ces personnes sont des randonneurs ne connaissant pas très bien la région, un opérateur du CROSS doit essayer de localiser la personne en lui demandant d'expliquer son itinéraire afin de connaître la position du bateau à identifier. L'algorithme de géolocalisation pourrait participer à la résolution de ce problème en proposant des itinéraires géo-référencés satisfaisant une description verbale de cet itinéraire.

Nous envisageons d'intégrer les différentes composantes de notre approche (modélisation, géolocalisation, comparaison) au sein d'une plate-forme logicielle développée sur la base de notre prototype expérimental et dédiée à l'analyse et à l'interprétation de descriptions verbales d'itinéraire. Cette plate-forme pourra être utilisée pour conduire de nouvelles expérimentations. Nous proposons d'étudier les différences de descriptions entre personnes familières et non familières d'un environnement de navigation ou d'analyser les mécanismes et les comportements de personnes à mobilité réduite ou ayant des difficultés de perception. Les résultats obtenus seront confrontés à des expériences comparables réalisées en milieu urbain. Tester différents types de milieux naturels (tels que des milieux boisés ou côtiers) nous permettra également de mieux évaluer l'influence de l'environnement sur les processus de navigation.

Annexes

A

Symboles de la course d'orientation

106	Abrupt de terre	
107	Levée de terre	
108	Petite levée de terre	
109	Ravin	
110	Petit ravin	
111	Colline	
112	Butte	
113	Butte allongée	
114	Dépression	
115	Petite dépression	
116	Trou	
117	Terrain accidenté	
118	Détail particulier du relief	
201	Falaise infranchissable	
202	Colonne rocheuse et falaise	
203	Falaise franchissable	
204	Trou rocheux	
205	Caverne ou grotte	
206	Bloc rocheux	
207	Grand bloc rocheux	
208	Zone rocheuse	
209	Groupe de rochers	
210	Terrain rocailleux	
211	Terrain sablonneux découvert	

212	Affleurement rocheux	
301	Lac	
302	Mare	
303	Trou d'eau	
304	Rivière infranchissable	
305	Cours d'eau franchissable	
306	Petit cours d'eau franchissable	
307	Cours d'eau secondaire	
308	Marais étroit	
309	Marais infranchissable	
310	Marais	
311	Marais peu visible	
312	Puits	
313	Source	
314	Élément d'eau particulier	
401	Terrain découvert	
402	Terrain découvert avec arbres dispersés	
403	Terrain découvert accidenté	
404	Terrain découvert accidenté avec arbres dispersés	
405	Forêt : course facile	
406	Forêt : course ralentie	
407	Sous-bois : course ralentie	
408	Forêt : course difficile	
409	Sous-bois : course difficile	
410	Végétation : course très difficile, impénétrable	
411	Forêt courable dans une direction	
412	Verger	
413	Vignoble	
414	Limite de culture nette	
415	Terrain cultivé	
416	Limite de végétation distincte	
417	Limite de végétation peu distincte	
418, 419, 420	Éléments particuliers de végétation	
501	Autoroute	
502	Route principale	
























503	Route secondaire	
504	Route	
505	Chemin carrossable	
506	Chemin	
507	Sentier	
508	Sentier peu visible	
509	Layon étroit	
510	Jonction visible de chemins	
511	Jonction peu visible	
512	Pont piéton	
513	Passage avec un pont	
514	Passage à gué	
515	Chemin de fer	
516	Ligne électrique	
517	Ligne à haute tension	
518	Tunnel	
519	Mur de pierre	
520	Mur en ruine	
521	Haut mur en pierre	
522	Clôture	
523	Clôture en ruine	
524	Haute clôture	
525	Point de passage	

Tableau A.1: Classification des symboles par l'IOF

B**Descriptions verbales
d'itinéraire recueillies
lors de
l'expérimentation****Description verbale (a)**

De la balise 7 on monte vers le nord pour rejoindre une ligne haute tension. Ensuite on suit cette ligne haute tension jusqu'à arriver au chemin piétonnier qui descend de l'aubette à la base, enfin à l'infirmerie. A l'endroit de la jonction entre la ligne de haute tension et le chemin, quelques mètres sur la droite, il y a une roche où se trouve la balise 8.

Description verbale (b)

De la balise 7 il faut monter la pente, sur la gauche, qui monte. Enjamber un fossé, et déboucher sur une allée dégagée sous une ligne haute tension. Après il faut suivre la ligne haute tension toujours en montant, une fois qu'on arrive en haut de la pente sur la ligne haute tension, on redescend en suivant des lampadaires. Et après avoir dépassé et avant d'arriver au chemin goudronné qui redescend il y a une petite zone de clair complètement couverte de fougère marron et, sous un arbuste, là vous trouvez la balise n°8.

Description verbale (c)

T'arrives à la 7, donc juste au dessus. La 7 est en bas d'un espèce de talus, tu sautes le talus, juste à ta gauche il va y avoir une grosse dépression qui est hyper caractéristique. Tu la contournes, après il y a un petit moment de plat relativement montant avec des herbes assez hautes qui te ramène jusqu'à une ligne électrique. La ligne électrique, elle

est dégagée jusqu'à une espèce de prairie, une ligne comme ça, tu prends vers la droite. ça monte assez fort sur la distance entre deux poteaux, après ça fait une espèce de col où ça monte plus trop jusqu'à la route et l'espèce de petit transformateur qu'il y a là haut. Ensuite tu enroules sur la droite, derrière le transformateur, c'est une espèce de prairie ça descend doucement, après un peu plus fort, sur la droite il y a une végétation un peu plus dense, la limite est super nette. Au bout de trente mètres, il y a un chemin qui part sur la droite, qui descend droit dans la pente, assez dégagé. Quinze mètres après, Il y en a un autre, beaucoup plus faible, qu'on voit à peine dans les herbes hautes. Il suffit de prendre ce chemin et la 8 est deux mètres à gauche, derrière le premier buisson.

Description verbale (d)

Pour aller de la sept à la huit d'après moi, on remonte jusqu'à récupérer les fils électriques, on longe les fils électriques, jusqu'à la station transformateur, après donc on continue direction la route qui redescend en contrebas pour redescendre à l'école navale, en comptant les lampadaires, 1,2,3,4,5 à l'aplomb du 4ème ou 5ème lampadaire on oblique sur la droite sur une végétation moindre, de telle sorte d'arriver dans un espace où, normalement, la balise est là dans les dix mètres aux alentours.

Description verbale (e)

J'ai trouvé la balise 7, je suis passé vers le nord dans un chemin sous les fils électriques, et j'ai monté la montagne jusqu'au bout. J'ai vu quasiment que le chemin et je vois à droite de grandes herbes et la rue qui passe par la BAN et je me rappelle, il y a un chemin qui prend la droite des herbes où je suis maintenant, en haut de la montagne, et je continue jusqu'au début de ce chemin à droite et je descends le chemin jusque quand j'ai vu un bâtiment et je sais que c'est un peu plus loin que le bâtiment et voilà j'ai trouvé la 8.

Description verbale (f)

Je suis partie de la balise n°5 située au bord d'un sentier. De là j'ai poursuivi sur le sentier, j'ai rattrapé une petite route. J'ai traversé une clôture par une porte grillagée. J'ai traversé une prairie jusqu'à arriver à un site dégagé au bord duquel je devais trouver une petite ruine située dans un bosquet que je n'ai pas su trouver.

Description verbale (g)

Quand tu es sur le site de l'Ecole Navale Lanvéoc Poulmic, tout en haut tu as une cabane à côté de la piste hélico, une petite cabane avec un radar dessus. Tu prends le petit chemin en goudron, parsemé de lampadaires qui sont sur la droite. Tu descends,

tu as quelques marches, et lorsque tu descends les marches, tu as un morceau de bois remarquable posé au sol sur la droite, tu passes ce morceau de bois et tu rencontreras un talus, la balise est au nord du talus.

Description verbale (h)

On suit d'abord la ligne à haute tension jusqu'au poste électrique où se rejoignent deux lignes électriques. Ensuite il y a un chemin à parcourir juste au dessus du bâtiment, en béton d'ailleurs, qui longe après la route et qui va descendre. Donc on continue et, au moment où il y a un gros tournant, on quitte le chemin sur la gauche, on arrive sur un espèce de talus. Il y a un bâtiment carré, c'est légèrement vers le haut.

Description verbale (i)

T'es à la 8, à l'extrémité du talus, il y a un petit chemin qu'on suit et on arrive à l'intersection avec une grosse route, où tu prends sur la gauche. Tu continues la route jusqu'à ce qu'elle tourne, et là, la balise 9 elle est sur la ruine.

Description verbale (j)

En fait tu remontes tout jusqu'à ce que tu arrives au niveau du centre équestre, où il y a les barrières, tu passes l'espèce de grosse maison du centre équestre et tu tournes à droite. Là il y a la ruine, c'est au nord de la ruine, dans un petit talus vers le fond.

Description verbale (k)

Pour aller à la 12, tu suis la ligne haute tension jusqu'au niveau du transformateur, après on va à droite, on voit un chemin. On suit ce chemin, on descend au niveau des escaliers. Sur la gauche, il y a une rangée de trois arbres et deux arbres. On passe entre ces deux rangées et on arrive au niveau de la petite dépression, où il y aura la balise 12.

Description verbale (l)

Je suis parti de la 7 direction le parking au sud, après le chemin à l'ouest, ensuite j'ai suivi les deux grillages et je suis tombé sur la huit, au croisement d'un grillage et d'une ligne électrique.

Description verbale (m)

On voit une ligne électrique au-dessus de nous, vers le nord on voit l'hélicoptère de l'entrée à l'aubette. On remonte vers cet hélicoptère pour retomber sur un chemin, juste avant un chemin en escaliers, qui descend jusqu'au carré officiers. On prend ce chemin-là et on tourne légèrement au-dessus du parking à gauche et on la trouve à 20m.

Description verbale (n)

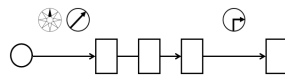
Tu es perdu dans un petit champ avec beaucoup de ronces et d'épines, là t'es à la 11, il suffit de remonter la pente du terrain. Tu vas voir un transformateur un petit peu plus haut, blanc, tu suis la ligne électrique en remontant le long de celle-ci. Tu arrives à une route bitumée que tu redescends en direction de la pente, sur la droite. Au loin tu vois un hélicoptère, tu vois une entrée, tu suis cette route, tu vas faire un grand lacet d'environ 500M, tu le contournes, tu prends le virage et 100m après ce lacet, tu auras un petit chemin en terre qui va remonter un espèce de petit talus. Tu arriveras derrière un espèce de mur en pierre en forme de U inversé. Dans ce mur, dans un petit trou, tu auras la balise 12.

ANNEXE

C

Descriptions formelles d'itinéraire recueillies lors de l'expérimentation

Description formelle (a)

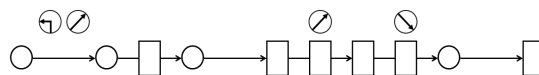


Séquence $\alpha_1 \alpha_7 \alpha_5$

Richesse 0.583

Entropie 1.584

Description formelle (b)

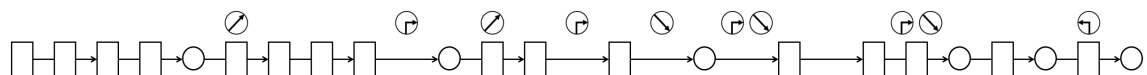


Séquence $\alpha_0 \alpha_2 \alpha_1 \alpha_7 \alpha_6 \alpha_1$

Richesse 0.388

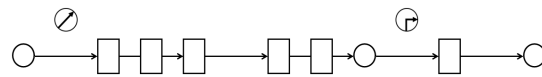
Entropie 2.251

Description formelle (c)



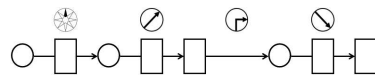
Séquence $\alpha_7 \alpha_6 \alpha_3 \alpha_7 \alpha_4 \alpha_3 \alpha_5 \alpha_4 \alpha_1 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_2 \alpha_2$
Richesse 0.487
Entropie 2.777

Description formelle (d)



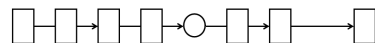
Séquence $\alpha_1 \alpha_7 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_1 \alpha_4$
Richesse 0.361
Entropie 2.251

Description formelle (e)



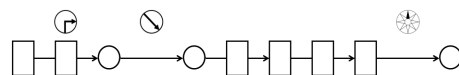
Séquence $\alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_3$
Richesse 0.5
Entropie 1.5

Description formelle (f)

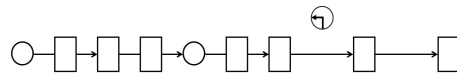


Séquence $\alpha_7 \alpha_6 \alpha_3 \alpha_5$
Richesse 0.375
Entropie 2.0

Description formelle (g)



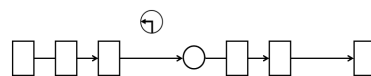
Séquence $\alpha_6 \alpha_0 \alpha_3 \alpha_7 \alpha_4$
Richesse 0.416
Entropie 2.321

Description formelle (h)

Séquence $\alpha_3 \alpha_6 \alpha_3 \alpha_5 \alpha_5$

Richesse 0.383

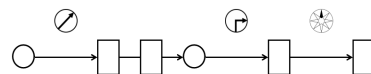
Entropie 1.521

Description formelle (i)

Séquence $\alpha_7 \alpha_4 \alpha_3 \alpha_5$

Richesse 0.395

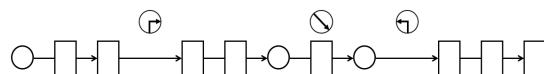
Entropie 2.0

Description formelle (j)

Séquence $\alpha_1 \alpha_6 \alpha_1 \alpha_5$

Richesse 0.437

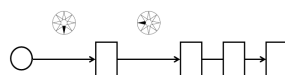
Entropie 1.5

Description formelle (k)

Séquence $\alpha_3 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_2 \alpha_1 \alpha_7$

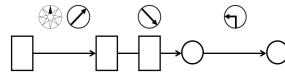
Richesse 0.430

Entropie 2.584

Description formelle (l)

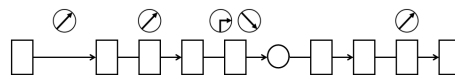
Séquence $\alpha_1 \alpha_5 \alpha_7$
 Richesse 0.5
 Entropie 1.584

Description formelle (m)



Séquence $\alpha_5 \alpha_6 \alpha_0$
 Richesse 0.555
 Entropie 1.584

Description formelle (n)

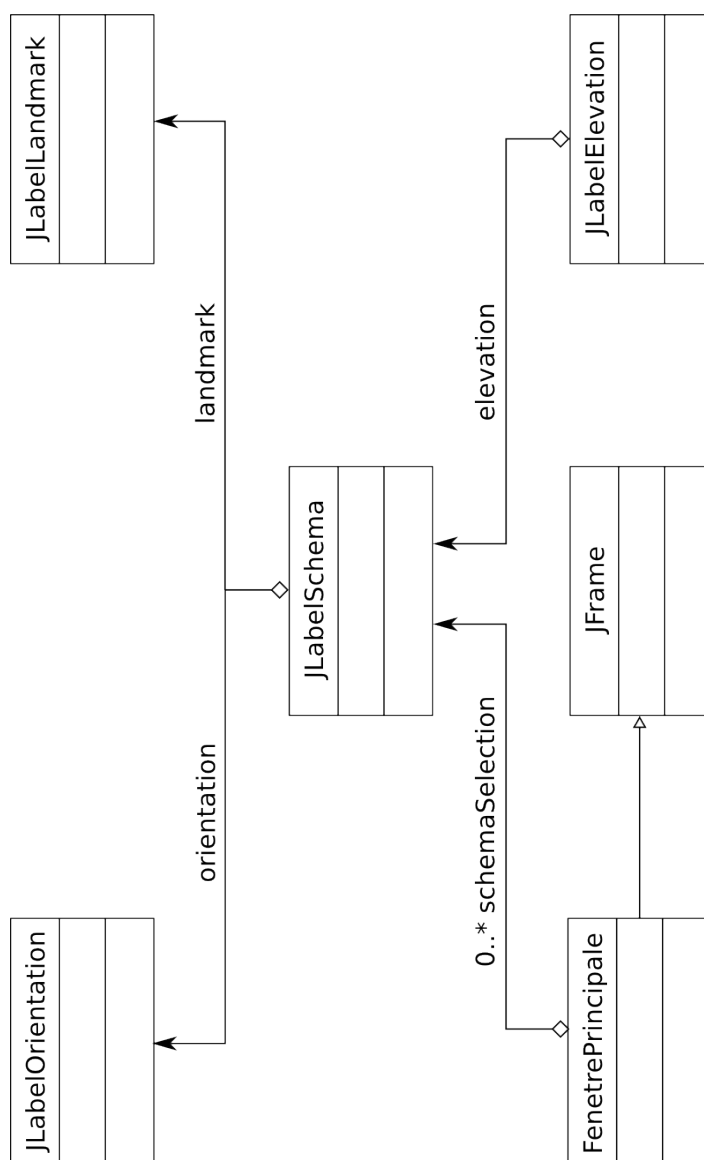


Séquence $\alpha_5 \alpha_7 \alpha_6 \alpha_3 \alpha_7$
 Richesse 0.65
 Entropie 1.921

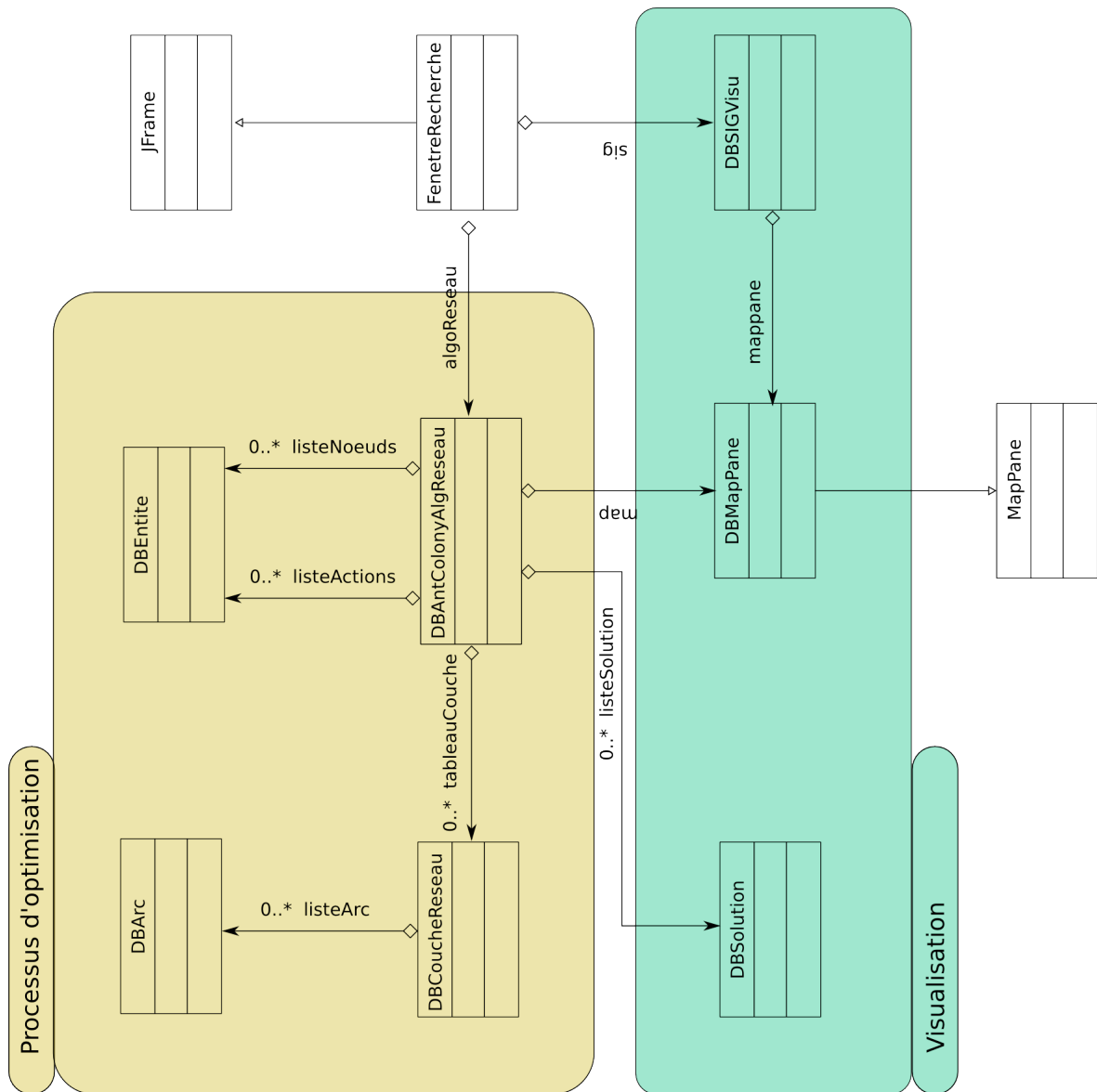
ANNEXE D

Diagrammes UML

D.1 Prototype de modélisation de descriptions d'itinéraires



D.2 Prototype de géolocalisation de descriptions d'itinéraires



Bibliographie

- G. L. Allen. Principles and practices for communicating route knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 14 :333–359, 2000. [I.4.2](#), [III.1.3](#)
- G. L. Allen. From knowledge to words to wayfinding : Issues in the production and comprehension of route directions. In [Hirtle et Frank \(1997\)](#), pages 363–372. ISBN 3-540-63623-4. [I.4.1](#), [II.3.2](#), [II.4](#)
- H. P. Bahrick. The cognitive map of a city : Fifty years of learning and memory. In G. H. Brower, editeur, *The Psychology of Learning and Motivation*. Academic Press, New York, 1983. [I.4.2](#)
- C. Berge. *Théorie des graphes et ses applications*. Dunod, 1958. [III.2.1](#)
- G. Bieger et M. Glock. Comprehending Spatial and Contextual Information in Picture-Text Instructions. *Journal of Experimental Education*, 54(4) :181–188, 1986. [I.3](#)
- E. Bonabeau, M. Dorigo, et G. Theraulaz. *Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, USA, 1999. [IV.2](#)
- D. Brosset et T. Devogele. Algorithmes génétiques et généralisation de MNT marins. In M. Alpes, editeur, *Actes des 7ièmes journées Cassini, Grenoble*, 2004. [IV.1.2](#)
- D. Brosset, C. Claramunt, et E. Saux. A location and action-based model for route descriptions. In F. Fonseca et M. Rodríguez, editeurs, *GeoS 2007*, volume LNCS 4853, pages 146–159. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. [III.2](#)

- D. Brosset, C. Claramunt, et E. Saux. An acs cooperative learning approach for route finding in natural environment. In H. Samet, C. Shahabi, et O. Wolfson, éditeurs, *16th ACM International Symposium on Geographic Information Systems, ACM-GIS 2008*, Irvine, California, USA, November 5-7 2008a. [IV.3](#)
- D. Brosset, C. Claramunt, et E. Saux. Wayfinding in natural and urban environments : a comparative study. *Cartographica, Toronto University Press*, 43(1) :21–30, 2008b. [II.1](#), [II.3.2](#), [III.2.2](#)
- R. Brunet. La composition des modèles dans l’analyse spatiale. *L’espace géographique : régions, environnement, aménagement*, 9(4) :253–265, 1980. ([document](#)), [I.3](#), [I.6](#)
- J.-P. Cheylan, T. Libourel, et C. Mende. Graphical modelling for geographic explanation. In [Hirtle et Frank \(1997\)](#), pages 473–483. ISBN 3-540-63623-4. [I.3](#)
- E. Chown, S. Kaplan, et D. Kortenkamp. Prototypes, location, and associative networks (plan) : Towards a unified theory of cognitive mapping. *Cognitive Science*, 19(1) : 1–51, 1995. [III.1.2](#)
- C. Claramunt et S. Winter. Structural salience of elements of the city. *Environment Planning B*, 34(6) :1030–1050, 2007. [I.4.2](#)
- C. Claramunt. A spatial form of diversity. In [Cohn et Mark \(2005\)](#), pages 218–231. ISBN 3-540-28964-X. [III.4.1](#)
- A. G. Cohn et D. M. Mark, éditeurs. *Spatial Information Theory, International Conference, COSIT 2005, Ellicottville, NY, USA, September 14-18, 2005, Proceedings*, volume 3693 of *Lecture Notes in Computer Science*, 2005. Springer. ISBN 3-540-28964-X. [D.2](#)
- Y. Collette et P. Siarry. *Optimisation multiobjectif*. 2002. [IV.1](#), [IV.1.2](#)
- H. Couclelis. *Verbal directions for Wayfinding : Space, Cognition and Language*, pages 133–153. Kluwer Academic Publishers, 1996. [I](#), [I.2](#), [II.3.1](#)
- C. Darwin. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London : John Murray, 1859. [IV.1.2](#)
- J. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, et J. Pasteels. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, 3(2) :159–168, 1990. [IV.2.1](#)

- M. Denis, F. Pazzaglia, C. Cornoldi, et L. Bertolo. Spatial discourse and navigation : An analysis of route directions in the city of Venice. *Applied Cognitive Psychology*, 13 :145–174, 1999. [I.4.2](#)
- M. Denis. The description of routes : A cognitive approach to the production of spatial discourse. *Current Psychology of Cognition*, 16 :409–458, 1997. (document), [I.2](#), [I.4.1](#), [I.4.2](#), [I.4.3](#), [II.2.4](#), [II.2.4](#), [II.3](#), [II.3.2](#), [II.1](#), [II.3.2](#), [II.9](#), [II.3.2](#), [II.4](#), [III.2](#)
- C. Dhaenens, M. Espinouse, et B. Penz. Problèmes combinatoires classiques et techniques de résolution. *Recherche Opérationnelle et réseaux, Hermes*, 2002. [IV.1.1](#)
- M. Donald. *Origins of the modern mind*. Harvard University Press, 1991. [II.3.1](#)
- M. Dorigo. Optimization, learning and natural algorithms (in Italian), Unpublished PhD report, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, Italy. 1992. [IV.1.2](#)
- M. Dorigo et G. Di Caro. The Ant Colony Optimization meta-heuristic. In D. Corne, M. Dorigo, et F. Glover, editeurs, *New Ideas in Optimization*, chapter 2, pages 11–32. McGraw-Hill, London, UK, 1999. [IV.2.2](#)
- M. Dorigo et L. M. Gambardella. Ant colony system : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 1(1) : 53–66, 1997. [IV.1.2](#), [IV.2.2](#)
- M. Dorigo, V. Maniezzo, et A. Colorni. Positive feedback as a search strategy. Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 1991. [IV.4.2](#)
- M. Dorigo, V. Maniezzo, et A. Colorni. Ant System : Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B*, 26(1) :29–41, 1996. [IV.2.2](#)
- M. Dorigo, G. Di Caro, et L. M. Gambardella. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, 5(2) :137–172, 1999. [IV.2.2](#)
- J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry, et É. Taillard. *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Eyrolles, 2003. [IV.1](#), [IV.1.2](#), [D.2](#)
- Z. Drezner. *Facility Location : A Survey of Applications and Methods*. Springer Verlag, 1995. [IV.1.1](#)

- S. Fontaine. Spatial cognition and the processing of verticality in underground environments. In [Montello \(2001\)](#), pages 387–399. ISBN 3-540-42613-2. [II.1](#)
- S. Fontaine et M. Denis. The production of route instructions in underground and urban environments. In [Freksa et Mark \(1999\)](#), pages 83–94. ISBN 3-540-66365-7. [I.4.2](#), [II.1](#)
- S. Fontaine, G. Edwards, B. Tversky, et M. Denis. Expert and non-expert knowledge of loosely structured environments. In [Cohn et Mark \(2005\)](#), pages 363–378. ISBN 3-540-28964-X. [II.1](#)
- L. Fraczak. *Description d'itinéraire : de la référence au texte*. Unpublished PhD report, Université de Paris-Sud, France, 1998. [I.2](#), [I.4.2](#)
- A. U. Frank et I. Campari, editeurs. *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS, International Conference COSIT '93, Marciana Marina, Elba Island, Italy, September 19-22, Proceedings*, volume 716 of *Lecture Notes in Computer Science*, 1993. Springer. ISBN 3-540-57207-4. [D.2](#)
- A. Frank. Qualitative Spatial Reasoning about Distances and Directions in Geographic Space. *Journal of Visual Languages and Computing*, 3(4) :343–371, 1992. [I.4.3](#), [I.4.3](#)
- C. Freksa. Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In A. U. Frank, I. Campari, et U. Formentini, editeurs, *Spatio-Temporal Reasoning*, volume 639 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 162–178. Springer, 1992. ISBN 3-540-55966-3. [I.4.3](#), [III.2.2](#)
- C. Freksa et D. M. Mark, editeurs. *Spatial Information Theory : Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science, International Conference COSIT '99, Stade, Germany, August 25-29, Proceedings*, volume 1661 of *LNCS*, 1999. Springer. ISBN 3-540-66365-7. [D.2](#)
- S. Freundschuh et M. Egenhofer. Human Conceptions of Spaces : Implications for Geographic Information Systems. *Transactions in GIS*, 2(4) :361–375, 1997. [I.1.1](#)
- L. A. M. Galea et D. Kimura. Sex differences in route learning. *Personality and Individual differences*, 14 :53–65, 1993. [I.4.2](#)
- T. Garling et R. Golledge. Environmental perception and cognition. *Advances in environment, behavior, and design*, 2 :203–236, 1989. [I.1.1](#)

- S. Ghariani et V. Furnon. *Programmation par contraintes et colonies de fourmis appliquées aux problèmes de tournées de véhicules*, chapter 10, pages 295–315. In [Dréo et al. \(2003\)](#), 2003. [IV.1.2](#)
- E. J. Gibson. *Basic processes in reading : Perception and comprehension*, chapter How perception really develops : A view from outside the network, pages 155–173. Erlbaum, 1977. [I.1.2](#)
- J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1979. [I.1.2](#), [II.2.4](#)
- F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, 13(5) :533–549, 1986. [IV.1.2](#)
- D. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1989. [IV.1.2](#)
- R. G. Golledge. Human wayfinding and cognitive maps. *Wayfinding behavior : Cognitive mapping and other spatial processes*, pages 5–45, 1999. [I.4.2](#), [III.2](#)
- S. Gopal, R. Klatzky, et T. Smith. NAVIGATOR : A psychologically based model of environmental learning through navigation. *Journal of Environmental Psychology*, 9 (4) :309–31, 1989. [III.1.3](#)
- S. Goss, S. Aron, J. Deneubourg, et J. Pasteels. Self-organized shortcuts in the Argentine ant. *Naturwissenschaften*, 76(12) :579–581, 1989. [IV.2.1](#)
- P. P. Grassé. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie : Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6 :41–80, 1959. [IV.2.1](#)
- H. Haken et J. Portugali. The face of the city is its information. *Journal of Environmental Psychology*, 23(4) :385–408, December 2003. ISSN 0272-4944. [III.4.1](#)
- D. Hernandez. Relative Representation of Spatial Knowledge : The 2-D Case. *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space*, pages 373–385, 1991. [I.4.3](#)
- D. Hernández, E. Clementini, et P. D. Felice. Qualitative distances. In A. U. Frank et W. Kuhn, éditeurs, *Proceedings of the Conference on Spatial Information Theory*,

- volume 988 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 45–57. Springer, 1995. ISBN 3-540-60392-1. (document), I.4.3, I.12
- S. C. Hirtle et A. U. Frank, editeurs. *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS, International Conference COSIT '97, Laurel Highlands, Pennsylvania, USA, October 15-18, 1997, Proceedings*, volume 1329 of *Lecture Notes in Computer Science*, 1997. Springer. ISBN 3-540-63623-4. D.2
- S. Jamaa, Z. Altman, J. Picard, et B. Fourestié. *Optimisation de réseaux mobiles UMTS à l'aide des algorithmes génétiques*, chapter 8, pages 241–265. In Dréo et al. (2003), 2003. IV.1.2
- M. Johnson. *The Body in the Mind : The Bodily Basis of Meaning, Imagination, and Reason*. The University of Chicago Press, Chicago, 1987. I.1.2, II.2.4
- V. Kalakoski et P. Saariluoma. Taxi drivers' exceptional memory of street names. *Memory and Cognition*, 29 :634–638, 2001. I.4.2
- S. Kaplan. Cognitive Maps in Perception and Thought. *Image and Environment : Cognitive Mapping and Spatial Behavior*, 1973. I.1.2
- S. Kirkpatrick, C. Gelatt, et M. Vecchi. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598) :671–680, 1983. IV.1.2
- A. Klippel et S. Winter. Structural salience of landmarks for route directions. In Cohn et Mark (2005), pages 347 – 362. ISBN 3-540-28964-X. I.4.2
- S. Kosslyn, H. Pick Jr, et G. Fariello. Cognitive Maps in Children and Men. *Child Development*, 45(3) :707–716, 1974. I.1.2
- B. Krieg-Brückner et H. Shi. Orientation calculi and route graphs : Towards semantic representations for route descriptions. In M. Raubal, H. J. Miller, A. U. Frank, et M. F. Goodchild, editeurs, *GIScience*, volume 4197 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 234–250. Springer, 2006. ISBN 3-540-44526-9. III.1.3
- B. Kuipers et T. Levitt. Navigation and mapping in large-scale space. *Artificial Intelligence Magazine*, 9(2), 1988. III.1.3
- B. Kuipers. Modeling spatial knowledge. *Cognitive Science*, 2 :129–153, 1978. III.1.1

- B. Kuipers. The "map in the head" metaphor. *Environment and Behavior*, 14(2) : 202–220, 1982. [I.1.2](#)
- B. Kuipers. *Representing Knowledge of Large-Scale Space*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1977. [III.1.1](#)
- F. Landragin. *Dialogue homme-machine multimodal*. Hermès, 2004. [I.3](#)
- J. Larkin et H. Simon. Why a Diagram is (Sometimes) Worth Ten Thousand Words. *Cognitive Science*, 11(1) :65–100, 1987. [I.3](#)
- E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. R. Kan, et D. B. Shmoys. *he Traveling Salesman Problem : A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, 1985. [IV.1.1](#)
- D. Leiser et A. Zilbershatz. The Traveller : A Computational Model of Spatial Network Learning. *Environment and Behavior*, 21(4) :435, 1989. [III.1.3](#)
- G. Ligozat. Reasoning about Cardinal Directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, 9(1) :23–44, 1998. [I.4.3](#)
- K. L. Lovelace, M. Hegarty, et D. R. Montello. Elements of good route directions in familiar and unfamiliar environments. In [Freksa et Mark \(1999\)](#), pages 65–82. ISBN 3-540-66365-7. [I.2](#), [I.4.2](#), [II.3.2](#)
- J. Lowe et S. Moryadas. *The geography of movement*. Houghton Mifflin, Boston, 1975. [I.1](#)
- K. Lynch. *The Image of the City*. MIT Press, Cambridge, 1960. [I.1.2](#), [I.4.2](#)
- S. Martello et P. Toth. *Knapsack problems : algorithms and computer implementations*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1990. [IV.1.1](#)
- Y. Mathet. *Etude de l'expression en langue de l'espace et du déplacement : Analyse linguistique, modélisation cognitive, et leur expérimentation informatique*. Unpublished phd thesis, Université de Caen, Caen, 2000. ([document](#))
- V. Maya. *Accès aux bases de données géographiques en langage naturel Applications aux descriptions d'itinéraire*. Unpublished phd thesis, LIMSI, Université de Paris Sud, Orsay, France, 2001. ([document](#)), [II.3.1](#), [II.7](#)

- N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, et E. Teller. Equations of state calculations by fast computational machine. *Journal of Chemical Physics*, 21 (6) :1087–1091, 1953. [IV.1.2](#)
- P.-E. Michon et M. Denis. When and why are visual landmarks used in giving directions ? In [Montello \(2001\)](#), pages 292–305. ISBN 3-540-42613-2. [I.4.2](#), [I.4.2](#), [III.2](#)
- P.-E. Michon, D. Duguay, et G. Edwards. Fondements et approche d’un modèle cognitif du déplacement. In *International Conference on Spatial Analysis and GEomatics*, Avignon, France, 2005. [II.1](#)
- D. R. Montello, editeur. *Spatial Information Theory : Foundations of Geographic Information Science, International Conference, COSIT 2001, Morro Bay, CA, USA, September 19-23, 2001, Proceedings*, volume 2205 of *Lecture Notes in Computer Science*, 2001. Springer. ISBN 3-540-42613-2. [D.2](#)
- D. R. Montello. Scale and multiple psychologies of space. In [Frank et Campari \(1993\)](#), pages 312–321. ISBN 3-540-57207-4. [I.1.1](#)
- A. Musto, K. Stein, K. Schill, A. Eisenkolb, et W. Brauer. Qualitative motion representation in egocentric and allocentric frames of reference. In [Freksa et Mark \(1999\)](#), pages 461–476. ISBN 3-540-66365-7. [I.4.3](#), [III.2.2](#)
- C. Nothegger. *Automatic selection of landmarks*. Unpublished PhD report, Vienna Technical University, Austria, 2003. [I.4.2](#)
- J. Pasteels, J. Deneubourg, et S. Goss. Self-organization mechanisms in ant societies. I : Trail recruitment to newly discovered food sources. *Experientia. Supplementum*, 54 :155–175, 1987. [IV.2.1](#)
- J. Piaget, B. Inhelder, et A. Szeminska. *The Child’s Conception of Geometry*. London : Routledge & Kegan Paul, 1960. [I.1.2](#)
- V. Piveteau et S. Lardon. Chorèmes et diagnostics de territoire : une expérience de formation. *Mappemonde*, 68(4) :1–6, 2002. [I.3](#)
- E. Przytula-Machrouh. *Information verbale et information graphique pour la description d’itinéraires*. Unpublished PhD report, Université René Descartes, France, 2004. (document), [I.3](#), [I.4.1](#), [I.8](#), [II.3](#), [II.3.2](#), [II.1](#), [II.3.2](#)

- E. Przytula-Machrouh, G. Ligozat, et M. Denis. Vers des ontologies transmodales pour la description d'itinéraires. le concept de " scène élémentaire ". *Revue internationale de Géomatique, Hermès, Paris*, 14(2) :285–302, 2004. [I.4.1](#), [I.4.2](#)
- R. Rardin. *Optimization in Operations Research*. Prentice Hall, 1998. [IV.1.1](#)
- M. Raubal. Structuring wayfinding tasks with image schemata. Master's thesis, University of Maine, U.S.A., Orono, ME, 1997. [I.1.2](#), [II.2.4](#)
- M. Raubal et S. Winter. Enriching wayfinding instructions with local landmarks. In M. J. Egenhofer et D. M. Mark, éditeurs, *GIScience*, volume 2478 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 243–259. Springer, 2002. ISBN 3-540-44253-7. [I.4.2](#)
- M. Raubal et M. Worboys. A formal model of the process of wayfinding in built environments. In [Freksa et Mark \(1999\)](#), pages 381–399. ISBN 3-540-66365-7. [II.1](#)
- C. Shannon et W. Weaver. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois, 1949. [III.4.1](#)
- M. E. Sorrows et S. C. Hirtle. The nature of landmarks for real and electronic spaces. In [Freksa et Mark \(1999\)](#), pages 37–50. ISBN 3-540-66365-7. [I.4.2](#), [III.2](#)
- T. Stützle. Parallelization strategies for ant colony optimization. In A. E. Eiben, T. Bäck, M. Schoenauer, et H.-P. Schwefel, éditeurs, *PPSN*, volume 1498 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 722–731. Springer, 1998. ISBN 3-540-65078-4. [IV.5](#)
- T. Stützle et H. H. Hoos. Max-min ant system. *Future Generation Comp. Syst.*, 16(8) :889–914, 2000. [IV.2.2](#)
- É. Taillard, L. Gambardella, M. Gendreau, et J. Potvin. Adaptive Memory Programming : A Unified View of Meta-Heuristics. *European Journal of Operational Research*, 135(1) :1–16, 2001. [IV.2](#)
- L. Talmy. *How Language Structures Space*. Cognitive Science Program, Institute of Cognitive Studies, University of California at Berkeley, 1983. ([document](#))
- H. Taylor et B. Tversky. Spatial mental models derived from survey and route descriptions. *Journal of memory and language(Print)*, 31(2) :261–292, 1992. [I.1.2](#)

- E. Tolman. Cognitive Maps in Rat and Men. *Psychological Review*, 55(1) :89–208, 1948. I.1.2
- A. Tom et M. Denis. Referring to landmark or street information in route directions : What difference does it make ? In W. Kuhn, M. F. Worboys, et S. Timpf, éditeurs, *COSIT*, volume 2825 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 362–374. Springer, 2003. ISBN 3-540-20148-3. I.4.2
- B. Tversky. Spatial mental models. *The Psychology of learning and motivation*, 27 : 109–145, 1991. I.1.1
- B. Tversky. Spatial schemas in depictions. *Spatial schemas and abstract thought*, pages 79–111, 2001. I.3
- B. Tversky. Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models. In [Frank et Campari \(1993\)](#), pages 14–24. ISBN 3-540-57207-4. I.1.2
- B. Tversky et P. U. Lee. Pictorial and verbal tools for conveying routes. In [Freksa et Mark \(1999\)](#), pages 51–64. ISBN 3-540-66365-7. I.3
- C. Vandeloise. *L'espace en français : sémantique des prépositions spatiales*. Seuil, 1986. (document), I.4.3
- S. Werner, B. Krieg-Brückner, et T. Herrmann. Modelling navigational knowledge by route graphs. *Lecture Notes in Computer Science*, 1849 :295–316, 2000. III.1.3
- D. Wunderlich et R. Reinelt. How to get there from here. In R. J. Jarvella et W. Klein, éditeurs, *Speech, Place, and Action*, pages 183–201. Wiley, Chichester, 1982. I.2, I.4.1
- K. Zimmermann. Enhancing qualitative spatial reasoning - combining orientation and distance. In *COSIT*, pages 69–76, 1993. I.4.3
- K. Zimmermann et C. Freksa. Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge. *Applied Intelligence*, 6(1) :49–58, 1996. I.4.3

DESCRIPTION D'ITINÉRAIRE EN MILIEU NATUREL : MODÈLE INTÉGRÉ DE DESCRIPTION VERBALE ET DE REPRÉSENTATION SPATIALE AU SEIN DES SIG

RESUME: La recherche proposée est orientée vers l'étude de descriptions verbales d'itinéraires dans le but de spatialiser des itinéraires décrits au sein de systèmes géo-référencés, avec une application à un contexte de course d'orientation dans un environnement naturel. Il s'agit explicitement de faire un lien conceptuel, structurel et logique entre une description verbale d'itinéraire et une représentation spatialisée. Une étude des descriptions verbales d'itinéraire produites lors d'expériences de course d'orientation a permis de définir une modélisation formelle par extraction des informations statiques et dynamiques d'un itinéraire décrit. La représentation logique dérivée s'appuie sur un modèle de graphe où les entités de référence sont les repères et les actions de déplacement. Elle permet en particulier une confrontation avec les démarches usuelles de qualification d'itinéraires en milieu urbain. Cette modélisation sert ensuite de support à une proposition d'algorithme de recherche et de spatialisation d'itinéraire développée à partir des principes des algorithmes de colonies de fourmis. La démarche de recherche est validée par un prototype expérimental qui combine une modélisation d'itinéraire avec une recherche de parcours optimale. Ce prototype est illustré par une série de tests expérimentaux et des études de performance.

Mots-clés: *descriptions verbales d'itinéraire, SIG, algorithmes par colonies de fourmis, modélisation de navigation, environnement naturel, course d'orientation*

ROUTE DESCRIPTION IN NATURAL ENVIRONMENT: AN INTEGRATED MODEL FOR VERBAL DESCRIPTION AND SPATIAL REPRESENTATION IN GIS

ABSTRACT: The aim of this research is oriented to the development of a modeling pathway between verbal route descriptions made in natural environment and geo-referenced information. The objective is to identify a conceptual and structural relationship between a navigation description and a spatial representation. The approach is experimented in the context of foot orienteering. The experimental results obtained have supported derivation of a logical model of navigation knowledge in natural environments. The model developed is based on actions and landmarks. The results are compared to similar studies made in urban environments. On top of the proposed model, we introduce an ant colony based algorithm whose objective is to geo-localize routes described in natural environment. A prototype validates the approach and shows that the algorithm performs with acceptable computing time, and that it provides acceptable solutions.

Keywords: *verbal route descriptions, GIS, ant colony algorithm, spatial knowledge representation, natural environment, orienteering*